—— ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ ——

УДК 551.321.84

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДНИКОВ ЭЛЬБРУСА В XXI В. ЧАСТЬ 2. ПРОГНОЗ ЭВОЛЮЦИИ ЛЕДНИКОВ И ФОРМИРОВАНИЯ ОЗЁР ПРИ РАЗНЫХ СЦЕНАРИЯХ SSP

© 2024 г. Т. Н. Постникова^{1*}, О. О. Рыбак^{1,2,3}, А. С. Губанов⁴, Х. Зеколлари⁵, М. Хусс^{6,7,8}

¹Институт водных проблем РАН, Москва, Россия ²Институт природно-технических систем, Севастополь, Россия ³Earth System Science and Departement Geografie, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium ⁴Географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия ⁵Department of Water and Climate, Faculty of Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium ⁶Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich, Zürich, Switzerland ⁷Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmensdorf, Switzerland ⁸Department of Geosciences, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland ⁸Department of Geosciences, University of 4.06.2024 г. После доработки 04.06.2024 г.

Рассмотрены вероятные сценарии изменения ледников Эльбруса и связанные с этим явления, такие как образование гляциальных озёр и областей погребённого под мореной мёртвого льда в будущем. Согласно нашим оценкам, отступание ледников может привести к образованию от восьми до семнадцати новых озёр, из которых шесть потенциально могут быть временно подпружены зонами мёртвого льда толщиной до 60 м.

Ключевые слова: горные ледники, математическая модель, гляциологическое моделирование, численные эксперименты, изменение климата, климатические проекции, СМІР6, Эльбрус, прогляциальные озёра

DOI: 10.31857/S2076673424030021, EDN: IOPYVM

ВВЕДЕНИЕ

В первой части настоящего исследования была описана методология прогностических расчётов состояния оледенения Эльбруса в XXI веке. Были рассмотрены теоретические основы математического моделирования с использованием глобальной гляциологической модели (ГГМ) GloGEMflow (Zekollari et al., 2019), к которой был присоединён дополнительный блок для описания эволюции моренного покрова на ледниках (Postnikova et al., 2023). Была описана процедура настройки модели и приведены результаты её валидации.

Во второй части работы описываются результаты численных экспериментов, в которых были получены конфигурации ледников Эльбруса на разных временных срезах до конца текущего столетия, оценены ожидаемые значения площади и объёма ледников, распространение поверхностной морены при реализации различных климатических

сценариев из набора SSP. Ожидаемое отступание фронтов ледников приведёт к формированию прогляциальных озёр в локальных депрессиях ложа на месте отступивших ледников и областей мёртвого льда, которые в определённых обстоятельствах будут озёра подпруживать, увеличивая, тем самым, вероятность их прорыва. Этот процесс уже происходит на месте отступившего ледника Бирджалы-Чиран, где с 1957 г. сформировалось 12 новых озёр (Докукин и др., 2022) и образовался опасный селевой котёл. В 2003 и 2006 гг. был зафиксирован прорыв озёр Восточное и Среднее Бирджалы. Механизм прорывов озёр – перелив через ледяную гряду с её размывом (Докукин и др., 2022). Два озера, Южное и Юго-Западное Бирджалы, появились около фронта ледника в 2016 и 2018 гг., они подпружены ледником и мёртвым льдом и, вероятно, потенциально прорывоопасны (Докукин и др., 2022). Потенциальные места формирования будущих озёр были определены ранее (Лаврентьев и др., 2020), однако наиболее вероятное время их образования выяснено в настоящей работе.

В ГГМ процессы энергообмена и динамики ледников описываются в упрощённой форме. Это ведёт к неизбежной неопределённости в прогностических расчётах характеристик оледенения. Однако с ростом заблаговременности прогнозов всё возрастающую роль начинает играть разброс в исходных климатических сценариях. Эти вопросы также обсуждаются в настоящей работе.

В первом разделе статьи кратко описаны изменения баланса массы и конфигурации ледников Северного Кавказа в XXI веке. Во втором разделе рассмотрены результаты численных экспериментов для Эльбруса, приводятся изменения баланса массы, объёма, площади ледников, а также оценивается влияние моренного покрова. Третий раздел посвящён явлениям, связанным с отступанием ледников Эльбруса — образованию новых прогляциальных озёр и областей погребённых мёртвых льдов. В четвёртом разделе обсуждены источники погрешностей, результаты сопоставлены с существующими исследованиями.

Климатические сценарии. Сценарии SSP появились в цикле Шестого оценочного доклада IPCC (IPCC, 2021) и в настоящее время постепенно сменяют в климатических и связанных с ними исследованиях принятые ранее сценарии семейства RCP (Representative Concentration Pathways), добавляя пять новых социально-экономических сюжетных линий.

Отличие SSP от RCP заключается в том, что они помимо радиационной нагрузки на климатическую систему (вторая цифра в наименовании сценария) включают и различные социально-экономические условия и предполагаемые меры по ограничению выбросов парниковых газов, аэрозолей и др., образуя группы сценариев, объединяемые по ряду признаков (первая цифра в наименовании конкретного сценария). Ниже дана их краткая характеристика (Семенов, Гладильщикова, 2022):

SSP1: Устойчивый и условно «зелёный» путь соответствует всё более устойчивому миру. В фокусе находится благосостояние людей, а не экономический рост. Потребление ориентировано на минимизацию использования материальных ресурсов и энергии;

SSP2: «Средний путь». Траектория прошлого и текущего глобального развития экстраполируется в будущее. Ожидается определённая деградация экологических систем;

SSP3: «Региональное соперничество». Рост национализма и региональных конфликтов отодвигает на задний план глобальные проблемы. В некоторые регионах наносится серьёзный ущерб окружающей среде;

SSP4: «Рост неравенства». Углубление пропасти между развитыми обществами, сотрудничающими в глобальном масштабе, и теми, кто застревает на более низкой стадии развития с низким доходом и низким уровнем образования. Экологическая политика успешно решает проблемы только в отдельных регионах;

SSP5: «Экстенсивный». Развитие, основанное на использовании ископаемого топлива. Глобальные рынки становятся всё более интегрированными, что ведёт к инновациям и техническому прогрессу. Успешно решаются региональные экологические проблемы.

Мы использовали наиболее характерные, и, в связи с этим, наиболее применяемые в аналогичных исследованиях сценарии (IPCC, 2021):

SSP1-1.9: Очень низкий уровень выбросов парниковых газов, который начнёт снижаться сейчас и достигнет нулевого уровня вскоре после 2050 г.;

SSP1-2.6: Низкий уровень выбросов парниковых газов, которые будут снижаться медленно до нулевого уровня к 2075 г.;

SSP2-4.5: Промежуточный уровень выбросов парниковых газов, в соответствии с которым выбросы останутся на текущем уровне до 2050 г., а затем начнут снижаться;

SSP3-7.0: Высокий уровень выбросов парниковых газов, который к 2100 г. возрастёт в два раза;

SSP5-8.5: Очень высокий уровень выбросов парниковых газов, который к 2050 г. увеличится в два раза.

Такой выбор позволяет охватить весь спектр возможностей без излишней детализации: от минимального радиационного воздействия при наиболее благоприятном для окружающей среды развитие цивилизации (сценарий SSP1–1.9) до максимально неблагоприятного «экстремального» (сценарий SSP5–8.5).

Список использованных климатических моделей, а также методы подготовки климатических данных были описаны в части первой данной статьи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ: ДЕГРАДАЦИЯ ОЛЕДЕНЕНИЯ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА В XXI ВЕКЕ

Изменение конфигурации ледников. Для того, чтобы оценить масштабы будущего сокращения оледенения Эльбруса, целесообразно сделать это в контексте дегляциации всего Северного Кавказа (рис. 1). С использованием методики, описанной в первой части настоящей статьи (более детально – в (Postnikova et al., 2023) мы рассчитали будущие параметры оледенения во всех упомянутых

ЛЁДИСНЕГ №3 2024



Рис. 1. Контуры и толщина ледников в западной части Центрального Кавказа, при медианном сценарии изменения климата (который примерно соответствует реализации климатического сценария SSP2–4.5 на климатической модели GFDL–ESM4). *1* – толщина льда; *2* – государственная граница между Российской Федерацией и Грузией; *3* – границы ледников RGI6.0 на дату инвентаризации (2000–2004 гг.)

Fig. 1. Glacier configurations in the western part of the Central Caucasus under the median climate change scenario (approximately corresponding to the SSP2–4.5 climate scenario on the GFDL–ESM4 climate model). 1 - ice thickness; 2 - border between Russia and Georgia; <math>3 - glacier outlines according to RGI6.0 at the inventory date (2000–2004)

сценариях. В «экстремальном» сценарии SSP5–8.5 к 2060 г. большинство ледников в регионе исчезнет, а к 2100 г. льда в регионе практически не останется, за исключением небольшого островка на Эльбрусе. В «мягком» сценарии SSP1–2.6, предполагающем стабилизацию климатических условий к середине столетия (часть 1 настоящего исследования), крупные ледники потеряют свои длинные языки и разделятся на несколько малых ледников, а маленькие ледники исчезнут. Однако на больших высотах может сохраниться довольно толстый лёд (например, более 100 м на леднике Караугом в среднем климатическом сценарии SSP2-4.5).

