

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ПОСТНИКОВА ТАИСИЯ НИКОЛАЕВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ГОРНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ
СЕВЕРНОГО КАВКАЗА В XXI ВЕКЕ**

1.6.8 – Гляциология и криология Земли

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** — **Поповнин Виктор Владимирович** — кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
- Официальные оппоненты** — **Михаленко Владимир Николаевич** — доктор географических наук, главный научный сотрудник отдела гляциологии Института географии РАН
- Попов Сергей Викторович** — доктор геолого-минералогических наук, доцент кафедры гидрологии суши института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета
-
- Докукин Михаил Дмитриевич** — кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник отдела стихийных явлений Высокогорного геофизического института
-

Защита диссертации состоится «16» ноября 2023 г. в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.4 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, Географический факультет, 21 этаж, ауд. 2109.

E-mail: dissovet.geogr.msu@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.4/2668>

Автореферат разослан «05» октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат географических наук

Е.Ю. Матлахова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В предгорьях Северного Кавказа ожидаемые изменения состояния ледников играют важную роль в снабжении региона пресной водой, поскольку сезонные колебания режима стока местных рек зависят от поступления талых ледниковых вод. Рост населения и экономическое развитие в этом регионе требуют долгосрочных оценок возможных изменений в состоянии горного оледенения и, соответственно, наличия водных ресурсов. Актуальность этих оценок очевидна, поскольку они необходимы для эффективного планирования мероприятий по смягчению социально-экономических последствий экологических и климатических изменений. На Кавказе в целом более 15% общей площади ледников покрыто моренным материалом (Stokes et al., 2006; Herreid, Pellicciotti, 2020; Rounce et al., 2021), при этом доля ледниковой площади, покрытой мореной, на настоящий момент растет при общем отступании ледников (Поповнин, Розова, 2005; Поповнин и др., 2015; Tielidze et al., 2020). Прогноз дальнейшей динамики моренного покрова важен по нескольким причинам: во-первых, слой морены толщиной более 5-7 см на леднике задерживает его таяние (Поповнин и др., 2015); во-вторых, под моренным покровом возможно сохранение областей мёртвого льда, оставшегося после отступления ледника и могущих служить основой для образования новых селевых котлов (Benn et al., 2012; Shugar et al., 2020; Rounce et al., 2021). В связи с этим актуальна оценка влияния моренного покрова на изменения оледенения на Северном Кавказе и прогноз вероятного образования погребенных мёртвых льдов и новых прогляциальных озёр. Информация о вероятных местах образования озёр и областей стагнирующего льда, покрытых мореной, необходима для выявления потенциальных селевых котлов и прогноза прорывных наводнений. Такие оценки требуются для внедрения эффективных систем раннего предупреждения и разработки соответствующих мер по смягчению последствий для минимизации потенциального воздействия на населенные пункты и инфраструктуру, расположенные ниже по течению.

Целью работы является оценка текущих и прогнозных изменений параметров горного оледенения Северного Кавказа под воздействием разных климатических сценариев из проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project — Проект межмодельного сравнения взаимодействующих компонент климата): SSP119, SSP126, SSP245, SSP370, SSP585 (Shared Socioeconomic Pathways; O'Neill et al., 2014; Eyring et al., 2016). В связи с этим, этот фокус работы – оценка роли, которую предположительно будет играть моренный покров в эволюции горного оледенения Северного Кавказа в течение XXI века. Таким образом, данное исследование призвано ответить на следующие вопросы:

- 1) как различаются прогнозы эволюции ледников, полученные в численных экспериментах с меняющимся во времени моренным покровом и без него?
- 2) как будет эволюционировать моренный покров (площадь, мощность) в XXI веке?
- 3) отличаются ли прогнозируемые пространственные характеристики ледников и моренного покрова при различных сценариях изменения климата?
- 4) различаются ли и насколько существенно прогнозы для ледников в бассейнах Терека и Кубани?

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- 1) обобщение и анализ методов глобального гляциологического моделирования;
- 2) инициализация модели GloGEMflow для ледников Северного Кавказа путем настройки динамического и масс-балансового блоков;

- 3) внедрение блока эволюции морены в модель GloGEMflow, создание калибровочной схемы для ее параметров;
- 4) установление закономерностей влияния моренного покрова на эволюцию ледников Северного Кавказа;
- 5) прогноз (до 2100 года) эволюции ледников и моренного покрова с использованием климатических сценариев из СМIP6.

Объектом исследования являются ледники бассейнов рек Терек и Кубань (Северный Кавказ, Россия). **Предметом** исследования в работе является роль моренного покрова в эволюции ледников на региональном уровне в XXI веке, а также различные методы моделирования ледников.

Фактический материал, личный вклад автора. На начальном этапе исследования проводился литературный обзор по методам гляциологического моделирования, применяемых на региональном и глобальном уровне. Это позволило выбрать методы моделирования, инициализации модели, ее калибровки и валидации для численных экспериментов, проведенных с целью улучшения понимания взаимосвязей, существующих между климатом, оледенением и накоплением моренного покрова на Северном Кавказе. После этого автором были собраны данные для всех ледников бассейнов Терека и Кубани, требуемые для проведения намеченных экспериментов: контуры ледников и моренного покрова на них на 2001 и 2018 год (RGI Consortium, 2017), толщина (Huss, Farinotti, 2012; Farinotti et al., 2019, Kutuzov et al., 2019) и скорость течения (Millan et al., 2022) ледников, толщина моренного покрова (Rounce et al., 2021); данные температуры и осадков с метеостанций на Кавказе, данные re-анализа ERA-5 (Hersbach et al., 2019) и прогнозные климатические данные СМIP6 (Eyring et al., 2016). Автор лично инициализировал модель GloGEMflow (Zekollari et al., 2019) для условий Северного Кавказа, что в частности потребовало написания вспомогательной программы для приведения имеющихся данных к усредненным по высотным поясам для моделирования ледников и моренного покрова вдоль осевой линии. Автор внедрил в модель GloGEMflow блок эволюции моренного покрова, основанный на предыдущих исследованиях (Anderson, Anderson, 2016; Verhaegen et al., 2020), никогда ранее не применявшийся на региональном уровне. Автор работы лично разработал калибровочную схему для параметров моренного блока. Настройка динамического блока осуществлялась по данным геометрии ледников из архива RGI 6.0 и толщины ледников из Farinotti et al. (2019), а калибровка моренного блока – по нанесенным на карту очертаниям моренного покрова на дату инвентаризации (2001 год) и по новым данным толщины моренного покрова (Rounce et al., 2021). Автор работы лично провел эксперименты по моделированию эволюции горного оледенения Северного Кавказа на модели GloGEMflow и осуществил валидацию и эксперименты на чувствительность модели к различным параметрам моренного блока. Автор провел расчеты изменения параметров ледников и поверхностной морены с 1990 до 2100 гг. для разных климатических сценариев и проанализировал взаимное влияние эволюции моренного покрова и параметров ледников. Расчеты времени возможного образования прогляциальных озер на Эльбрусе были проведены лично автором диссертации с опорой на работы коллег (Kutuzov et al., 2019; Лаврентьев и др., 2020).

Методика и методология. В методологическом плане основная часть диссертации представляет собой работу по математическому моделированию, которая традиционно включает в себя сбор данных (характеристики климатических условий, ледников и моренного покрова), создание необходимых модулей модели, инициализацию, калибровку,

валидацию модельных результатов на реальных данных, проведение разных численных экспериментов с помощью готовой модели.

В работе была взята за основу модель GloGEMflow (Zekollari et al., 2019), предоставленная Харри Зеколлари и написанная на MatLab; модель динамики моренного покрова для ледника Джанкуат (Verhaegen et al., 2020); картографические данные распространения ледников RGI 6.0 (RGI Consortium, 2017); данные гипсометрии ледников (Huss, Farinotti, 2012); карта распространения моренного покрова на Северном Кавказе, предоставленная А.С. Губановым; данные толщины моренного покрова из работы Rounce et al. (2021); климатические сценарии SSP из CMIP6, а также полевые наблюдения на леднике Джанкуат (Bozhinsky et al., 1986; Popovnin et al., 2015).

Основные защищаемые положения

1. Усовершенствована модель динамики ледников с учетом эволюции моренного покрова, которая применима на региональном уровне. Прогностический потенциал модели включает в себя возможность оценивать пространственные и динамические характеристики ледников, мощность и площадь поверхностной морены, толщину и объем погребенного под мореной мёртвого льда, а также, косвенно, время и место образования прогляциальных озер и изменение ледникового стока.
2. В соответствии с разработанным прогнозом, моренный покров будет временно задерживать потерю массы льда в ближайшие 20-50 лет, особенно в масштабах крупных долинных ледников. Несмотря на изолирующий эффект моренного покрова, он окажет незначительное влияние на общий объем льда и количество исчезнувших ледников на Северном Кавказе к концу XXI века.
3. Прогнозируемый объем льда в бассейне Кубани будет убывать в два раза быстрее, чем в бассейне Терека примерно до 2040 года. При климатическом сценарии с самым большим повышением температуры (SSP5-8.5) к концу XXI века, произойдет почти полная дегляциация Северного Кавказа. Лишь при умеренном потеплении (сценарии SSP1-2.6, SSP1-1.9) ледники, в соответствии с прогностическими расчетами, достигнут равновесия с климатом до конца века.
4. В соответствии с прогностическими расчетами, при климатических сценариях с наибольшим повышением температуры SSP5-8.5, SSP3-7.0, в 2100 году на Эльбрусе будет сосредоточено до 84% оставшегося льда в бассейне Терека, и до 98% оставшегося льда в бассейне Кубани. На Эльбрусе, при благоприятных геоморфологических обстоятельствах, будет образовано до 17 новых прогляциальных озер.
5. Динамика пространственных характеристик моренного покрова (его средняя мощность) на активных ледниках носит нелинейный характер в течение XXI века. До 2035 года, мощность морены на ледниках будет продолжать расти в среднем по Северному Кавказу, в то время как ледники будут постепенно истончаться при ограниченном отступании фронтов. После 2035 года (в среднем по исследуемому региону) будет происходить синхронное скачкообразное уменьшение длины долинных ледников и постепенное убывание средней толщины покрывающей их морены.
6. В период между 2030 и 2040 годами, прогнозируется формирование максимального объема мёртвого льда в целом по региону. В 2050-2070 гг. в зависимости от сценария, прогнозируется достижение второго максимума объема мёртвого льда, величина которого меньше первого.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны расчетный алгоритм и программный код для описания эволюции покрытых мореной ледников, включающий поступление, перенос и вытаивание моренного материала, работающий на региональном уровне.
2. Впервые спрогнозирована эволюция параметров ледников и моренного чехла в бассейнах Терека и Кубани до 2100 года при реализации различных климатических сценариев - от умеренного до экстремального.
3. Количественно охарактеризованы тенденции в динамике эволюции ледников бассейнов Терека и Кубани.
4. Впервые спрогнозировано время образования потенциально опасных прогляциальных озер на Эльбрусе.

Степень достоверности полученных результатов обуславливается использованием апробированных математических моделей, картографических методов и аппарата статистического анализа. Полученная в численных экспериментах площадь и мощность моренного покрова показывает высокую степень соответствия доступным полевым и спутниковым данным (около 66%). Следует отметить, что исследование, являясь региональным, накладывает ограничения на допустимую сложность используемых моделей, а также требует большого количества входных данных, содержащих ошибки. Достоверность результатов исследования подтверждается сравнением с результатами связанных работ, обсуждениями и докладами на международных и всероссийских конференциях, а также публикациями в рецензируемых научных изданиях.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Взаимное влияние баланса массы, динамики ледника и моренного покрова на нем еще недостаточно изучено и представляет интерес с теоретической точки зрения. С практической точки зрения, прогноз пространственных характеристик ледников, полученный в диссертационной работе, важен для стратегического планирования водного хозяйства в регионе. В частности, размеры ледников необходимы в качестве входных параметров в гидрологические модели для предсказания периодов максимального и минимального стока, а также в качестве одного из параметров для оценки вероятности образования и прорыва прогляциальных озер.

Апробация работы. Промежуточные результаты работы, а также основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международной конференции Европейского союза наук о Земле — European Geosciences Union General Assembly (Вена, 2019, 2020, 2021 и 2023 гг.), на Всероссийских открытых Армандовских чтениях (Муром, 2020); на Международной горной конференции — International Mountain Conference (Иннсбрук, 2022 г.), 26-й конференции по альпийской гляциологии — 26th Alpine Glaciology Meeting (Цюрих, 2023 г.), на международной конференции Союза геодезии и геофизики — International Union of Geodesy and Geophysics (Берлин, 2023 г.), дважды на семинаре Отдела гляциологии Института географии РАН, а также на семинаре лаборатории глобальной гидрологии Института водных проблем РАН.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 4 статей в рецензируемых изданиях (журналах), индексируемые в Scopus, WoS - Web of Science Core Collection и RSCI, 10 тезисов докладов в материалах всероссийских и международных конференций.

Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим. Автор принимал активное участие в постановке научных задач, проведении численных

экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов, предоставлении их в печать. Автором была проведена основная работа над текстом статей, а также представление их в редакции журналов и переписка с редакторами и рецензентами.

В диссертационное исследование включены опубликованные ранее результаты (Постникова, Рыбак, 2021; Постникова, Рыбак, 2022; Юшкова О.В., Дымова (Постникова) Т.Н., 2020), в текст диссертации (главы 2, 3) включены разделы, касающиеся методики исследования, соответствующие разделы публикаций полностью писались автором.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из Введения, шести глав, Заключения, списка литературы. Материал работы изложен на 156 страницах машинописного текста, содержит 7 таблиц, 57 иллюстраций. Список литературы содержит 239 наименований, в том числе 200 – на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.г.н. В.В. Поповнину за всестороннюю помощь при проведении исследований и написании работы. Автор благодарит д.ф.-м.н. О.О. Рыбака за консультации по выполнению работы. Автор благодарен Х. Зеколлари (H. Zekollary) и М. Хуссу (M. Huss) (Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich) за предоставление модели GloGEMflow и необходимых входных данных для ее запуска. Автор также выражает благодарность к.г.н. А.Ф. Глазовскому, к.г.н. С.А. Сократову, д.г.н. Бредихину, к.г.н. А.С. Турчаниновой, коллективу кафедры криолитологии и гляциологии МГУ им. Ломоносова и отдела гляциологии ИГ РАН за помощь, поддержку и консультации в процессе проведения исследований и написании работы. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90042 и 21-55-10003, а также РНФ в рамках проектов № 22-17-00133 и № 23-27-00050.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, изложена научная новизна, показана практическая значимость работы.

Глава 1. Краткая физико-географическая характеристика Северного Кавказа

В первой главе дается краткая физико-географическая характеристика Северного Кавказа и в качестве объекта работы выбираются бассейны рек Терек (655 ледников, 638 км² общей площади оледенения) и Кубань (312 ледников, 180 км² общей площади оледенения, Рис. 1), в которых находится большая часть ледников северного склона Большого Кавказа. Покрытые мореной ледники чаще встречаются на Северном Кавказе, чем на Южном (Tielidze et al., 2017). На высотах ниже 2800 м над уровнем моря наблюдается увеличение мощности и площади моренного покрова (Lambrecht et al., 2011). Методы дистанционного зондирования показывают, что под мореной находилось до 19.4% площади ледников на Северном Кавказе в 2014 году и всего 9,2% на Южном (Tielidze et al., 2017).

Глава 2. Глобальные гляциологические модели

Вторая глава — обзорная, где подробно разбираются общие принципы, на которых строятся глобальные гляциологические модели, описываются и критически оцениваются методы и подходы к прогнозированию параметров оледенения, рассматриваются вопросы постановки прогностических экспериментов, методы калибровки и валидации моделей, а также наиболее значимые результаты их применения. Обзор дается для выбора методики

для последующих численных экспериментов, с помощью которых воспроизводится динамика ледников Северного Кавказа. В данной главе выполнено многостороннее исследование современных глобальных гляциологических моделей, существующих решений для воспроизведения баланса массы и динамики ледников, для инициализации, калибровки и валидации моделей, имеющихся ограничений и проблем, дальнейших путей совершенствования моделей. Рассмотрены теоретические аспекты, относящиеся к архитектуре ГММ и методические приемы их применения к решению задач диссертационного исследования. Среди глобальных гляциологических моделей в настоящее время существует всего две динамические модели течения ледников: OGGM и GloGEMflow. Для достижения целей диссертации была выбрана модель GloGEMflow. В ней характеристики каждого ледника усредняются по высотным поясам, и она более устойчива к ошибкам, чем OGGM, в которой каждый ледник представлен в виде дерева осевых линий.

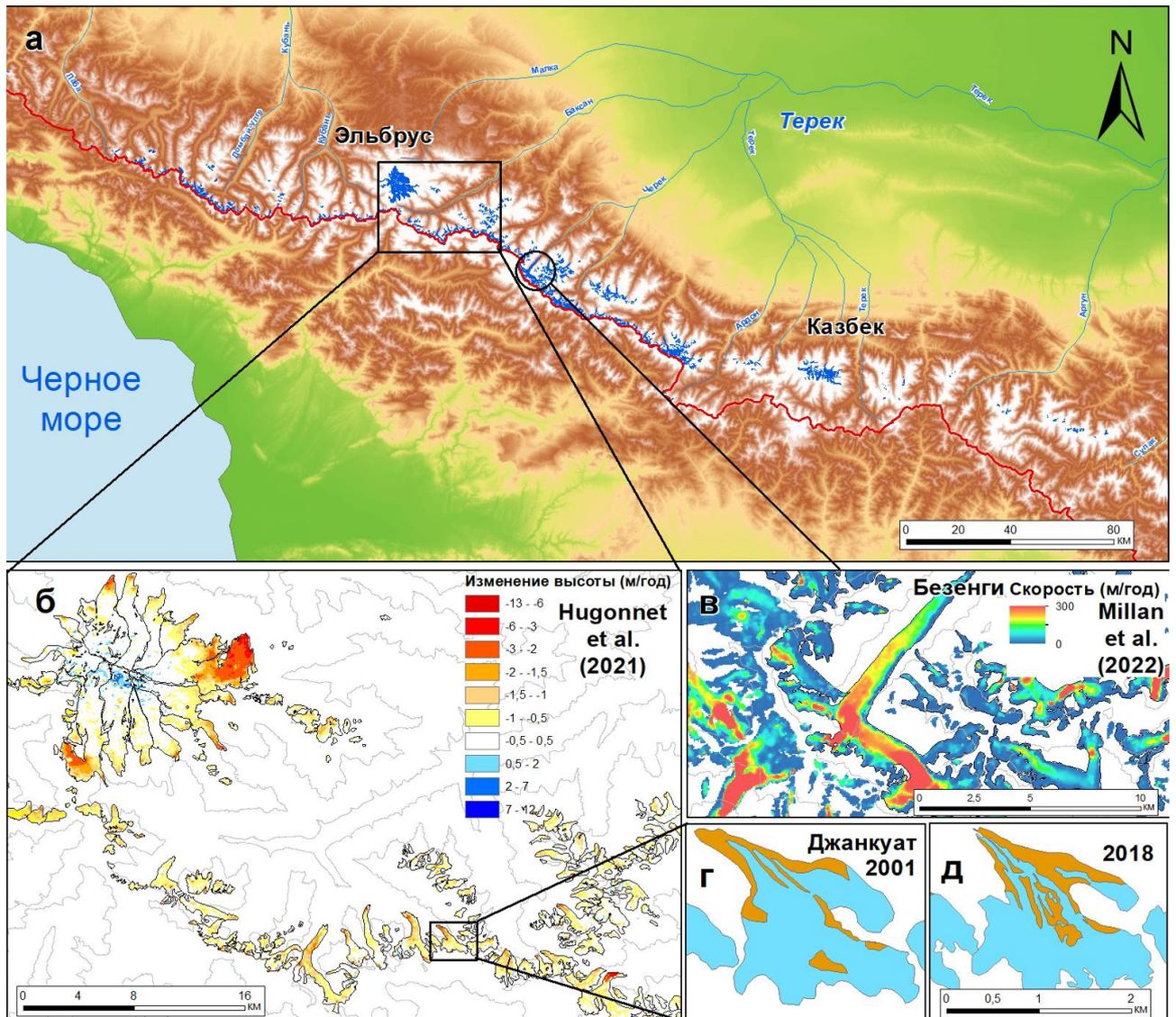


Рис. 1. Район исследования. (а) Ледники бассейнов рек Терек и Кубань (северный склон Кавказа) отмечены синим цветом. (б) Изменение высоты поверхности ледников Приэльбрусья между 2000 и 2019 годами (Hugonnet et al., 2021). (в) Скорость течения поверхности ледника Безенги (Millan et al., 2022). (г) Моренный покров ледника Джанкуат на дату инвентаризации RGI (очертания ледника из RGI Consortium (2017)). (д) Моренный покров ледника Джанкуат в 2018 году (Khromova et al., 2020).