Модель, использованная в данной работе, вообще говоря, не предназначена для детальной реконструкции отдельных ледников, однако провести некоторые качественные сравнения между характером эволюции некоторых ледников в разных климатических сценариях всё же возможно. Например, ледник Шхельда к 2100 г. отступит на 500 м выше в сценарии SSP5-8.5, чем в сценарии SSP1-2.6. Ледник Джанкуат к 2060 г. практически полностью исчезнет в сценарии SSP5-8.5, в то время как в сценарии SSP1-2.6 небольшой фрагмент ледника всё же сохранится. Большие разветвлённые ледники разделятся на несколько маленьких. Например, ледник Безенги, согласно прогностическим расчётам, рано или поздно (в зависимости от климатического сценария) разделится на несколько частей (см. рис. 1): часть ледника, движущегося со стороны перевала Цаннер, отделится до 2030 г., со стороны горы Гивтола – в 2050-х годах, со стороны горы Джангитау – в 2030-х годах. При этом во второй половине века на высоте около 2900 м над ур. моря в случае сильного потепления образуется область льда, которая полностью отделится от основной области аккумуляции в 2060-х годах и сравнительно быстро стает, после чего ледник отступит выше 3000 м над ур. моря. Для более точного прогноза требуется использовать трёхмерную гляциологическую модель.

В бассейне р. Терек в климатическом сценарии SSP1–2.6 наибольший объём льда к 2100 г. сохранится на высотах 3500–4000 м над ур. моря. (рис. 2). В бассейне Кубани при любом климатическом сценарии будет формироваться два экстремума в распределении объёма льда по высотным поясам: на высотах 2800–3400 м, в основном на отрогах Главного Кавказского хребта, и на высоте 4300–4700 м, на Эльбрусе (см. рис. 2).

В сценарии SSP5–8.5 ледники сохранятся главным образом на Эльбрусе выше 4000 м над ур. моря (см. рис. 2). В бассейне р. Терек 84% льда, сохранившегося к 2100 г., будет сосредоточена на Эльбрусе, а в бассейне Кубани – 98% и выше 4500 м над ур. моря (см. рис. 2). При этом 2% объёма льда сохранится на высоте 3500–3700 м, на склонах Главного Кавказского хребта. В наиболее «мягком»

ЛЁДИСНЕГ №3 2024

сценарии SSP1–1.9 доля ледников Эльбруса в общем объёме льда в регионе к 2100 г. будет заметно скромнее — менее 30%. Очевидная причина заключается в том, что абсолютная высота Эльбруса достаточна для значительного отступания ледников, такого, которое невозможно более нигде в регионе.

Изменение поверхностного баланса массы. Прогностический поверхностный баланс массы рассчитывался для каждого климатического сценария индексно-температурным методом (Hock, 2003; Huss, Hock, 2015). Его изменения (рис. 3, в) обусловлены двумя разнонаправленно действующими факторами: будущим потеплением климата (которое усиливает абляцию) и отступанием ледников на большую высоту (что уменьшает абляцию). В сценариях с незначительным потеплением (SSP1-1.9, SSP1-2.6) уменьшение баланса массы будет компенсироваться отступанием фронтов ледников на большую высоту, итогом чего будет переход ледников в стационарное состояние. Так, в сценарии SSP1-1.9 средний по региону баланс массы будет отрицательным приблизительно до 2055 г., а во второй половине столетия станет положительным (см. рис. 3, *в*). В сценарии SSP1–2.6 средний баланс массы приблизится к нулевому значению примерно к 2090 г. Незначительный вклад в стабилизацию, по-видимому, внесёт рост осадков в период аккумуляции, который также будет частично компенсировать рост температуры воздуха.

В сценариях со значительным потеплением (SSP3-7.0, SSP5-8.5) отступание продолжится, стабилизации не наступит, и в конце концов ледники (кроме ледников Эльбруса) исчезнут. В медианном сценарии, который примерно соответствует SSP2-4.5, стабилизация ледников наступит около 2100 г. для Эльбруса и несколько позже для остальных ледников.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ: ДЕГРАДАЦИЯ ОЛЕДЕНЕНИЯ ЭЛЬБРУСА В XXI ВЕКЕ

Изменения поверхностного баланса массы, площаdu и объёма ледников. Согласно расчётам, поверхностный баланс массы ледников Эльбруса (как, собственно, и всего северного склона Большого Кавказа, см. предыдущий раздел) в среднем продолжит уменьшаться до конца 2030-х годов, достигая значений -1.1 ± 0.3 м в. э. год $^{-1}$ в среднем по Эльбрусу (см. рис. 3, г). При этом различия в оценках, полученных в разных климатических сценариях, будут невелики.

Остановимся более подробно на эволюции конфигурации ледников Эльбруса. В табл. 1 сведены результаты расчётов средней площади и объёма оледенения Эльбруса в соответствии с использованными климатическими сценариями, а также



Рис. 2. Распределение объёма льда по высотным поясам в 2100 г., в зависимости от климатического сценария SSP (жирные линии — медианные значения среди всех климатических моделей для каждого сценария). Штрихом обозначены результаты, полученные без моренного блока, сплошной линией — при участии эволюционирующей морены. Чёрной линией обозначено медианное распределение объёма льда для ледников Эльбруса при сценарии SSP5—8.5

Fig. 2. Distribution of ice volume in elevation zones in 2100, depending on the SSP climate scenario (bold lines represent median values among all General Circulation Models (GCMs) for each scenario). Dashed lines indicate results obtained without the debris-cover module, while solid lines represent results with the evolving debris cover. The black line denotes the median distribution of ice volume for Elbrus glaciers under the SSP5–8.5 scenario

Рис. 3. Прогнозируемые изменения объёма (*a*) и площади оледенения Эльбруса (*b*). 1 - SSP1-1.9; 2 - SSP1-2.6; 3 - SSP2-4.5; 4 - SSP3-7.0; 5 - SSP5-8.5; 6 - площадь ледников на 2017 г. согласно (Kutuzov et al., 2019). Жирные линии – медианные значения среди всех GCM каждого сценария. Тонкие линии – результат для каждой отдельной GCM. Штрихом обозначены результаты, полученные без моренного блока, сплошной линией – при участии эво-люционирующей морены. Изменение поверхностного баланса массы ледников Северного Кавказа (*b*) и Эльбруса (м в. э. год⁻¹) при разных климатических сценариях (*c*): 6 - медиана значений баланса массы из полного набора климатических моделей, реализованных на всех сценариях. Жирные кривые – медиана для данного сценария, цветные области – разброс для данного сценария среди разных климатических моделей. Шаг сглаживания – 2 года. (*d*) Сокращение объёма ледников Эльбруса (м в. э. год⁻¹) в среднем в 1997–2017 (адаптировано из статьи Kutuzov et al., 2019) и в 2017–2037 в соответствии с модельным прогнозом (*e*)

Fig. 3. Projected changes in ice volume (*a*) and glacier area of Mount Elbrus (δ): 1 - SSP1 - 1.9; 2 - SSP1 - 2.6; 3 - SSP2 - 4.5; 4 - SSP3 - 7.0; 5 - SSP5 - 8.5; 6 - glacier area in 2017 according to (Kutuzov et al., 2019). Bold lines represent median values among all GCMs for each scenario. Thin lines show results for each individual GCM. Dashed lines indicate results obtained without the debris-cover module, while solid lines represent results with the evolving debris cover. Changes in surface mass balance of glaciers in the Northern Caucasus (*a*) and Elbrus (m w. e. yr.⁻¹) under different climate scenarios (*z*): 6 -median balance values from the full set of climate models implemented for all scenarios. Bold curves represent the median for each scenario, colored areas indicate the range for each scenario among different climate models. Smoothing interval is equal to 2 years. (*d*) Glacier volume reduction of Mount Elbrus (m w. e. yr.⁻¹) averaged over 1997–2017 (adapted from Kutuzov et al., 2019) and in 2017–2037 according to the model forecast (*e*)



абсолютные отклонения от среднего значения и стандартные отклонения прогнозной площади и объёма оледенения для климатического форсинга каждой из климатических моделей в рамках одного и того же сценария. Конфигурации ледников Эльбруса для временных срезов 2040, 2060 и 2100 гг., в сценариях SSP1–2.6 и SSP5–8.5 показаны на рис. 4. Представленные результаты – медианные в соответствии с мультимодельными сценариями. Цифрами обозначены озёра, которые могут быть образованы при исчезновении льда на Эльбрусе (Лаврентьев и др., 2020). Изолинии показывают высоту

ЛЁДИСНЕГ №3 2024



Рис. 4. Конфигурации ледников Эльбруса в 2025, 2040, 2060 и 2080 гг., медианные, в соответствии с мультимодельными сценариями SSP1–2.6 (*a*, *e*, *d*) и SSP5–8.5 (*б*, *e*, *e*). *1* – области мёртвого льда; *2* – переуглубления ложа, идентифицированные в работе (Лаврентьев и др., 2020); *3* – примерные контуры озёр, соответствующие топографии ложа из (Huss, Farinotti, 2012, обновлено в 2019 г.) и переуглублениям из (Лаврентьев и др., 2020); *4* – очертания ледников в 2000 г. (RGI, 2017)

Fig. 4. Configurations of Mount Elbrus glaciers in 2025, 2040, 2060, and 2080, median values, according to multimodel scenarios SSP1–2.6 (*a*, *e*, ∂) and SSP5–8.5 (*b*, *e*, *e*). *1* – dead-ice areas; *2* – bed overdeepenings identified in the study (Lavrentiev et al., 2020); *3* – approximate contours of lakes corresponding to the bedrock topography from (Huss, Farinotti, 2012, updated in 2019); *4* – glacier outlines in 2000 (RGI, 2017)

Таблица 1. Результаты расчётов площади и объёма оледенения Эльбруса в соответствии с использованными климатическими сценариями

Сценарий		SSP1	1-1.9	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP3-7.0		SSP5-8.5			
P	ежим	M*	Б**	М	Б	M	Б	М	МБМ		Б		
Объём (<i>км</i> ³)													
2040	Среднее	5.42	4.18	5.15	4.18	5.04	4.05	5.38	4.36	4.64	3.74		
	CAO***	0.95	0.80	0.50	0.42	0.60	0.51	0.58	0.50	0.56	0.48		
	CO****	1.16	0.97	0.69	0.59	0.70	0.60	0.71	0.61	0.85	0.75		
2060	Среднее	4.97	3.58	4.22	3.58	3.62	3.04	3.30	2.73	2.61	2.17		
	CAO	0.89	0.76	0.54	0.48	0.35	0.31	0.69	0.60	0.53	0.40		
	CO	1.15	1.00	0.77	0.68	0.45	0.38	0.85	0.75	0.68	0.50		
2080	Среднее	5.43	3.46	4.01	3.46	2.95	2.55	2.00	1.76	1.35	1.19		
	CAO	1.39	1.33	0.59	0.52	0.30	0.26	0.43	0.34	0.33	0.30		
	CO	1.95	1.85	0.75	0.66	0.49	0.44	0.63	0.50	0.39	0.35		
2100	Среднее	5.43	3.43	3.92	3.43	2.50	2.22	1.23	1.11	0.65	0.59		
	CAO	1.16	1.07	0.56	0.51	0.46	0.41	0.41	0.37	0.29	0.26		
	СО	1.59	1.45	0.73	0.66	0.68	0.60	0.56	0.50	0.35	0.28		
	Площадь (κM^2)												
2040	Среднее	99.07	88.67	99.03	86.65	98.98	86.25	100.71	88.97	97.33	85.73		
	CAO	5.61	8.18	2.92	4.20	3.01	4.59	2.89	4.80	5.44	8.02		
	CO	7.94	10.58	3.98	5.59	3.62	5.37	3.57	5.79	7.39	10.64		
2060	Среднее	87.90	79.64	81.35	73.73	76.00	67.73	75.45	66.06	68.80	60.48		
	CAO	11.29	8.80	6.35	5.40	5.78	4.38	8.34	6.92	12.52	10.38		
	CO	13.95	11.34	8.72	7.57	7.44	5.66	9.98	8.65	17.41	14.10		
2080	Среднее	88.19	83.25	75.45	69.90	65.08	58.72	51.62	46.58	45.22	40.84		
	CAO	11.88	10.48	6.57	6.19	3.84	3.82	8.14	6.40	11.19	9.56		
	CO	15.30	15.06	8.61	7.83	5.57	5.38	10.85	8.79	17.61	15.54		
2100	Среднее	88.81	84.16	73.37	68.67	56.69	51.36	34.48	31.83	28.74	26.40		
	CAO	11.22	10.90	5.95	5.21	4.76	4.69	6.57	5.88	12.85	11.54		
	CO	15.39	15.08	7.89	6.94	7.61	7.27	9.26	8.22	21.01	18.56		

Table 1. Modelled area and volume of Elbrus glaciation according to the SSP climate scenarios

*М — медианные значения для каждого сценария с учётом трансформирующейся морены; **Б — медианные значения для каждого сценария без учёта трансформирующейся морены; ***САО — средние абсолютные отклонения; ****СО — стандартное отклонение.

*M – median values for each scenario including transforming moraine; **B – median values for each scenario without taking into account the moraine transformation; ***CAO – mean absolute deviation; ****CO – standard deviation.

поверхности ложа, полученной путём вычитания толщины ледников из ЦМР поверхности ледников.

Расчёты показывают, что объем оледенения Эльбруса будет убывать почти линейно ориентировочно до 2040 г. (см. рис. 3, а). После этого потери льда замедлятся. К концу века произойдёт стабилизация объёма льда на более высоком уровне в сценариях SSP1-1.9 (75±20% от объёма льда в 2020 г.) и SSP1-2.6 (53±9% от объёма льда в 2020 г.). Заметим, что в «минимальном» сценарии SSP1-1.9 ледники Эльбруса после 2050 года начнут наступать, и их объём даже начнёт постепенно превышать современный (соответствующий 2020 г.). При реализации «среднего» сценария SSP2-4.5 объём ледников продолжит сокращаться с примерно постоянной скоростью после 2040 г., но в два раза медленнее, чем в 2020-2040 гг., и к 2100 г. прогнозируемый объём уменьшится до 33±9% по сравнению с 2020 г. В «экстремальных» сценариях SSP3-7.0 и SSP5-8.5 оставшийся объём льда составит соответственно 16±7 и 9±4% от объёма в 2020 г.

Можно ожидать, что в период до конца 2030-х годов скорость среднего ежегодного сокращения объёма будет примерно в два раза выше, чем в 1997-2017 гг., при этом самое большое сокращение массы прогнозируется на ледниковом плато Джикаугенкёз (см. рис. 3, $\partial -e$). К 2040 г., фронтальные части ледников отступят в среднем на 300 м выше относительно их положения в 2000 г. Медленнее всего будет отступать фронт ледника Кюкюртлю. Ожидается, что плато Джикаугенкёз будет значительно истончаться в выположенной области. что и станет причиной того. что плато будет областью с самым значительным сокращением объёма льда на Эльбрусе и исчезнет к 2040 г. (см. рис. 4). После 2035 г. сокращение объёма оледенения начнёт замедляться во всех климатических сценариях, кроме SSP3-7.0 и SSP5-8.5, в рамках которых это сокращение будет расти до 2060-х годов, достигая значений от -1 до -1.5 м в. э. г.⁻¹. К 2055 г. в сценарии SSP1-1.9 и около 2070х годов в SSP1-2.6 сокращение объёма оледенения прекратится полностью, иначе говоря, ледники выйдут на стационарный режим. Эти результаты соответствуют климатическому форсингу (см. рис. 4, а из части 1 данной статьи): температура в сценариях SSP1-1.9 и SSP1-2.6 перестанет расти, соответственно, после 2035 и 2045 гг. В сценарии SSP2-4.5 возможно прекращение сокращения объёма ледников к 2100 г., однако сделать утверждение об их стационарности невозможно, так как расчёты ограничены 2100-м годом. При реализации «экстремальных» сценариев SSP3-7.0 и SSP5-8.5 ледники в конце века продолжат терять массу со скоростью -1 м в. э. г. $^{-1}$.

Моренный покров. Согласно прогностическим оценкам, площадь заморененного льда на Эльбрусе будет продолжать расти и увеличится в два раза к 2040 г. по сравнению с 2020 г. При этом средняя мощность моренного покрова может возрасти также в два раза, на 20 см, в медианном сценарии к 2040 г.

Моренный покров оказывает незначительное влияние на изменение общего объёма льда на Эльбрусе (см. рис. 3, *a*), но площадь оледенения, моделируемая с учётом моренного покрова, до определённого момента в будущем (2060—2080 гг. в зависимости от климатического сценария) может превышать площадь, полученную в режиме «без морены», на 10% (см. рис. 3, δ). Однако после 2080 г. и объём, и площадь при моделировании в режиме «с мореной» и без неё становятся почти равны.