Глава 3. Электрофизическая модель «холодного» ледника для измерения характеристик ледников в области аккумуляции

В третьей главе рассмотрены особенности моделирования характеристик «холодного» ледника (в области аккумуляции) на основании его электрофизических свойств. Входные данные мощности ледников являются ключевыми для получения реалистичных результатов при моделировании динамики оледенения (Huss et al., 2014; Van Tricht et al., 2023). При этом прямые измерения мощности ледников Северного Кавказа в «холодных» зонах в области аккумуляции зачастую невозможны из-за сложных природных условий. В связи с этим становится актуальным применение дистанционного зондирования толщины ледников. В данной главе рассмотрена электрофизическая модель «холодного» ледника, в котором отсутствует вода в жидком виде, что соответствует зоне аккумуляции для многих ледников на Кавказе. Такая модель полезна для расчета радиолокационных экспериментов при планировании измерений и интерпретации получаемых результатов. Анализ результатов моделирования электрофизических свойств ледника показал, что при низких температурах для частот выше 1 МГц действительная часть диэлектрической проницаемости ледника с изменением частоты и температуры на поверхности не меняется, но зависит от строения ледника. Глубинный профиль тангенса угла диэлектрических потерь постоянен по всему телу ледника, за исключением верхнего слоя толщиной до 10 м, в нем поглощение значительно меньше за счет более низкой плотности снежно-фирнового покрова. Радиоволны мегагерцового диапазона поглощаются сильнее волн гигагерцового диапазона.

Глава 4. Методы измерения толщины моренного покрова ледников

Толщина моренного покрова вычислялась в ходе многих исследований, с использованием как прямых методов (Поповнин и др., 2015; McCarthy et al., 2017; Nicholson and Mertes, 2017), так и методов дистанционного зондирования (Rounce et al., 2021). Первые требуют огромных затрат времени и ручного труда, так например на Джанкуате самая большая толщина выкопанного слоя моренного материала составила около 260 см (Поповнин и др., 2015). Последние, как правило, опираются на сильную положительную связь между толщиной моренного покрова и температурой поверхности (Ranzi et al., 2004; Reid and Brock, 2010; Evatt et al., 2015), полученной по спутниковым снимкам в тепловом диапазоне. При таком подходе толщина морены вычисляется с использованием либо модели энергетического баланса (Foster et al., 2012; Rounce and McKinney, 2014; Schauwecker et al., 2015), либо с помощью эмпирически выведенной зависимости. Как показывает опыт, применение этого метода обычно приводит к заниженной оценке толщины морены, поскольку он опирается на предположение о стабильности тепловых свойств поверхностной морены в репрезентативных временных масштабах для расчета теплового потока через слой морены или абляции под моренным покровом (Rounce et al., 2018). Так, например, на Джанкуате максимальная толщина моренного покрова, вычисленная этим методом, составила всего 30 см.

Реже применяются электрофизические методы дистанционного зондирования (Fiucci et al., 1997). В рамках этого подхода, при создании научной аппаратуры для проведения радиозондирования, прогнозирования результатов и разработки технологии решения обратных задач необходимо предварительно провести численное моделирование натуральных экспериментов. В этом случае ключевым элементом моделирования радиофизических измерений является электрофизическая модель моренного покрова. Как показано в ряде

работ (Heiken et al., 1991), диэлектрическая проницаемость отложений зависит от их состава, температуры и частоты электромагнитного поля. Методология, описанная в данной главе (Yushkova et al., 2020), учитывает динамику суточной температуры на поверхности и в верхнем слое отложений, распределение плотности по глубине, а также результаты лабораторных исследований диэлектрических характеристик образцов отложений. Все эти факторы были включены нами в модель, которая была апробирована на планетах земной группы, в том числе в применении к лунному реголиту, однако полученные результаты аналогично применяются и к отложениям другого типа, в частности, к моренным покровам ледников (Финкельштейн, 1977). Разработанная нами методика и ее внедрение в натурных экспериментах с аэрокосмических носителей были бы полезны в силу трудозатратности полевых исследований и ошибок, получаемых путем инверсии температуры поверхности моренного покрова.

Также, классификация моренного покрова на тонкий (усиливающий таяние) и толстый (замедляющий таяние) возможна по спутниковым снимкам с хорошим разрешением, так как тонкий моренный покров отличается от толстого более темным цветом. Тонкий слой отложений был нанесен на карту по методу, описанному в диссертации (Newall et al., 2020) по спутниковым снимкам WorldView3 на нунатаках Земли Королевы Мод и по снимкам Bing на леднике Джанкуат, после чего была проведена валидация в полевых условиях, подтвердившая результаты картографирования (Newall et al., 2020). Подобная классификация исключительно важна для валидаций баз данных толщин моренного покрова, полученных методом инверсии температуры поверхности, и для определения доли тонкого моренного покрова для калибровки моренного блока.

Глава 5. Модель эволюции ледника, покрытого моренным чехлом

В пятой главе рассматривается модель эволюции ледников, покрытых моренным чехлом (GloGEMFlow-debris, Рис. 2), в которой используется уравнение неразрывности для моделирования движения и эволюции ледника вдоль осевой линии (Postnikova et al., 2023). Глава включает разделы с описаниями отдельных блоков расчета, включая специально разработанный автором модуль динамики моренного покрова. Существенными компонентами эволюции моренного покрова в нашей модели являются: поступление моренного материала на ледник, динамическое перераспределение (перенос) моренного покрова, вытаивание в зоне абляции и вынос в прифронтальную зону (Anderson and Anderson, 2016; Рис. 3). Поступление моренного материала на ледник трудно описать в региональной гляциологической модели в явном виде. В реальности часть моренного материала попадает на ледник в результате склоновой денудации, которая может иметь разную скорость в зависимости от климатических параметров и свойств склонов, часть поступает в результате донной экзарации, часть захватывается ледником с древних боковых морен (Серебряный, 1989). Для большей устойчивости модели к ошибкам, все эти источники объединены в один параметр – скорость поступления моренного материала на ледник - который настраивается в соответствии с доступными данными толщины поверхностной морены. Такая модель создает обратный градиент баланса массы во фронтальной области покрытого мореной ледника на основе смоделированных мощности и площади морены. В свою очередь, мощность морены контролируется в том числе динамикой ледника: она может быть тонкой в средней зоне абляции либо на крутом склоне, где скорость льда самая высокая, и самой толстой во фронтальной зоне, где лед замедляется.

Введено понятие явного и неявного учета моренного покрова. Моренный покров учитывается явно, если моренный блок включен. Если моренный блок выключен, влияние моренного покрова может быть учтено неявно через параметры масс-балансового блока, полученные в результате калибровки с использованием данных баланса массы покрытых мореной ледников.



Рис. 2. Структура модели GloGEMflow-debris, включающая блок эволюции моренного чехла (заштрихованные круглые блоки). Серым выделены основные блоки модели. Прямоугольниками обозначены используемые или рассчитанные данные, овалами — процедуры.

В связи с тем, что исследование имеет региональный масштаб, некоторые параметры моренного покрова для каждого ледника Северного Кавказа определить невозможно, поэтому был принят ряд допущений:

- плотность и пористость пород, формирующих морену, выбираются в соответствии с измеренными на леднике Джанкуат (Bozhinsky et al., 1986);
- концентрация моренного материала в толще льда выбирается такой же, как на леднике Джанкуат;
- 100% нанесенного на карту моренного покрова в исследуемой области считается толще 7 см; то есть игнорируется возможный эффект усиления абляции под тонким моренным слоем. При картировании моренного покрова, достаточно точная его классификация как тонкого или толстого, в рамках настоящего исследования не представляется возможной. В соответствии с оценкой из Rounce et al. (2021), Кавказ характеризуется как регион с достаточно толстой поверхностной мореной.

Глава 6. Прогноз эволюции ледников в бассейнах рек Терек и Кубань в XXI веке

Пятая глава посвящена прогнозу эволюции ледников в бассейнах Терека и Кубани в XXI веке. Глава содержит 4 раздела: описание входных данных, калибровка модели, валидация модели, описание результатов и, отдельно, обсуждение эволюции и роли моренного покрова в динамике ледников, а также сравнение с результатами аналогичных исследований.



Рис. 3. Схема эволюции моренного покрова ледника, используемая в нашей модели (адаптировано у Nicholson et al. (2021) и Anne Maussion, Atelier les Gros yeux). В модели эволюция морфолитогеогенез представлен в упрощенной форме для целей моделирования в региональном масштабе.

Входные данные

В работе были использованы картографические данные распространения ледников из инвентаризации RGI 6.0 (RGI Consortium, 2017); данные гипсометрии ледников из Huss, Farinotti (2012, обновлены в 2019 г.); карта распространения моренного покрова на Северном Кавказе, предоставленная А.Губановым (Рис. 1 г, д; 4); карта толщины моренного покрова из работы Rounce et al. (2021); климатические сценарии SSP из

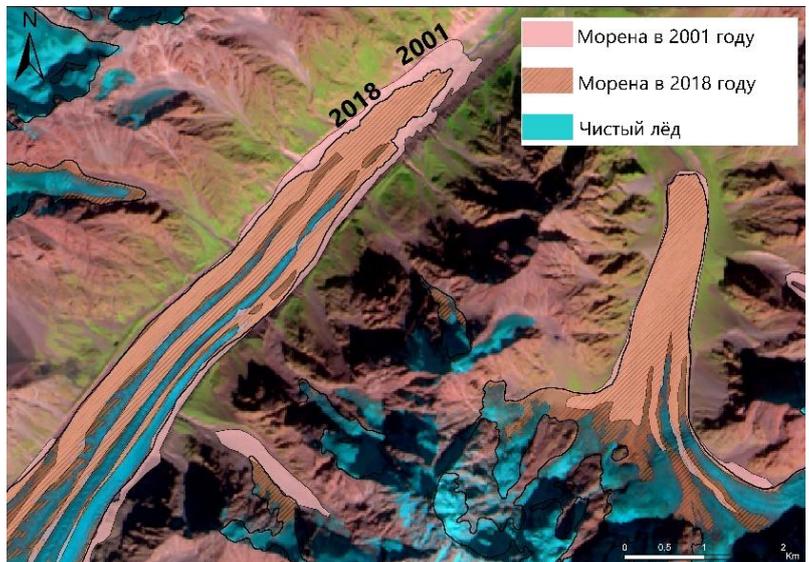


Рис. 4. Моренный покров ледников Безенги и Мижирги.

СМIP6, а также полевые измерения мощности моренного покрова на Джанкуате (Poronin et al., 2015). Мы используем 13 климатических моделей из СМIP6 и пять сценариев: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5, где первая цифра обозначает сценарий SSP (Eyring et al., 2016), а следующие 2 цифры — уровень радиационного воздействия RCP (Van Vuuren et al., 2011).

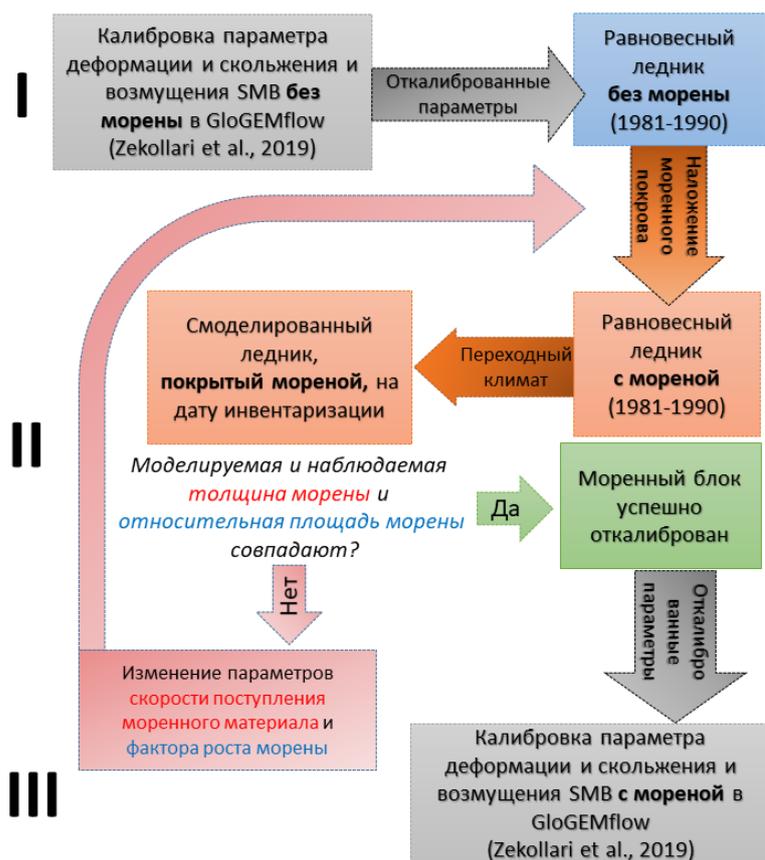


Рис. 5. Три этапа калибровки модели GloGEMflow с учетом введенного модуля моренного покрова. Подробности процедуры калибровки описаны в тексте диссертации.

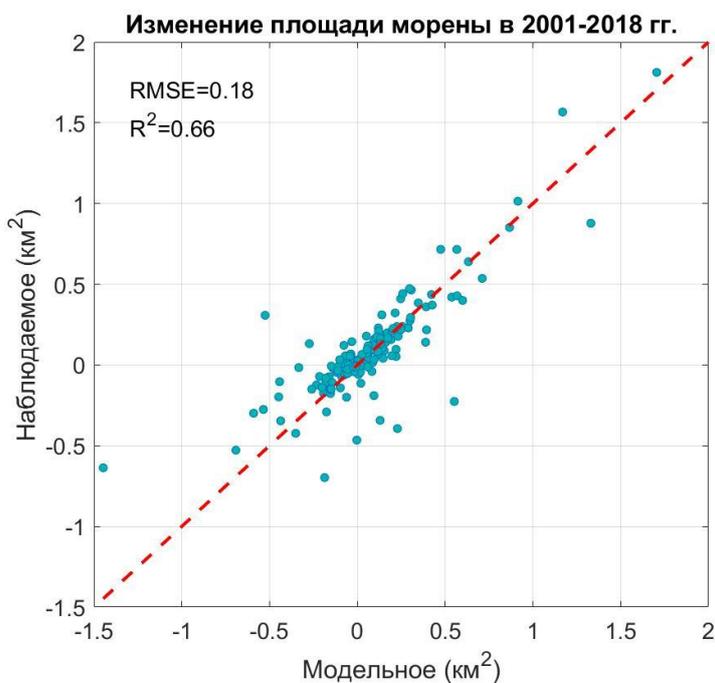


Рис. 6. Наблюдаемое и смоделированное изменение площади моренного покрова ледников бассейнов Терека и Кубани в период 2001-2018 гг.

Настройка модели

Блок расчета баланса массы был настроен так, чтобы модельный баланс массы соответствовал наблюдаемым данным изменения высоты поверхности ледников в 2000-2019 гг. (Hugonnet et al., 2021). Для настройки динамического блока были использованы данные RGI для достижения соответствия модельной длины ледников данным инвентаризации, а также данные толщины ледников из Huss, Farinotti (2012), для достижения соответствия им модельного объема ледников. Блок эволюции моренного покрова был настроен таким образом, чтобы модельная площадь и толщина морены соответствовали распределению площади нанесенной на карту области морены в 2001 г. и толщине морены, полученной методами дистанционного зондирования в 2008 г. (Rounce et al., 2021). Схема калибровки представлена на Рис. 5.

Валидация моренного блока

Для валидации моренного блока были использованы данные изменения площади морены на каждом леднике в период с 2001 по 2018 год. Для этого была составлена карта моренного покрова на основе снимков Landsat 7 ETM+ и Sentinel-2 за 2018 год (Рис. 1д, 4). Затем изменение площади моренного покрова,

накопленного при моделировании эволюции ледника и морены с 2001 по 2018 год, сравнивалось с наблюдаемым для каждого отдельного ледника (203 точки на рис. 6). Смоделированное изменение площади моренного покрова хорошо коррелирует с наблюдаемым ($R^2 = 0,66$, $RMSE=0,18$; Рис. 6).

Особенности динамики ледников, покрытых мореной

В численных экспериментах установлено, что на ледниках, на которых моренный покров моделируется явно, наблюдается характерная картина истончения за период 1990-2020 гг.: толщина льда уменьшается в основном в средней части зоны абляции (так называемая «зона максимального истончения» (Anderson et al., 2021; Рис. 7), в то время как длина ледника почти не меняется. Это не так для ледников, моделируемых без эволюционирующего моренного чехла: в этом случае основные потери льда происходят в самой нижней части ледника.

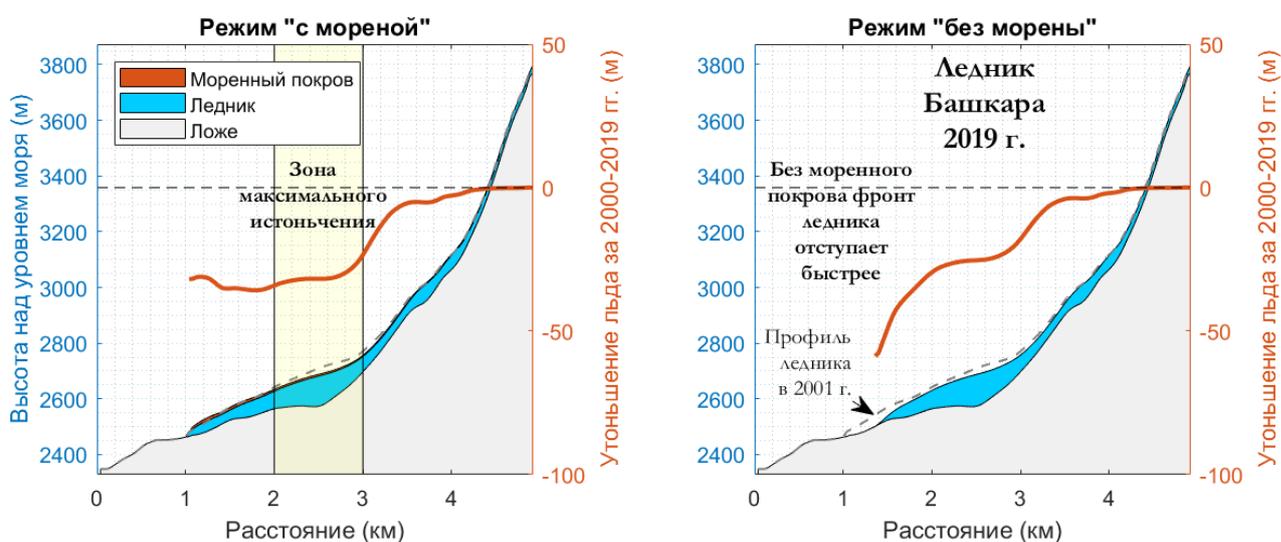


Рис. 7. Скорость истончения ледника Башкара за 2000 - 2019 гг. при учете (слева) и неучете (справа) учета эволюции моренного покрова. Затененная область указывает на зону максимального истончения, определенную в Anderson et al. (2021). Серая пунктирная линия — профиль поверхности ледника на дату инвентаризации (2001 г.).

Согласно Benn et al. (2012) и Anderson et al. (2021), усиленное истончение в средней части ледника, моделируемого с эволюционирующей мореной, контролируется измененным из-за морены движущим напряжением, и наоборот. Когда большая часть потери массы происходит в средней зоне, поверхностный градиент уменьшается, так как ледник становится положе и длиннее, чем без морены. За счет этого снижается движущее напряжение и скорость ледника в зоне абляции. Многие из смоделированных ледников, покрытых мореной, имеют характерную выпуклую вниз форму профиля скорости, чего нельзя сказать о тех же ледниках, смоделированных без участия моренного блока. В среднем, скорость ледников на 6,5% ниже при моделировании с мореной (по сравнению с ледником, моделируемым без морены) в бассейне Кубани и на 2% ниже в бассейне Терека. Эти результаты согласуются с наблюдаемыми изменениями толщины ледников на Кавказе (Hugonnet et al., 2021) и с результатами наблюдений и моделирования в других регионах (Hambrey et al., 2008; Banerjee, Shankar, 2013; Brun et al., 2019; Ferguson, Veili, 2021).

Эволюция объема оледенения в бассейнах Терека и Кубани

Согласно модельным прогнозам, между 1990 и 2100 годами ледники бассейна Терека потеряют от 20% (SSP1-1.9, медианное значение 50%) до 99% (SSP5-8.5, медианное значение 95%) от общего объема льда 1990 года, независимо от того, активирован ли моренный блок или нет (Рис. 8). Для бассейна Кубани соответствующая потеря объема льда составляет приблизительно от 42% (медиана 75%) до 100% (медиана 99%), причем разница между неявной и явной формулировкой моренного покрова здесь также незначительна (Рис. 11-13), принимая во внимание неопределенность климатических прогнозов. При реализации сценариев с наименьшим потеплением (SSP1-1.9 и SSP1-2.6) ледники, согласно прогнозу, достигнут равновесия с климатом после 2050 года. При остальных сценариях равновесие достигнуто не будет, то есть ледники (оставшиеся в основном на Эльбрусе) продолжают отступать.