На отдельных ледниках моренный покров может временно задерживать стаивание прифронтальных участков и тем самым способствовать формированию и сохранению областей мёртвого льда, отделившихся от активного ледника (рис. 5). Особенно отчётливо влияние моренного покрова выражено при моделировании ледников Большой и Малый Азау, Кюкюртлю и Джикаугенкёз (см. рис. 5). При этом большую роль играют свойства моренного покрова, которые определяют форму кривой Острема (см. часть 1 данной статьи). Так, если с ростом толщины моренного покрова таяние уменьшается быстрее (значение h_{debris}^* меньше), то лёд под мощным слоем морены сохраняется дольше. Например, при $h_{debris}^* = 115$ см мёртвые льды, образующиеся около ледника Джикаугенкёз, сохраняются в модели около 10 лет, в то время как при $h_{debris}^* = 44$ см они могут существовать под мореной около 50 лет.

Результаты численных экспериментов: формирование прогляциальных озёр и областей мёртвого льда. Анализ подлёдной топографии показал, что на месте отступающих ледников Эльбруса в будущем в локальных депрессиях будут формироваться озёра (Лаврентьев и др., 2020). Отступающие ледники, покрытые моренным чехлом, оставят после себя области мёртвого льда, которые могут эти гляциальные озёра подпруживать. Потенциальные места образования озёр приведены в работах (Лаврентьев и др., 2020; Ледники и климат Эльбруса, 2020). Это ледники Большой Азау, Уллучиран, Терскол, Карачаул, Гарабаши, Бирджалы-Чиран и ледового плато Джикаугенкёз (табл. 2). Проведённые численные эксперименты позволили рассчитать время образования гляциальных озёр (см. табл. 2), а также оценить, будут ли образованные озёра подпружены участками мёртвого льда, что потенциально увеличит опасность их прорыва. Поскольку начало численных экспериментов соответствует модельному 1990 г., учитывается только тот объём льда, который отделился от ледников, активных на тот момент.

334



Рис. 5. Модельные конфигурации ледников Эльбруса при медианном сценарии изменения климата при разных характеристиках моренного чехла: $(a, \delta, e) - при h_{debris}^* = 115 \text{ см}; (e, \partial, e) - при h_{debris}^* = 44 \text{ см}. 1 - прогляциальные озёра; 2 – области мёртвого льда; 3 – толщина ледников (м) при моделировании без моренного блока; 4 – толщина ледников (м) при моделировании с трансформирующейся мореной$

Fig. 5. Modelled configurations of Mount Elbrus glaciers under the median climate change scenario for different properties of the debris cover: (a, δ, e) – for $h_{debris}^* = 115$ cm; (c, ∂, e) – for $h_{debris}^* = 44$ cm.: *1* – proglacial lakes; *2* – dead-ice areas, 3 – ice thickness (m) in debris-free mode; *4* – ice thickness (m) when modelling with transforming debris cover.

Время образования мёртвого льда зависит, в первую очередь, от климатического сценария. Чем большее потепление ожидается, тем раньше образуются новые области мёртвых льдов. Согласно прогнозу, в начале 2020-х годов должны были образоваться участки мёртвого льда на месте отступающего ледника Бирджалы-Чиран около переуглубления номер 5 (см. рис. 4, а). Этот прогноз подтверждён в работе (Докукин и др., 2022), где зафиксировано образование нового озера Юго-западное Бирджалы, подпруженное мёртвым льдом (см. рис. 1; табл. 2 в работе Докукин и др., 2022). В конце 2020-х годов небольшие участки мёртвого льда останутся на месте многих отступивших ледников – Уллучиран, Карачаул, Микелчиран, Уллукол, Гарабаши, причём суммарный объём этого льда не превысит 4×10^6 м³. В 2030-х годах при медианном сценарии области стагнирующего льда появятся на месте отступивших ледников Кюкюртлю (см. рис. 5, а), Большой Азау (см. рис. 5, б) и Ирик (см. рис. 4, δ), а плато Джикаугенкёз окажется

ЛЁДИСНЕГ №3 2024

разделённым на несколько частей (см. рис. 5, *a*), в результате чего быстро исчезнет в силу отсутствия притока льда из области аккумуляции. В момент отделения плато Джикаугенкёз от активного тела ледника может образоваться до 0.15 км³ мёртвого льда, толщиной до 60 м. Согласно прогнозу, на стаивание этого льда может уйти более 10 лет. В 2040-х годах образуется область мёртвого льда толщиной до 30 м на месте отступившего ледника Малый Азау (см. рис. 5, *в*).

Самое большое приледниковое озеро на Эльбрусе возникнет в 2030-х годах на месте ледника Большой Азау на высоте 3160 м над ур. моря в медианном сценарии, возможно, подпруженное областью мёртвого льда (см. рис. 4, δ). Приблизительно в 2030 г. Большой Азау начнёт разделяться на два ледника, и озеро будет формироваться между ними (см. рис. 4, δ). Следующее по величине озеро на леднике Большой Азау на высоте около 3400 м возникнет в 2060–2070 годах только при более тёплых климатических сценариях (SSP5–8.5, SSP3–7.0,

ПОСТНИКОВА и др.

Номер	Ледник	Координаты	Высота над ур. моря (м)	Объём (тыс. м ³)	Пери	Зоны				
озера					SSP1-	SSP1-	SSP2-	SSP3-	SSP5-	мертвого льда,
			1 /		1.9	2.6	4.5	7.0	8.5	толщина
1	Уллучиран	42.42542 с.ш. 43.40244 в.д.	3440	38	2020—2030 гг.				До 40 м	
2	Уллучиран	иран 42.42011 с.ш 43.39421 в.д.		135	2030—2040 гг.				—	
3	Уллучиран	42.42902 с.ш. 43.38855 в.д.	3603	69	_	_	_	2060- 2070	2050- 2060	—
4	Карачаул	42.44342 с.ш. 43.38804 в.д.	3810	54	_	_	_	2070- 2080	2070- 2080	-
5	Джикаугенкёз	42.52788 с.ш. 43.37469 в.д.	3315	2	2020-е гг.			До 80 м		
6	Джикаугенкёз	42.55226 с.ш. 43.37107 в.д.	3100	7355	2035—2045 гг.				До 60 м	
7	Джикаугенкёз	42.51884 с.ш. 43.36644 в.д.	3522	5	2040—2050 гг.					_
8	Джикаугенкёз	42,54575 с.ш. 43,35976 в.д.	3522	36	2030—2040 гг.					До 60 м
9	Джикаугенкёз	42.52878 с.ш. 43.35942 в.д.	3485	92	2030—2040 гг.				_	
10	Кюкюртлю	42.38634 с.ш. 43.35959 в.д.	3446	60	_	_	2080- 2090	2060- 2070	2050- 2060	До 80 м
11	Джикаугенкёз	42.51455 с.ш. 43.33936 в.д.	3774	263	_	_	_	2070– 2080	2060– 2070	—
12	Большой Азау	42.42799 с.ш. 43.34930 в.д.	5100	1217	До 2100 г. не будет образовано		ано	—		
14	Большой Азау	42.47959 с.ш. 43.31228 в.д.	3350	4522	_	_	2090– 2100	2070– 2080	2070– 2080	—
15	Большой Азау	42.40554 с.ш. 43.29565 в.д.	3379	5	_	_	2070– 2080	2070– 2080	2070– 2080	—
16	Большой Азау	42.40623 с.ш. 43.29240 в.д.	3372	2	_	_	2070– 2080	2070– 2080	2070– 2080	—
17	Большой Азау	42.42525 с.ш. 43.28434 в.д.	3150	9380	2030—2040 гг.			До 40 м		
18	Гарабаши	42.46862 с.ш. 43.31039 в.д.	3867	17	-	_	2080- 2090	2070- 2080	2060- 2070	_
19	Терскол	42.47959 с.ш. 43.31228 в.д.	3792	116	_	_	_	2070- 2080	2070- 2080	_

Таблица 2. Самые большие локальные депрессии ложа (Лаврентьев и др., 2020) **Table 2.** The largest overdeepenings identified in (Lavrentiev et al., 2020)

SSP2–4.5). «Долгоживущие» области мёртвого льда, по всей видимости, на леднике Большой Азау не сформируются, — согласно расчётам, произойдёт их стаивание в течение 2–5 лет.

Объём потенциального озера на месте ледового плато Джикаугенкёз (№ 6) был оценён в 7355 тыс. м³. Это озеро может начать формироваться в 2040-х годах независимо от климатического сценария. При этом приблизительно с 2035 г. в течение около 15 лет для всех сценариев, кроме SSP1–1.9, это озеро будет подпружено мёртвым льдом толщиной до 60 м (см. рис. 5, *a*). Соответственно, максимальная глубина озера в 40 м, предсказанная в работе (Лаврентьев и др., 2020), может быть значительно увеличена за счёт запруды, при отсутствии достаточно эффективных каналов стока. Предположительно, в период около 2035–2055 гг. в долине р. Малка ниже ледника Джикаугенкёз, вероятно, следует ожидать наибольшую опасность прорывных наводнений в XXI веке. В случае, если озеро сформируется непосредственно у фронта ледника, возможно, что вследствие механического разрушения фронта (откалывания айсбергов) ледник будет отступать быстрее, чем предсказано в модели.