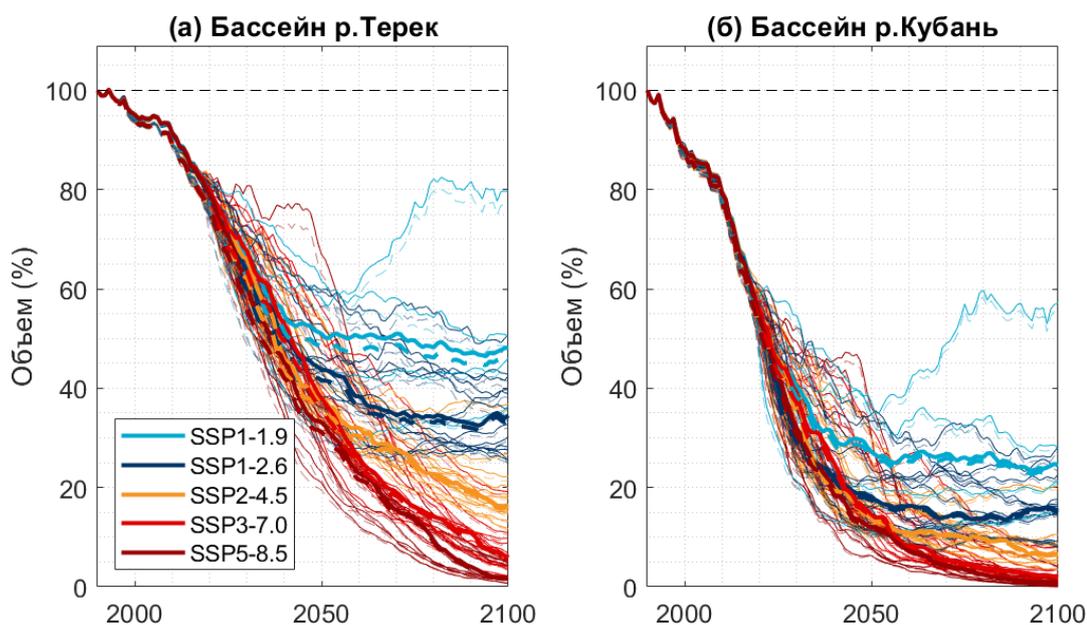


Рис. 8. Эволюция объема ледников в 1990-2100 гг. относительно 1990 г. Сплошные линии — при моделировании с учетом эволюции морены, пунктирные — без учета морены. Жирные линии — медианные значения для объема и площади и средние значения для длины, рассчитанные для разных климатических моделей каждого сценария. Тонкие линии соответствуют реализации каждой из тринадцати климатических моделей для разных сценариев.

Эволюция моренного покрова на ледниках бассейнов рек Терек и Кубань

В результате проведения численных экспериментов нами установлено, что изменение пространственных характеристик моренного покрова на ледниках бассейнов Терека и Кубани зависит от климатического сценария (Рис. 9). Доля покрытого мореной льда растет тем больше, чем «холоднее» климатический сценарий (Рис. 9б), так как площадь ледника уменьшается, в то время как моренный покров продолжает накапливаться. Очевидно, общая площадь морены тем больше, чем больше площадь оставшегося льда и, таким образом, чем холоднее прогнозный климат (Рис. 9в). Общая площадь морены для сценариев с наименьшим потеплением (SSP1-1.9 и SSP1-2.6) растет на протяжении XXI-го века, потому что при этих сценариях ледники стабилизируются после 2050 года.

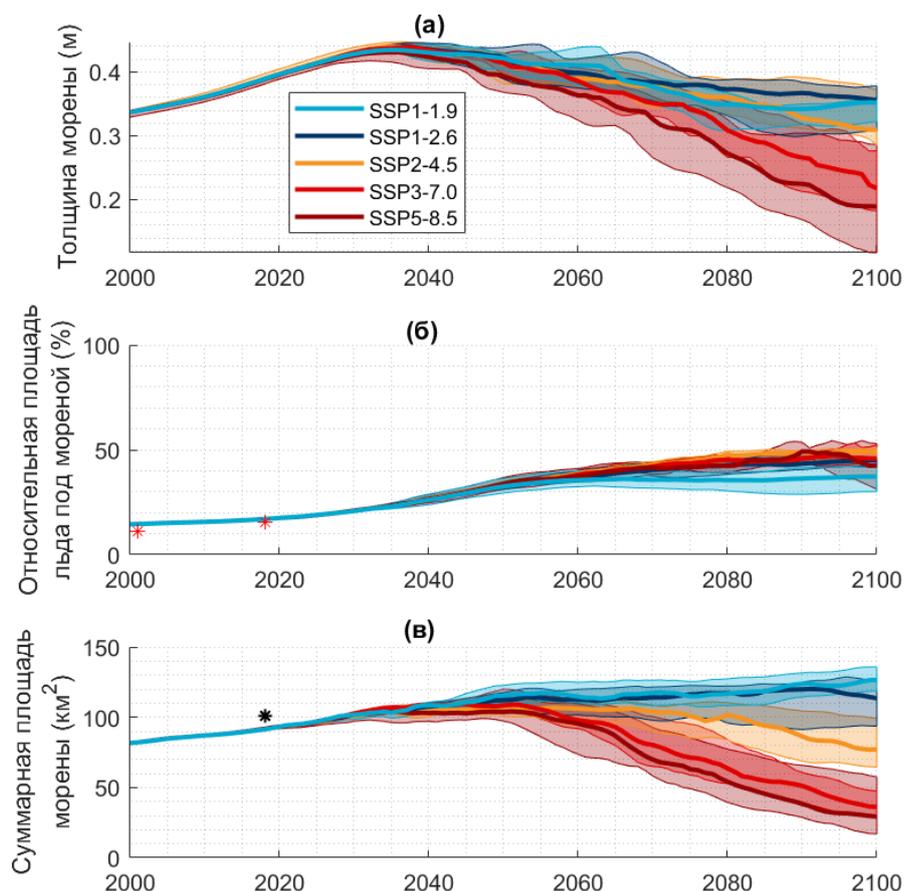


Рис. 9. Эволюция моренного покрова при различных климатических сценариях. Здесь и далее: жирные линии – медианные значения, рассчитанные для разных климатических моделей каждого сценария; затененные области представляют собой разброс модельных результатов в рамках каждого климатического сценария. Звездочками обозначены наблюдаемые значения площади моренного покрова.

Согласно результатам моделирования, средняя мощность моренного покрова для каждого отдельного ледника изменяется ступенчато: постепенный рост толщины морены за счет переноса в области медленного льда и вытаивания (максимальный — у фронта ледника) перемежается со скачкообразным уменьшением средневзвешенной толщины морены за счет отступления ледника и отложения моренного материала на стаявшем участке ледника в прогляциальной области. Таким образом, в каждой отдельно взятой точке на отступающем активном леднике толщина морены растет, но средняя мощность морены по всему леднику может убывать.

Согласно прогностическим расчетам, средневзвешенная мощность морены на Северном Кавказе будет расти до 2035 года (Рис. 9а). Это среднее значение для всего исследуемого района, которое, как правило, зависит от мощности ледника — чем больше ледник по площади и толщине, тем позже наступает этот переломный момент. К примеру, для ледника Башкара, длина которого составляла около 4 км по состоянию на 2020 год, скачкообразное отступление фронта происходит до 2035 года, а для ледника Шхельда (длина около 7 км) — после 2050 года (Рис. 10).

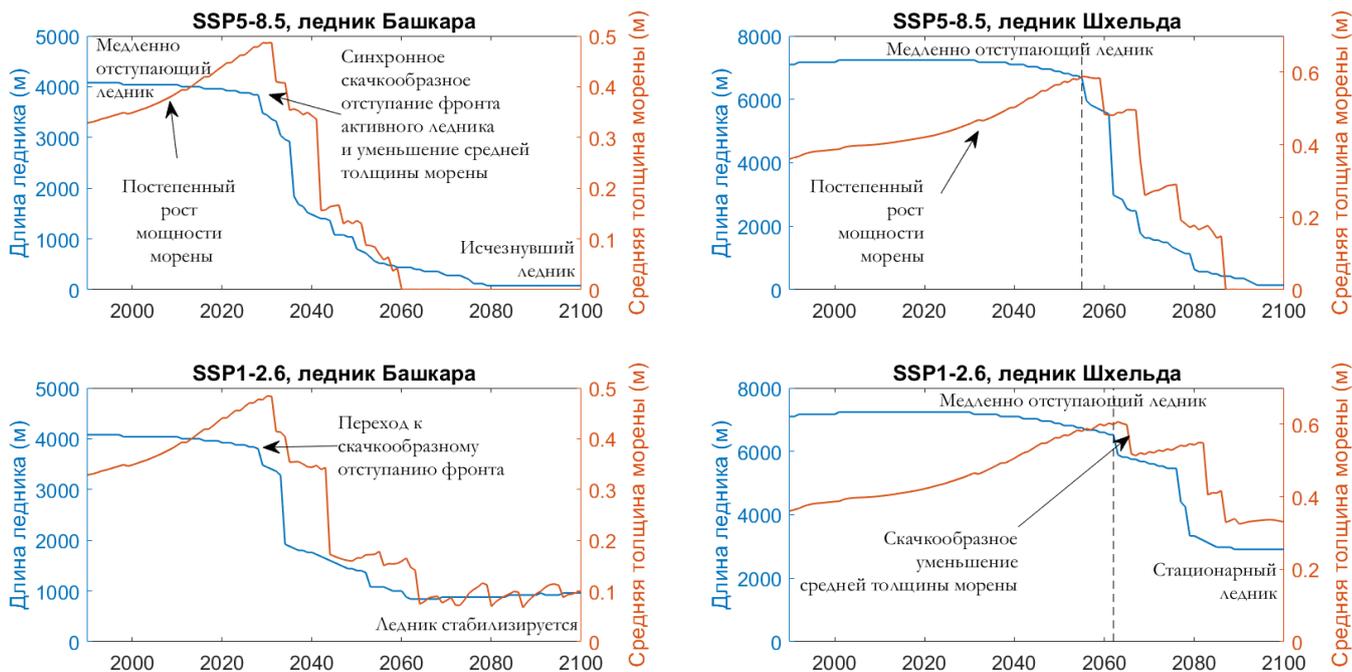


Рис. 10. Эволюция ледников Башкара и Шхельда и моренного покрова на них при двух климатических сценариях: SSP5-8.5 и SSP1-2.6.