При расчёте времени образования ледниковых озёр, которые находятся ниже 3500 м над ур. моря, основная неопределённость привносится гляциологической моделью, а выбор климатического сценария не так важен. Локальные депрессии ложа, находящиеся выше 3500 м, могут превратиться в озера после 2050 г., и основным источником неопределённости в этом случае является климатический сценарий, причём эта неопределённость со временем будет нарастать. Так, к 2060 г. в сценарии SSP1-2.6 ожидается образование пяти озёр на месте фронтальной части ледового плато Джикаугенкёз (№ 5-9), двух озёр на месте ледника Уллучиран (№1 и 2), и одного, № 17 – на месте Большого Азау. В сценарии SSP5-8.5 в 2060 г., в дополнение к перечисленным для SSP1-2.6, образуется озеро № 10 на месте ледника Кюкюртлю, а также № 3 у ледника Уллучиран. К 2070 г. сформируются озёра № 14-16 на Большом Азау и озеро № 18 на месте ледника Гарабаши. К 2080 г. возникнет озеро № 4 на месте ледника Карачаул и № 11 на месте ледника Ирик. Остальные депрессии останутся покрытыми льдом.

Опасность озера определяется не только его размером. Маленькие озёра также могут стать причиной катастрофических селей, поскольку после прорыва масса перемещаемого материала может накапливаться по мере продвижения селя ниже по течению (Докукин, Хаткутов, 2016; Liu et al., 2020).

ОБСУЖДЕНИЕ

Источники неопределённости прогнозов. Границы ледников. Поле скоростей ледников Эльбруса (Millan et al., 2022) позволяет говорить о том, что в целом границы между ледниками в инвентаризации RGI (RGI Consortium, 2017) соответствуют реальным (рис. 6, δ в первой части настоящей статьи). Однако границы некоторых ледников идентифцированы неточно, например, между ледниками Ирик и Ирикчат, а также в области аккумуляции ледников Чунгурчатчиран, Бирдждалы-Чиран, Микелчиран, Уллукол и Карачаул. Это влияет на оценку толщины ледников методом инверсии (Huss, Farinotti, 2012), которая показана на рис. 6, *а* (данные по состоянию на 2000 г.).

Входные данные толщины ледников. В главе 1 монографии (Ледники и климат Эльбруса, 2020) утверждается, что толщина ледников, представленная в (Farinotti et al., 2019), преувеличена в среднем на 8 м. Однако данные (Farinotti et al., 2019) были рассчитаны по состоянию на 2000 г., в то время как данные, на которые делается ссылка в монографии, были получены в 2017 г. (Kutuzov et al., 2019). При этом было рассчитано среднее понижение поверхности с 1997 по 2017 г. на 12.2±0.28 м. Таким образом, в среднем значения толщины в 2017 г. сопоставимы, хотя суммарный объём завышен. Возможны, разумеется, локальные расхождения (см. рис. 6, θ), например, в окрестностях вершины Эльбруса, где расположена область тонкого (около 8 м) льда (Kutuzov et al., 2019), в области древнего кратера (переуглубление номер 12, см. рис. 4), где был обнаружен лёд большой мощности (Kutuzov et al., 2019). Кроме того, на границах между некоторыми условно выделенными в RGI6.0 ледниками в



Рис. 6. Толщина ледников Эльбруса в 2017 году по данным радиозондирования (Kutuzov et al., 2019) (*a*); и исходя из результатов моделирования на основании данных (Huss, Farinotti, 2012, обновлено в 2019 г.) (*б*). Разница между (*б*) и (*a*). 1 - толщина льда (м); 2 - очертания ледников на 2000 год (RGI, 2017); 3 - разница в толщине (м) (*в*) **Fig. 6.** Thickness of Mount Elbrus glaciers in 2017 based on radio sounding data (Kutuzov et al., 2019) (*a*); аnd modeled results based on data from (Huss, Farinotti, 2012, updated in 2019) (*б*) Difference between (*б*) and (*a*). 1 - ice thickness (m); 2 - glacier outlines in 2000 (RGI, 2017); 3 - thickness difference (m). (*в*)

(Huss, Farinotti, 2012, обновлено авторами в 2019 г.) мощность льда занижена по сравнению с результатами измерений (см. рис. 6, в).

Сокращение объёма ледников. Самая очевидная проблема, возникающая при молелировании баланса массы ледников на склонах Эльбруса индексно-температурным методом, состоит в том, что на вход модель получает только температуру воздуха и количество осадков. При этом, для расчёта поверхностного баланса массы ледников Эльбруса очень важен учёт таких факторов, как экспозиция склонов, лавинное питание (ледник Кюкюртлю) и метелевый перенос (Золотарев, 2013; Kutuzov et al., 2019). Тем не менее, общие закономерности сокращения объёма ледников воспроизводятся в модели достаточно реалистично. Например, на северных склонах прогнозируется меньшее сокращение объёма, чем на южном, на леднике Кюкюртлю оно минимально, а максимально – на ледовом плато Джикаугенкёз. Сокращение объёма льда на Малом Азау примерно в два раза меньше, чем на Большом Азау, что соответствует наблюлениям. Таким образом, недостаток «физичности» модели в какой-то мере нивелируются процедурой калибровки параметра реакции ледника на изменение температуры (Постникова, Рыбак, 2021).

Дополнительным локальным источником неопределённости может быть отсутствие в модели описания ускоренного отступания фронтальных участков ледников, граничащих с образующимися гляциальными озёрами. В частности, подобная ситуация может сложиться в 2040—2050-х годах по мере деградации ледникового плато Джикаугенкёз.

Геометрия ледников в будущем. В рамках принятых в модели системных упрощений изменения ледников рассчитываются в в среднем по высотным поясам, то есть реальные трёхмерные объекты сводятся к одномерным. При этом, естественно, некоторые пространственные особенности эволюции ледников получаются упрощенными. Существует, однако, мнение (Huss, Hock, 2015; Van Tricht et al., 2023), согласно которому большее значение для достоверности результатов моделирования имеют корректные входные данные толшины ледников, нежели упрощения, принятые в динамическом и масс-балансовом блоках ГГМ. Например, в работе (Золотарев, 2013) прогноз динамики ледникового плато Джикаугенкёз был основан на старых оценках толщины льда (Оледенение Эльбруса, 1968), заниженных на порядок, поэтому вывод о том, что часть плато Джикаугенкёз до высоты 4000 м исчезнет к 2022 году, оказалось ошибочным. В нашем исследовании плато Джикаугенкёз может исчезнуть до высоты 4000 м над ур. моря лишь в сценарии SSP5-8.5 примерно к 2080 г. В то же время прогнозируемый нами объём оставшегося льда к концу века может быть несколько завышен, так как как измеренная толщина льда на Эльбрусе,

в частности в окрестностях вершины (Kutuzov et al., 2019), в некоторых областях примерно на 20–50 м меньше оценок (Huss, Farinotti, 2012, обновлено авторами в 2019 г.), о чём уже упоминалось выше (см. рис. 6, *в*). С другой стороны, объём льда в древнем кратере (на месте переуглубления номер 12, см. рис. 4) недооценён моделью (Huss, Farinotti, 2012) местами более чем 100 м, что может отчасти компенсировать суммарную недооценку объёма льда выше 4000 м над ур. моря.

Количественная оценка неопределённостей. Влияние неточностей, вносимых выбором тех или иных параметров гляциологической модели на прогноз было оценено методом Монте-Карло. Для настраиваемых параметров масс-балансового, динамического и моренного блока было задано априорное гауссово распределение со средним, соответствующим калибровочным значениям, и двойным стандартным отклонением в пределах 20%. Для каждого ледника случайным образом генерировались значения этих параметров в рамках соответствующих распрелелений. и лалее молелировалась эволюния ледников с 1990 до 2100 г. Этот процесс повторялся тысячу раз, таким образом были оценены неопределённости результатов, связанные с возможными ошибками в выборе параметров.

Вклад неопределённостей, связанных с выбором свободных параметров модели, по сравнению с неопределённостью климатического форсинга (климатический сценарий и климатическая модель), был оценен путём сравнения соответствующих стандартных отклонений прогнозных величин объёма льда на Эльбрусе (табл. 3). Если в 2030 г. вклад параметров гляциологической модели в общую неопределённость примерно равен вкладу климатической составляющей, то к 2100 г. роль неопределённости, связанной с климатическим форсингом, возрастает до 86% (см. табл. 3).