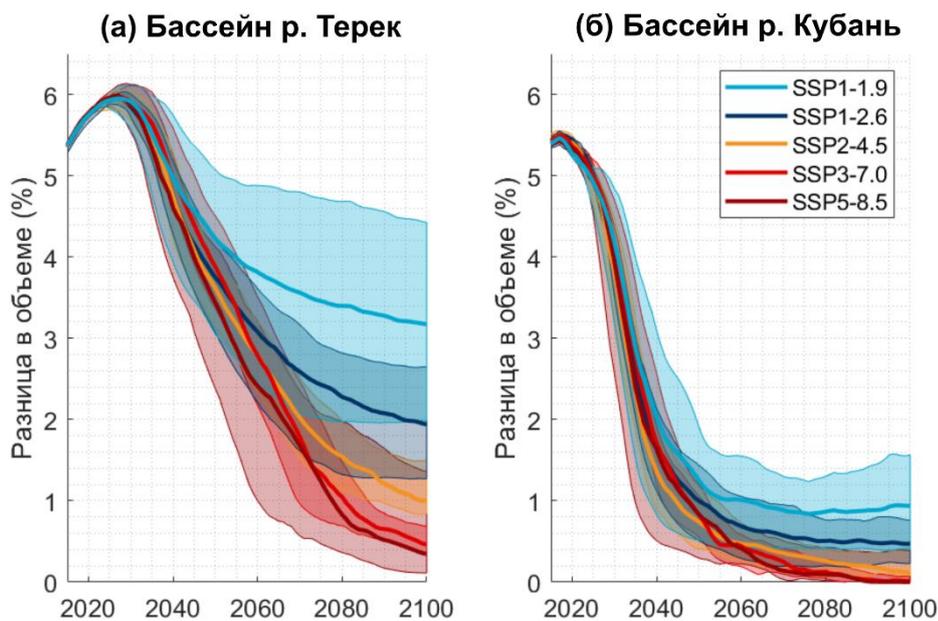


Рис. 11. Разница в объеме льда при моделировании эволюции ледника с мореной и без морены, в зависимости от климатического сценария SSP.

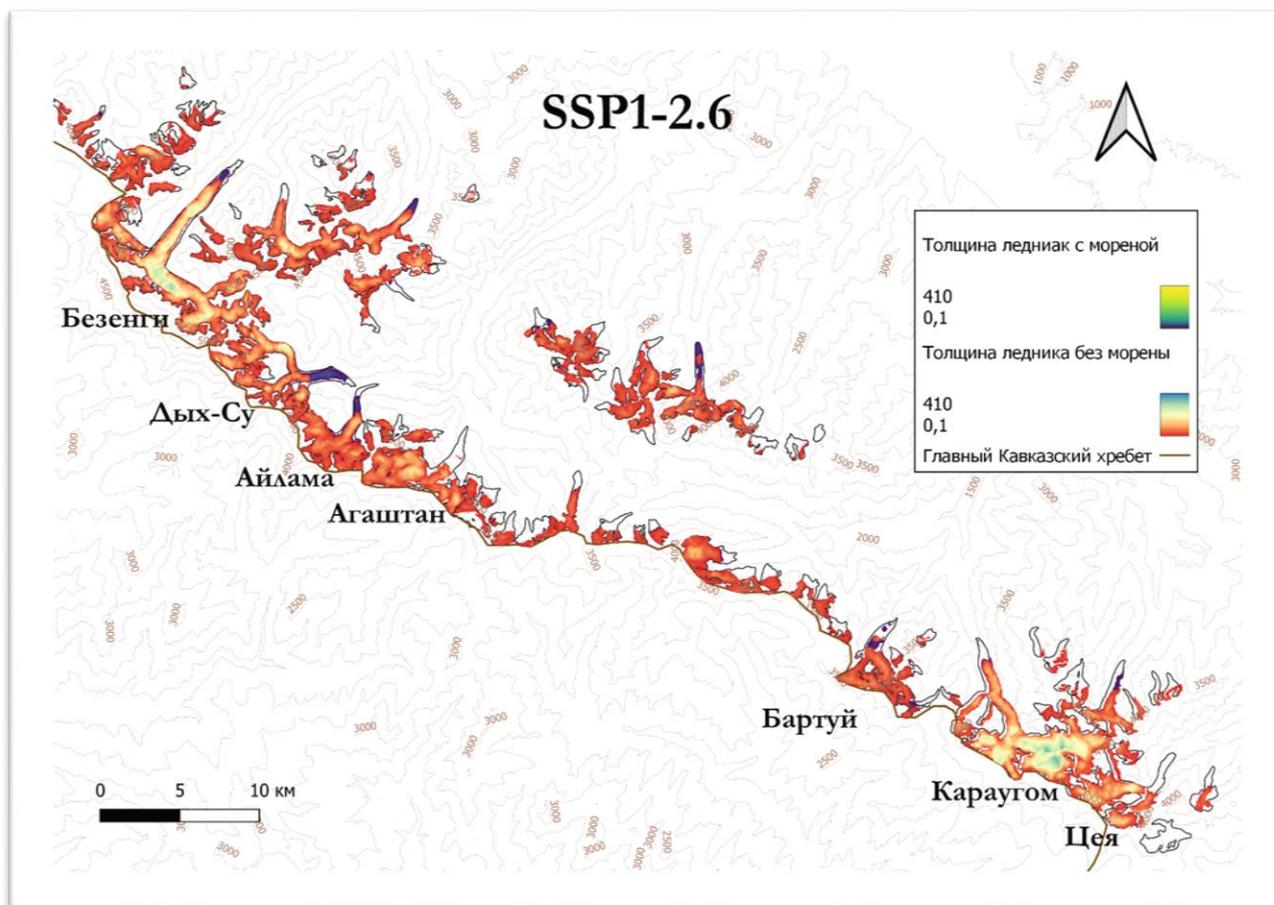


Рис. 12. Прогнозируемая разница пространственных характеристик и мощности ледников при моделировании с мореной и без морены, на 2040 год.

В этот период объем ледников быстро сокращается (Рис. 8), но в основном за счет уменьшения их толщины, в то время как фронты ледников отступают относительно медленно (Рис. 10, 14 а,б), что позволяет моренному покрову накапливать максимальную мощность в фронтальной области за счет переноса моренного материала в области «медленного» льда и вытаявания. После этого фронты ледников начинают быстро отступать, — либо потому что отделяются стагнирующие области льда из-за большой потери массы (именно на этот период приходится накопление максимального объема областей мёртвого льда), либо потому что языки ледников истончаются. В результате, самые мощные области поверхностной морены, накопившиеся на языках ледников, оказываются в прогляциальной области, и средняя мощность моренного покрова, оставшаяся на леднике, убывает. Таким образом, мощность моренного покрова в среднем по Северному Кавказу после 2035 года убывает тем больше, чем теплее климатический сценарий, в силу того, что самый толстый слой морены быстрее всего расходуется при быстром отступании ледников (Рис. 9а).

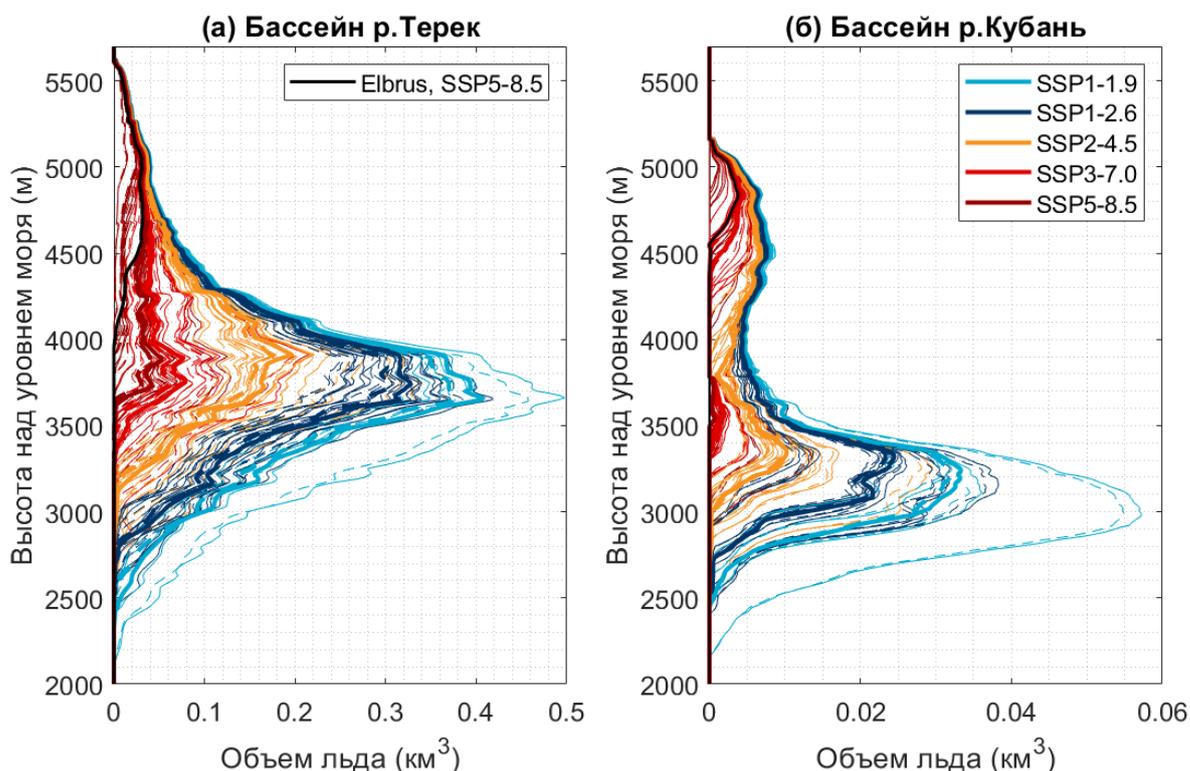


Рис. 13. Распределение объема льда по высотным поясам в 2100 году, в зависимости от климатического сценария SSP. Жирные линии — медианные значения среди всех GCM каждого сценария; пунктир — при моделировании без морены, сплошные линии — с мореной. Черной линией обозначено медианное распределение объема льда для ледников Эльбруса при сценарии SSP5-8.5.