Образование гляциальных озёр на месте отступающих ледников. Прогноз образования новых озёр в углублениях ложа носит вероятностный характер из-за потенциального воздействия тех факторов, которые не представляется ни предусмотреть, ни, тем более, моделировать. Возможно, например, что в некоторых локальных депрессиях вода не будет накапливаться, если под отступающим ледником уже будут сформированы глубокие каналы стока талых вод. Новое озеро может быть занесено флювиогляциальными наносами, если в соответствующее углубление ложа был направлен канал подледникового стока (Панов, 1993). Заметим, однако, что метод идентификации будущих озёр, использованный в работе (Лаврентьев и др., 2020), успешно прошёл валидацию при прогнозировании места образования озёр в 2017 г., исходя из состояния ледников на 1957 г.: согласно расчёту гидравлического потенциала, было предсказано формирование всех озёр из предсказанных семи.

Год			2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Вклад параметров ГМ			40%	35%	29%	24%	19%	15%	14%
Вклад SSP и GCM			60%	65%	71%	76%	81%	85%	86%
Стандартное отклонение объёма	вследствие вариации параметров ГМ	0.60	0.59	0.53	0.45	0.41	0.36	0.31	0.29
льда (км ³)	вследствие неопределённости SSP и GCM	0.53	0.87	0.98	1.08	1.34	1.56	1.67	1.82

Таблица 3. Оценка неопределённостей прогноза в 2030–2100 гг. ГМ – гляциологическая модель. SSP и GCM – климатические сценарии и модели

Table 3. Uncertainty assessment in 2030-	2100 FM -	glacier model	SSP and GCM -	 climate scenarios an 	d models
--	-----------	---------------	---------------	--	----------

Характеристики моренного покрова. Свойства моренного покрова, определяющие скорость уменьшения таяния с ростом толщины моренного покрова (кривую Острёма) для каждого ледника Эльбруса, неизвестны. В то время как характеристики моренного покрова имеют ограниченное влияние на общий объём льда (см. часть 1 данной статьи), они могут оказывать значительное влияние на время сохранности мёртвых и стагнирующих льдов под мореной, положение фронта ледника и, соответственно, на прогноз времени образования и уровня опасности прогляциальных озёр. Как было описано в первой части настоящей статьи, форма кривой Острёма задаётся характерной толщиной морены h_{debris} , при которой таяние уменьшается на 37% от таяния чистого льда: чем меньше h_{debris} , тем эффективнее моренный покров изолирует находящийся под ним лёд. Так, при $h^* = 115$ см (таяние подавляется с ростом толщины морены медленнее) в модели мёртвые льды на месте плато Джикаугенкёз могут почти исчезнуть в 2040 г. (см. рис. 5, δ), в то время как при $h^* = 44$ см (быстрое уменьшение таяния с ростом толщины морены) модельная область мёртвого льда может сохраняться ещё два десятилетия, служа подпрудой для озера (см. рис. 5, $\partial - e$).

Сопоставление результатов с полученными в аналогичных исследованиях. Прогностические оценки оледенения Эльбруса, имеющиеся в литературе, крайне незначительны и носят отчасти фрагментарный характер. Некоторые прогностические оценки содержатся в работе (Золотарев, 2013). В ней, в частности, было предсказано, что к концу XXI века границы ледников Эльбруса стабилизируются на высоте 3300-3400 м над ур. моря, при этом оледенение приобретёт более симметричную форму (так как сократится в размерах ледовое плато Джикаугенкёз). Согласно нашим расчётам, высота фронтов в сценарии SSP2-4.5 будет больше 3600-3700 м над ур. моря, и контуры оледенения также будет более симметричными. Возможно, причина более оптимистичного прогноза в работе

Золотарева (2013) состоит в том, что автором предполагалась постоянная скорость среднегодового сокращения объёма оледенения (имеется в виду период 1957—1987 гг.), в то время как согласно нашим расчётам, эти скорости будет расти приблизительно до 2035 г. независимо от реализации того или иного климатического сценария (см. рис. 3, *в*).

При сравнении полученной нами конфигурации ледника Бирджалы-Чиран на 2025 г. с работой (Докукин и др., 2022) обнаруживается сходство (см. рис. 4, *a*): наличие мёртвых льдов, подпруживающих новообразованное озеро Юго-Западное Бирджалы (см. озеро № 14 на рис. 1 и табл. 2 в (Докукин и др., 2022)). В частности, согласно прогностическим расчётам, озеро № 5, формирование которого должно было произойти в начале 2020-х годов, перед ледником Бирджалы-Чиран, также подпружено мёртвым льдом под мореной (см. рис. 4, *a*).

Результаты наших прогностических расчётов могут быть сопоставлены с исследованием (Postnikova et al., 2023), где рассматривалось оледенение в бассейнах Терека и Кубани, и поступление моренного материала задавалось в области аккумуляции, в предположении, что основная часть обломков попадает на ледник со склонов, переносится в область абляции и вытаивает. Для ледников Эльбруса более корректно описание, представленное в настоящем исследовании: моренный материал вытаивает из толщи льда, где он накапливается вследствие донной экзарации. При отсутствии поступления обломочного материала в области аккумуляции распределение морены по языку ледника менее равномерно, то есть мощность морены при приближении к фронту зачастую резко возрастает по мере удаления от фронта. В этом случае при настройке модели для достижения соответствия данным средней толщины морены фронтальная часть морены должна быть больше, чем если бы моренный материал был распределён равномернее вдоль профиля ледника. В результате основное следствие смены источника поступления моренного

материала на поверхность ледника с коллювиального на экзарационный в модели — бо́льшая сохранность мёртвых льдов, так как на них приходится более мощный слой моренного покрова, чем установлено в (Postnikova et al., 2023). В сторический период с 1990 но 2020 г. расхождения с наблюдениями значительны: площадь оледенения не уменьшается, и равна

Прогноз изменения площади ледников в настоящем исследовании в целом близок к глобальным прогнозам из (Rounce et al., 2023) с 2050 по 2100 г., хотя последний предсказывает бо́льшие потери льда (рис. 7). В частности, это может быть связано с тем, что в указанной работе не учитывается динамика моренного покрова, и его толщина и площадь зафиксированы в модели по состоянию на 2008 г. В первой половине века различия в характере прогнозируемой эволюции оледенения гораздо больше. Так, переход от постепенного к быстрому сокращению площади ледников в (Rounce et al., 2023) происходит приблизительно

раньше, но более постепенно (см. рис. 7). В работе (Rounce et al., 2023) в исторический период с 1990 по 2020 г. расхождения с наблюдениями значительны: площадь оледенения не уменьшается, и равна примерно 105 км² (см. рис. 7). Несмотря на то, что в (Rounce et al., 2023) динамический блок, основанный на модели OGGM (Maussion et al., 2019). был откалиброван по тем же данным RGI6.0 и по тому же принципу, что и в нашей работе, модельная площадь ледников Эльбруса на 2000 г. отличается от инвентаризованной более чем на 10 км² (см. рис. 7). В работе площадь оледенения Эльбруса в 2000 г., согласно процедуре калибровки, соответствует инвентаризации RGI6.0. а в 2017 г. почти совпадает с измеренной из работы (Kutuzov et al., 2019). Таким образом, можно в очередной раз слелать вывол. что в краткосрочной перспективе



Рис. 7. Сравнение изменения площади оледенения Эльбруса в XXI веке по разным сценариям с результатами для тех же ледников Эльбруса, при использовании тех же калибровочных данных RGI6.0 из (Rounce et al., 2023; https://nsidc.org/data/hma2_ggp/versions/1). *1* – значения площади ледников, представленные в работе (Kutuzov et al., 2019) для 1997 и 2017 г., *2*– площадь ледников согласно инвентаризации RGI6.0 в 2000 г.

Fig. 7. Comparison of Mount Elbrus glacier area changes with results from (Rounce et al., 2023). I – glacier area values presented in the study (Kutuzov et al., 2019) for 1997 and 2017, 2 – glacier area according to the RGI6.0 inventory in 2000

глобальные оценки, такие как (Rounce et al., 2023), не могут заменить более точных региональных исследований, в то время как в долгосрочных прогнозах (на конец века) значительные преимущества последних неочевидны.

Тот факт, что неопределённость долгосрочного прогноза, связанная с климатическим сценарием, гораздо больше, чем неопределённость, связанная с упрощениями физических процессов, принятыми в модели, был установлен ранее (Marzeion et al., 2020). При прогнозировании положения фронтов ледников на ближайшие 30 лет верно обратное: трёхмерное моделирование с использованием приближений более высокого порядка нежели аппроксимация мелкого льда (shallow-ice approximation) и учёт трансформирующегося моренного чехла могут значительно улучшить прогноз изменений оледенения Эльбруса. После 2050 г. более совершенный метод моделирования, скорее всего, не внесёт значительных улучшений в прогнозы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании рассмотрены вероятные сценарии изменения оледенения Эльбруса в XXI веке, при этом уделено особое внимание явлениям, сопровождающим деградацию оледенения, таким как образование прогляциальных озёр и областей «мёртвого» льда, погребённого под мореной, что имеет значение для прогноза наводнений и селей, связанных с прорывом ледниковых озёр. Использованы прогнозы будущего климата, основанные на сценариях SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5. Динамика оледенения была реконструирована на модели течения ледников вдоль осевой линии GloGEMflow (Zekollari et al., 2019), обновлённой за счёт включения блока, отвечающего за описание динамики моренного покрова (Postnikova et al., 2023). Адаптация модели для Эльбруса предполагала переход от коллювиальных (например, склоновая эрозия) к экзарационным (взбрасывание донной морены по плоскостям сдвига) источникам моренного покрова, что соответствует геологическим особенностям региона.

Согласно расчётам, сокращение массы ледников Эльбруса в 2020–2040 гг. в два раза превысит темпы 2000–2020 гг., однако после 2035–2040 гг. ледники могут перейти к стационарному состоянию или начать терять массу медленнее. Ледники могут достичь равновесия с климатическими условиями до 2060 г. при реализации сценариев с наименьшим повышением температуры SSP1–1.9 и SSP1– 2.6. При этом положение фронтов ледников, вероятно, стабилизируется на высоте около 3600–3700 м над ур. моря. Ледники Эльбруса отступят на 200– 300 м выше в 2060 г. в сценарии SSP5–8.5 по сравнению со сценарием SSP1–2.6. К 2100 г. эта разница увеличивается до 500–1000 м (в зависимости от экспозиции). За пределами Эльбруса ледники Северного Кавказа почти полностью исчезнут в сценарии SSP5–8.5. Останутся лишь фрагментарные участки льда выше 4500 м.

При моделировании ледников с учётом эволюшионирующей морены до 2070 г. ожидается замедление отступания некоторых больших ледников, например, Дыхсу, Айлама, Безенги. Моренный покров на ледниках Эльбруса, таких как Джикаугенкёз, Кюкюртлю, Большой и Малый Азау будет способствовать сохранению мёртвых льдов под ним. Однако в региональном масштабе такая разница не будет играть большой роли. Таким образом, роль моренного покрова в замедлении отступания ледников будет носить лишь временный и локальный характер. Тем не менее, учёт эволюции моренного покрова важен с точки зрения прогнозирования локаций погребённого под мореной стагнирующего льда, которые могут служить подпрудой для потенциально опасных гляциальных озёр, при отсутствии достаточно эффективных каналов стока.

Согласно прогностическим расчётам, в первую очередь, в 2020-х годах образуются несколько озёр на месте ледника Бирджалы-Чиран, которые, вероятно, будут подпружены погребёнными льдами, что в качественном плане соответствует наблюдениям (Докукин и др., 2022). Крупнейшие прогляциальные озёра на месте ледников Большой Азау и плато Джикаугенкёз могут образоваться в переуглублениях ниже 3500 м над ур. моря к 2040 г., вне зависимости от климатического сценария. Самое большое озеро на месте плато Джикаугенкёз, вероятно, будет подпружено обширной областью покрытого мореной мёртвого льда в 2030-2040-х годах, причём толщина мёртвого льда может достичь 60 м. Согласно расчётам, ледниковое плато Джикиуганкёз примерно в этот период может граничить с сформировавшимся приледниковым озером, и сопутствующее этому айсбергообразование может ускорить процесс отступания ледника.

К концу века, в случае умеренного потепления (сценарий SSP1–2.6), на месте отступивших ледников возможно образование до восьми озёр. При этом на Эльбрусе возможно образование по крайней мере семнадцати новых озёр, положение которых было идентифицировано ранее в (Лаврентьев и др., 2020). Информация о вероятных местах образования озёр и областей стагнирующего льда, покрытых мореной, необходима для внедрения эффективных систем раннего предупреждения и разработки соответствующих мер по смягчению последствий прорыва и для минимизации потенциального воздействия на населённые пункты и инфраструктуру регионов, расположенных ниже по течению. **Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта 23-27-00050. Авторы выражают искреннюю признательность С.С. Кутузову (Институт географии РАН) за предоставленные данные по конфигурации и толщине ледников Эльбруса.

Acknowledgements. This work was supported by the Russian Science Foundation, grant 23-27-00050. The authors express sincere gratitude to S.S Kutuzov (Institute of Geography of RAS) for providing data on configuration and thickness of Elbrus glaciers.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Докукин М.Д., Хаткутов А.В. Озёра у ледника Малый Азау на Эльбрусе: динамика и прорывы // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 4. С. 472–479. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-472-479
- Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Беккиев М.Ю., Калов Р.Х., Хаткутов А.В. Эволюция озёр у ледника Джикиуганкез (Северное Приэльбрусье) в 1957–2020 гг. с учётом подземных каналов стока // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 47–62. https://doi.org/10.31857/S2076673422010115
- Лаврентьев И.И., Петраков Д.А., Кутузов С.С., Коваленко Н.В., Смирнов А.М. Оценка потенциала развития ледниковых озёр на Центральном Кавказе // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 3. 343–360. https://doi.org/10.31857/S2076673420030044
- Ледники и климат Эльбруса. Отв. ред. В.Н. Михаленко. М., СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.
- Оледенение Эльбруса. Под ред. Г.К. Тушинского. Изд-во Московского университета, 1968. 346 с.
- Панов В.Д. Эволюция современного оледенения Кавказа. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 432 с.
- Постникова Т.Н., Рыбак О.О. Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования эволюции ледников. Часть 1. Общий подход и архитектура моделей // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 4. С. 620–636. https://doi.org/10.31857/S2076673421040111

Семенов С.М., Гладильщикова А.А. Сценарии антропогенных изменений климатической системы в XXI веке // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. № 1. С. 75–106. https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-75-1-106

Hock R. Temperature index melt modelling in mountain areas // Journ. of Hydrology. 2003. V. 282. № 1–4. P. 104–115.

https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9

Huss M., Farinotti D. Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe // Journ. of Geophys. Research: Earth Surface. 2012. V. 117. № F4. https://doi.org/10.1029/2012JF002523

- Huss M., Hock R. A new model for global glacier change and sea-level rise // Frontiers in Earth Science. 2015. V. 3. P. 54. https://doi.org/10.3389/feart.2015.00054
- Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017 // Frontiers in Earth Science. 2019. V. 7. № 153. https://doi.org/10.3389/feart.2019.00153
- Liu M., Chen N., Zhang Y., Deng M. Glacial Lake Inventory and Lake Outburst Flood / Debris Flow Hazard Assessment after the Gorkha Earthquake in the Bhote Koshi Basin // Water. 2020. V. 12. P. 464. https://doi.org/10.3390/w12020464
- Maussion F., Butenko A., Champollion N., Dusch M., Eis J., Fourteau K., Gregor P., Jarosch A.H., Landmann J., Oesterle F., Recinos B., Rothenpieler T., Vlug A., Wild C.T., Marzeion B. The Open Global Glacier Model (OGGM) v. 1.1 // Geoscientific Model Development. 2019. V. 12. P. 909–931. https://doi.org/10.5194/gmd-12-909-2019
- Marzeion B., Hock R., Anderson B., Bliss A., Champollion N., Fujita K., Huss M., Immerzeel W.W., Kraaijenbrink P., Malles J.-H., Maussion F, Radić V., Rounce D.R., Sakai A., Shannon S., van de Wal R., Zekollari H. Partitioning the Uncertainty of Ensemble Projections of Global Glacier Mass Change. Earth's Future. 2020, 8 (7). e2019EF001470
- Millan R., Mouginot J., Rabatel A., Morlighem M. Ice velocity and thickness of the world's glaciers // Nature Geoscience. 2022. V. 15. № 2. P. 124–129. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00885-z
- Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M. Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciation in the 21st century // Frontiers in Earth Science. 2023. V. 11. 22 p. https://doi.org/10.3389/feart.2023.1256696
- *RGI Consortium*. Randolph Glacier Inventory (RGI) A dataset of global glacier outlines: Version 6.0. Technical Report. Global Land Ice Measurements from Space, Boulder, Colorado, USA. 2017. https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60
- Rounce D.R., Hock R., Maussion F., Hugonnet R., Kochtitzky W., Huss M., Berthier E., Brinkerhoff D.J., Compagno L., Copland L., Farinotti D., Menounos B., McNabb R. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters // Science. 2023. V. 379. № 6627. P. 78–83. https://doi.org/10.1126/science.abo1324
- Van Tricht L., Zekollari H., Huss M., Farinotti D., Huybrechts P. Global vs local glacier modelling: a comparison in the Tien Shan // The Cryosphere Discuss. 2023. C. 1–25. https://doi.org/10.5194/tc-2023-87
- Zekollari H., Huss M., Farinotti D. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble // The Cryosphere. 2019. V. 13. P. 1125–1146. https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019