Влияние моренного покрова на объем льда в течение XXI века

В результате, влияние моренного покрова на общий объем льда убывает к концу века. Это связано, во первых, с уменьшением мощности морены, во-вторых, с уменьшением общей площади, на которую моренный покров будет влиять, и в-третьих, с тем что длинные языки ледников, на которых в настоящее время сосредоточена основная масса моренного покрова, исчезнут. Поэтому для обоих бассейнов влияние моренного блока на объем льда к концу века больше для более холодных сценариев. Если смотреть на медианные значения для каждого климатического сценария, для бассейна Кубани разница в объеме льда при моделировании эволюции ледников с мореной и без падает ниже 2% для всех сценариев (Рис. 11), в то время как для бассейна Терека это верно лишь при реализации сценариев SSP2-4.5, SSP3-7.0 и SSP5-8.5. При этом для отдельных ледников разница может быть существенной, но как правило до конца века (Рис. 12).

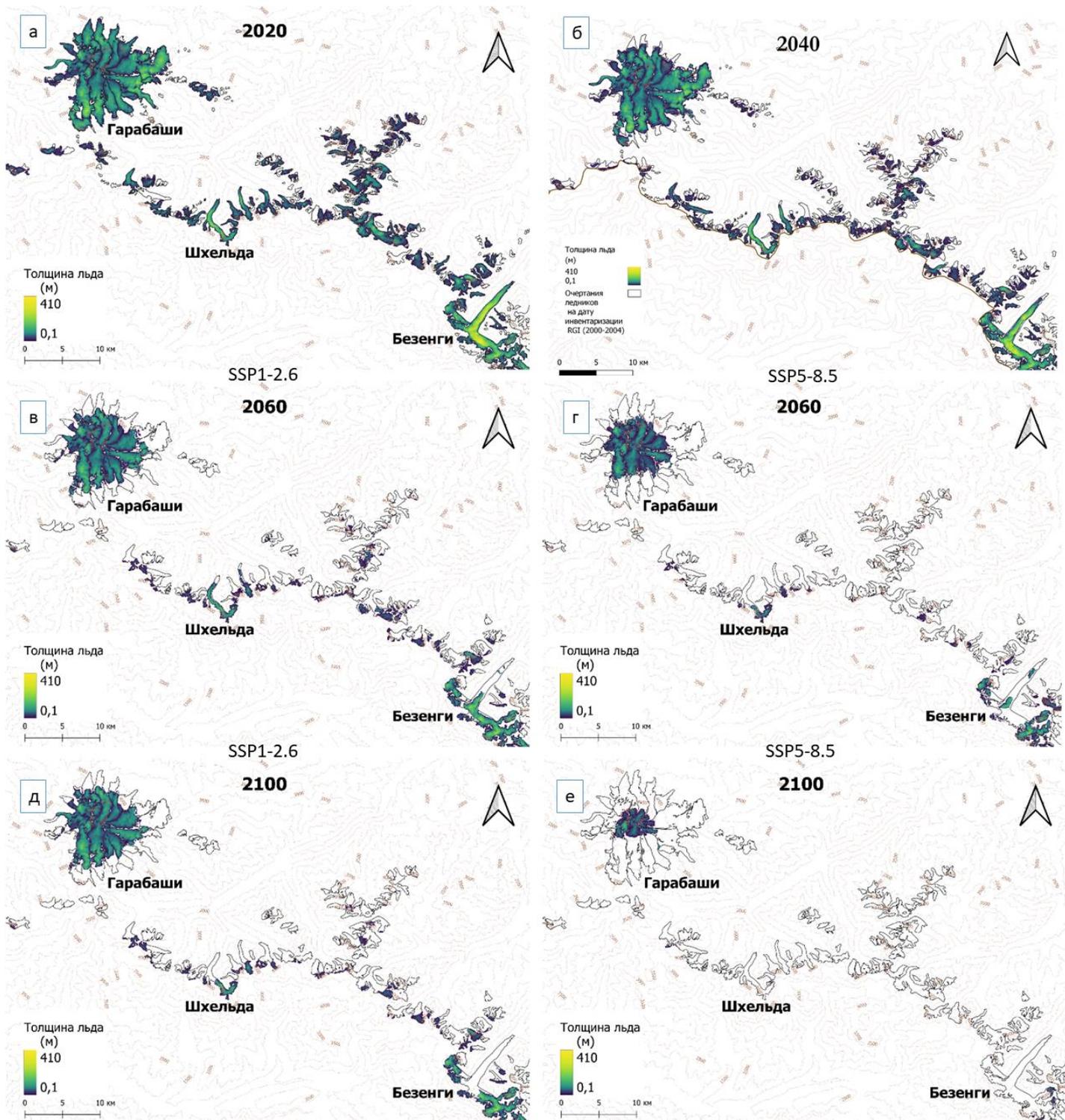


Рис. 14. Модельные конфигурации ледников в западной части Центрального Кавказа в 2020, 2060 и 2100 годах при сценариях SSP1-2.6 (меньшее потепление) и SSP5-8.5 (максимальное потепление).

Изменение конфигурации ледников Северного Кавказа

В бассейне Терека при всех климатических сценариях кроме SSP5-8.5 наибольший объем льда к 2100 году сохранится на высоте 3500-4000 м над уровнем моря (Рис. 13-15). В бассейне Кубани при любом климатическом сценарии наблюдается два максимума в распределении объема льда по высотным поясам: на высотах 2800-3400 м, в основном на отрогах Главного Кавказского Хребта (ГКХ), и на высоте 4300-4700 м, на Эльбрусе (Рис.

13-15). При этом спрогнозированный объем льда, сохраняющийся в бассейне Кубани к 2100 г., на порядок меньше, чем в бассейне реки Терек.

При самом экстремальном климатическом сценарии (SSP5-8.5) ледники сохраняются в основном на горе Эльбрус выше 4000 м над уровнем моря (Рис. 13, 14). В бассейне Терека в среднем 65% льда, оставшегося к 2100 году при сценарии SSP5-8.5 (0,42 км³), находится на склонах Эльбруса. Если же рассматривать наиболее мягкий сценарий (SSP1-1.9), то вклад ледников Эльбруса в общее количество льда к 2100 году также значителен, но меньше: 30%. В бассейне р. Кубань, согласно климатическому сценарию SSP5-8.5, до 97% оставшегося льда (0,015 км³) сосредоточено на Эльбрусе, выше 4500 м над уровнем моря, в основном на леднике Кюкюртлю, так как остальные крупные ледники Эльбруса принадлежат к бассейну р. Терек (Рис. 15). При этом 2% объема льда сохранится на высоте 3500-3700 м, на склонах ГКХ. Очевидная причина заключается в том, что рельеф Эльбруса позволяет ледникам отступать до самых больших высот в регионе.

Прогноз образования областей мёртвого льда

Области мёртвого льда могут представлять интерес как с точки зрения дополнительного источника пресной воды, так и с точки зрения прогноза потенциальной локализации формирования селевых потоков, образованных вследствие прорыва заполненных водой термокарстовых каверн (Золотарев и др., 2012) либо прогляциальных озёр между фронтом активного ледника и областью мёртвого льда. Озёра, подпруженные моренным материалом, под которым скрывается стагнирующий лёд, считаются потенциально опасными в плане прорывных наводнений, вследствие того, что ледяная «сердцевина» морены может вытаивать в условиях "теплого" климата.

Согласно результатам, полученным в численных экспериментах, наибольший суммарный в исследуемом регионе объём мёртвого льда (0.2 км³) прогнозируется в 2030-2040 гг., в основном на ледниках с длинными пологими языками. Этот период характеризуется удвоенной по сравнению с современной скоростью отступления ледников и образованием большого количества погребённых и мёртвых льдов. Второй пик накопления мёртвого льда прогнозируется в 2050-2070 гг., в зависимости от климатического сценария. Вполне вероятно, в эти периоды времени будет повышен риск прорывных наводнений. При этом, для более теплых климатических сценариев прогнозируются большие объёмы мёртвого льда. Наличие моренного материала удлиняет срок жизни областей мёртвого льда, что может способствовать большему накоплению талой воды в запрудах.

Прогноз образования озёр при отступании ледников на Эльбрусе в XXI веке

В рамках диссертации нами было определено примерное время образования озёр на Эльбрусе в будущем на месте отступающего льда. Координаты переуглублений, которые могут превратиться в озёра при отсутствии ледников (Рис. 17а), были взяты из предыдущих работ (Лаврентьев и др., 2020; Михаленко и др., 2020). В соответствии с этими исследованиями, «потенциальные» озёра с объёмом больше 1000 м³ находятся на месте ледников Большой Азау (№17,14,12) и Джикаугенкёз (№6) (таблица 1).