Citation: *Postnikova T.N., Rybak O.O., Gubanov A.S., Zekollari H., Huss M.* Mathematical modeling of Elbrus glaciers in the 21st century. Part 2. Forecasting glacier evolution and lake formation under various SSP scenarios. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2024, 64 (3): 326–344. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424030021

Mathematical modeling of Elbrus glaciers in the 21st century. Part 2. Forecasting glacier evolution and lake formation under various SSP scenarios

T. N. Postnikova^{a,d*}, O. O. Rybak^{a,b,c}, A. S. Gubanov^d, H. Zekollari^e, M. Huss^{f,g,h}

^aWater Problems Institute of RAS, Moscow, Russia

^bInstitute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia

^cEarth System Science and Depertement Geografie, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium

^dDepartment of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^eDepartment of Water and Climate, Faculty of Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium

^fLaboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich, Zürich, Switzerland

^gSwiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmensdorf, Switzerland

^hDepartment of Geosciences, University of Fribourg, ribourg, Switzerland

*e-mail: tasinidze@gmail.com

Received January 16, 2024 / Revised June 4, 2024 / Accepted July 8, 2024

Probable scenarios of future changes in the Elbrus glaciers and associated with them phenomena such as formation of glacial lakes and remaining ice masses buried under the debris cover are considered. The SSP scenarios (SSP1–1.9, SSP1–2.6, SSP2–4.5, SSP3–7.0, SSP5–8.5) were used for of future climate forcing. Glacier dynamics was simulated using the GloGEM flow model, which was improved by including a module of evolving debris cover. According to the prognostic calculations of the surface mass balance of the glaciers, the loss of ice mass on the Elbrus will accelerate until the end of the 2030s, reaching approximately -1.1 ± 0.3 m w. e. yr.⁻¹. The volume of the glacier ice is expected to be reducing almost linearly until about 2040, after which the mass loss rate will slow down. Under the warmest climate change scenarios (SSP5-8.5, SSP3-7.0), almost all of the remaining ice masses in the North Caucasus will be concentrated on Elbrus by the end of the century. At the same time, by 2100 the glaciers of Elbrus themselves will retreat up to 4000 m above sea level and higher. In case of moderate warming (SSP1-1.9, SSP1-2.6) the position of glacier fronts may be stabilized at an altitude of 3600-3700 m. The study concerns also the dynamics of the debris cover, predicting its doubling in area and average thickness of 0.22 m by 2040. Although the effect of the debris cover on the total volume of ice on Elbrus is estimated to be minimal, it can temporarily slow down melting of the frontal parts and areas of dead (remaining) ice. According to our estimates, the retreat of the Elbrus glaciers may result in formation of up to 17 new lakes, of which six may potentially be temporarily dammed by dead (remaining) ice zones (up to 60 m thick for Djikaugenkioz). It is expected that the largest lake may be formed on the Djikaugenkioz plateau, it will be dammed by moraine with ice buried under it in the period from 2035 to 2045 if no sufficiently efficient runoff channels will appear. The approximate time and place of formation of such ice masses near the sites of lake formation, depending on the climatic scenario, are shown in the paper, since it is important from the point of view of the risk of outburst floods in the 21st century. Under moderate warming (scenario SSP1-2.6), up to 8 lakes are likely to be formed at the site of retreating glaciers Ulluchiran, Djikaugenkioz, and Bolshoy Azau. All of them may appear in the first half of the century, regardless of the climatic scenario.

Keywords: mountain glaciers, numerical model, glacier modeling, numerical experiments, climate change, climate predictions, CMIP6, Elbrus, glacial lake

REFERENCES

Dokukin M.D., Khatkutov A.V. Lakes near the Maliy Azau on Elbrus: dynamics and breakthroughs. Led I Sneg. Snow and Ice. 2016, 56 (4): 472–479. [In Russian]. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-4-472-479 Dokukin M.D., Savernyuk E.A., Bekkiev M.Yu., Kalov R.Kh., Khatkutov A.V. Evolution of lakes near the Djikaugenkioz glacier (Northern Elbrus area) in 1957–2020 with consideration of underground flow channels. *Led i* Sneg. Ice and Snow. 2022, 62 (1): 47–62. [In Russian]. https://doi.org/10.31857/S2076673422010115

ЛЁДИСНЕГ №3 2024

- Lavrentyev I.I., Petrakov D.A., Kutuzov S.S., Kovalenko N.V., Smirnov A.M. Assessment of glacial lake development potential in the Central Caucasus. Led i Sneg. Ice and Snow. 2020, 60 (3): 343–360. [In Russian]. https://doi.org/10.31857/S2076673420030044
- *Ledniki i klimat Elbrusa*. Glaciers and climate of Elbrus. Ed. by V.N. Mikhalenko. Moscow, Saint-Petersburg: Nestor-History, 2020: 372 p. [In Russian].
- *Oledenenie Elbrusa*. Elbrus glaciation. Ed. by G.K. Tushinskiy. Moscow University Press, 1968: 346 p. [In Russian].
- Panov V.D. Evolutziya sovremennogo oledeneniya Kavkaza. Evolution of the modern glaciation of the Caucasus. Saint-Petersburg: Hydrometeoizdat, 1993: 432 p.
- Postnikova T.N., Rybak O.O. Global glaciological models: a new stage in the development of methods for predicting glacier evolution. Part 1. General approach and model architecture. Led i Sneg. Ice and Snow. 2021, 61 (4): 620–636. [In Russian]. https://doi.org/10.31857/ S2076673421040111
- Semenov S.M., Gladilschikova A.A. Scenarios of anthropogenic changes in the climate system in the 21st century. Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya. Fundamental and Applied Climatology. 2022, 1: 75–106. https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-1-75-1-106
- *Hock R.* Temperature index melt modelling in mountain areas. Journ. of Hydrology. 2003, 282 (1–4): 104–115. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9
- *Huss M., Farinotti D.* Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. Journ. of Geophysical Research: Earth Surface. 2012, 117 (F4). https://doi. org/10.1029/2012JF002523
- *Huss M., Hock R.* A new model for global glacier change and sea–level rise. Frontiers in Earth Science. 2015, 3: 54. https://doi.org/10.3389/feart.2015.00054
- Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., Petrakov D. Volume changes of Elbrus glaciers from 1997 to 2017. Frontiers in Earth Science. 2019, 7 (153). https:// doi.org/10.3389/feart.2019.00153
- Liu M., Chen N., Zhang Y., Deng M. Glacial Lake Inventory and Lake Outburst Flood / Debris Flow Hazard Assessment after the Gorkha Earthquake in the Bhote Koshi Basin. Water. 2020, 12: 464. https://doi. org/10.3390/w12020464

- Maussion F., Butenko A., Champollion N., Dusch M., Eis J., Fourteau K., Gregor P., Jarosch A.H., Landmann J., Oesterle F., Recinos B., Rothenpieler T., Vlug A., Wild C.T., Marzeion B. The Open Global Glacier Model (OGGM) v1.1. Geoscientific Model Development. 2019, 12: 909–931. https://doi.org/10.5194/ gmd-12-909-2019
- Marzeion B., Hock R., Anderson B., Bliss A., Champollion N., Fujita K., Huss M., Immerzeel W.W., Kraaijenbrink P., Malles J.-H., Maussion F, Radić V., Rounce D. R., Sakai A., Shannon S., van de Wal R., Zekollari H. Partitioning the Uncertainty of Ensemble Projections of Global Glacier Mass Change. Earth's Future. 2020, 8 (7): e2019EF001470
- Millan R., Mouginot J., Rabatel A., Morlighem M. Ice velocity and thickness of the world's glaciers. Nature Geoscience. 2022, 15 (2): 124–129. https:// doi.org/10.1038/s41561-021-00885-z
- Postnikova T., Rybak O., Gubanov A., Zekollari H., Huss M., Shahgedanova M. Debris cover effect on the evolution of Northern Caucasus glaciation in the 21st century. Frontiers in Earth Science. 2023, 11: 22. https://doi. org/10.3389/feart.2023.1256696
- RGI Consortium. Randolph Glacier Inventory (RGI) A dataset of global glacier outlines: Version 6.0. Technical Report. Global Land Ice Measurements from Space, Boulder, Colorado, USA. 2017. https://doi. org/10.7265/N5-RGI-60
- Rounce D.R., Hock R., Maussion F., Hugonnet R., Kochtitzky W., Huss M., Berthier E., Brinkerhoff D.J., Compagno L., Copland L., Farinotti D., Menounos B., Mc-Nabb R. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. Science. 2023, 379 (6627): 78–83. https://doi.org/10.1126/science. abo1324
- Van Tricht L., Zekollari H., Huss M., Farinotti D., Huybrechts P. Global vs local glacier modelling: a comparison in the Tien Shan. The Cryosphere Discussions. 2023: 1–25.
- Zekollari H., Huss M., Farinotti D. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. The Cryosphere. 2019, 13: 1125–1146. https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019