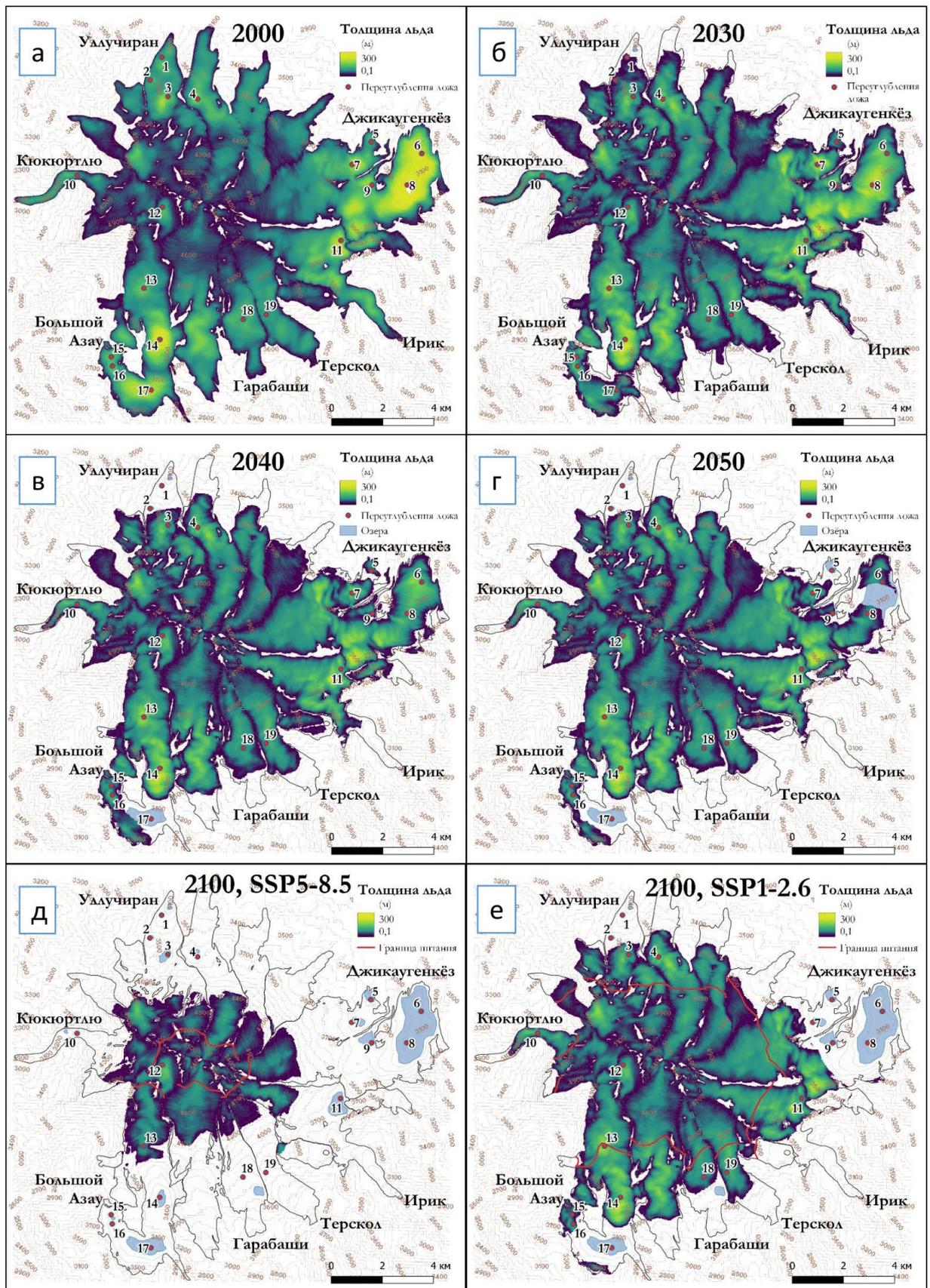


Рис. 15. (а) Толщина ледников Эльбруса на 2000 год в соответствии с Huss, Farinotti (2012). (б-е) Пример смоделированного расположения ледников на Эльбрусе в будущем при сценариях SSP1-2.6 (меньшее потепление) и SSP5-8.5 (максимальное потепление). Цифрами обозначены озера, которые могут быть образованы при исчезновении льда на Эльбрусе. Изолинии нарисованы для поверхности ложа, полученной путем вычитания толщины ледников из ЦМР поверхности.

Таблица 1. Самые большие переуглубления, идентифицированные в работе Лаврентьев и др. (2020).

Но- мер озера	Ледник	Координаты	Высо- та над уров- нем морья	Объем (м ³)	Период возможного образования					Зоны мёртво- го льда, мощ- ность
					SSP1- 1.9	SSP1- 2.6	SSP2- 4.5	SSP3- 7.0	SSP5- 8.5	
6	Джикау- генкез	42,55226N 43,37107E	3100	7355 или больше в 2045- 2055 гг.		2045-2055				До 60 м
12	Боль- шой Азау	42,42799N, 43,34930E	5100	1217	До 2100 г. не будет образовано					-
14		42,47959N, 43,31228E	3350	4522						-
17		42,42525N, 43,28434E	3150	9380						-

Объем «потенциального» озера на месте ледника Джикаугенкёз (№6) был оценен в 7355 м³ (Лаврентьев и др., 2020). Согласно модельным прогнозам, это озеро может начать формироваться в 2040-х годах независимо от климатического сценария. При этом согласно прогнозу примерно с 2045 года в течение приблизительно 15 лет для всех сценариев кроме SSP1-1.9 это озеро, возможно, будет подпружено моренной грядой с погребенным под ней мёртвым льдом мощностью до 60 метров. Соответственно, максимальная глубина озера в 40 м, предсказанная в работе Лаврентьев и др. (2020) может быть значительно увеличена в следствие подпруживания. Предположительно, в период около 2045-2055 гг. в долине ледника Джикаугенкез следует ожидать наибольшую опасность прорывных наводнений на Эльбрусе в XXI веке. Возможно, в этот период толстое ледниковое плато трансформируется в ледник, впадающий в озеро, и за счет откалывания айсбергов будет отступать быстрее, чем предсказано в модели.

Однако опасность существования озера определяется не только его размером. Маленькие озера также могут стать причиной катастрофических наводнений объемом больше, чем само озеро, из-за каскадного эффекта ниже по течению. Обращает на себя внимание озеро №5, образование которого ожидается в 2030-х гг. перед ледником Джикаугенкёз и вероятно будет до 10 лет подпружено мёртвым льдом под мореной (Рис. 17в). При предсказании времени образования ледниковых озер, которые находятся ниже 3500 м, основная неопределенность возникает из-за упрощений, принятых в гляциологической модели, в то время как выбор климатического прогноза не так важен. Переуглубления ложа, находящиеся выше 3500 м, согласно модельным результатам, могут превратиться в озера после 2050 года, и основной временной разброс в этом случае вносится неопределенностью климатического сценария и растет со временем. Так, к 2060 году при сценарии SSP1-2.6 прогнозируется образование пяти озер на месте языка ледника Джикаугенкез (№5,6,7,8,9), двух озер на месте ледника Уллучиран (№1,2), и одного, №17 – на месте Большого Азау, после чего ледники стабилизируются. При сценарии SSP5-8.5 в 2060 году, в дополнение к перечисленным для SSP1-2.6, образуется озеро №10 на месте ледника Кюкюртлю, а также №3 на Уллучиране. В 2070 году образуются озера

№14,15,16 на месте ледника Большой Азау, озеро №18 на месте ледника Гарабаши. К 2080 году будет образовано озеро №4 на месте ледника Карачаул, и озеро №11 на месте ледника Ирик. Остальные переуглубления, по прогнозу, останутся подо льдом.

Выводы

В нашем исследовании впервые к глобальной гляциологической модели был подключен разработанный нами блок, описывающий эволюцию моренного чехла. Модельный блок, подключенный к GloGEMflow, был использован для изучения роли моренного покрова в динамике ледников на примере Северного Кавказа.

При самом теплом климатическом сценарии (SSP5-8.5) к концу XXI века может произойти почти полная дегляциация региона (за исключением ледников Эльбруса). При самых теплых климатических сценариях SSP5-8.5, SSP3-7.0, в 2100 году на Эльбрусе будет сосредоточено до 84% оставшегося по прогнозу льда в бассейне Терека, и до 98% оставшегося льда в бассейне Кубани. Лишь при умеренном потеплении (сценарии SSP1-2.6, SSP1-1.9) ледники по прогнозу могут достичь равновесия с климатом до конца века, при этом потери льда составят $57\pm 9\%$ от объема льда на 2020 год при реализации сценария SSP1-2.6 и $45\pm 8\%$ в случае сценария SSP1-1.9. Прогнозируемый объем льда в бассейне Кубани убывает в два раза быстрее, чем в бассейне реки Терек, так как ледники расположены ниже и не могут отступить на большие высоты.

Моренный покров задерживает потерю массы льда в течение столетия, особенно в масштабах отдельных долинных ледников, но оказывает незначительное влияние на объемы льда и количество исчезнувших ледников к 2100 году. Ограниченное влияние моренного покрова в бассейнах Терека и Кубани показывает, что изолирующий эффект морены не способен компенсировать увеличение таяния для всех сценариев изменения климата. В то же время моделирование пространственных характеристик моренного покрова служит для улучшения понимания механизмов будущей эволюции ледников. Пытаясь оценить, насколько «неправильны» модели ледников, не учитывающие эволюцию моренного покрова, можно сделать к следующие выводы:

(1) Если необходимо оценить крупномасштабные изменения объема льда, то учитывать эволюцию моренного покрова не требуется.

(2) При разработке краткосрочного прогноза (на 20-40 лет вперед) для крупных долинных ледников, учет эволюционирующего моренного чехла необходим;

(3) Если для поставленных задач важна будущая геометрия и динамика ледников (расположение фронта, распределение баланса массы, объем областей мёртвого льда, скорость поверхности для оценки мощности ледника путем инверсии), то предпочтительнее моделирование эволюции ледников с учетом меняющегося моренного покрова.

Изменение мощности моренного покрова в бассейнах рек Терек и Кубань нелинейно. Мощность морены растет в среднем до 2035 года, пока отступление фронтов ледников относительно медленное, вследствие чего моренный материал может накапливаться на языках ледников. Однако после 2035 года (в среднем) средневзвешенная мощность морены убывает. При этом мощность морены убывает к концу века тем сильнее, чем теплее климат. Дело в том, что при реализации сценариев с большим увеличением температуры отделение наиболее мощных прифронтовых участков морены из-за быстрого отступления ледников опережает накопление морены. Тем не менее, доля покрытой мореной площади ледников растет к концу века тем больше, чем теплее прогнозируемый климат. В результате влияние

морены на общий объем льда убывает к концу века тем сильнее, чем теплее климат. Поэтому для оценки влияния моренного покрова на эволюцию ледников недостаточно проследить конечные результаты моделирования на 2100 год.

Отложение тилла в прогляциальном поясе способствует образованию моренно-подпрудных озер с возможным включением мёртвого льда, что в свою очередь создает благоприятные условия для прорывных паводков из-за ненадежности плотины (Benn et al., 2012; Petrakov et al., 2018). Новый модуль моренного покрова для модели GloGEMflow дает возможность прогнозировать образование областей мёртвого льда и прогляциальных озер в будущем, по мере отступления ледников. В период между 2030 и 2040 годами прогнозируется максимальный объем мёртвого льда в целом по региону. Этот период может соответствовать значительному накоплению талой воды за мёртвым льдом, что повышает потенциал образования озер и связанный с этим риск возникновения прорывных наводнений.

На Эльбрусе будет образовано по крайней мере 17 новых озер. При умеренном потеплении, SSP1-2.6, будет образовано 8 озер. Самое большое озеро на леднике Джикаугенкез будет подпружено обширной областью покрытого мореной мёртвого льда в 2040-2050-х годах, причем запруда может достигать толщины 60 м. Согласно прогностическим расчетам, у границы ледникового плато Джикаугенкез примерно в этот период может сформироваться приледниковое озеро, и сопутствующее этому айсбергообразование может ускорить процесс отступления края плато.

Прогнозы формирования областей мертвого льда и новых прогляциальных озер актуальны для предсказания селевой опасности в регионе и разработки соответствующих мер по смягчению последствий для минимизации потенциального воздействия на населенные пункты и инфраструктуру, расположенные ниже по течению.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.8:

1. **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; 61(4): 620-636. <https://doi.org/10.31857/S2076673421040111> (Импакт-фактор по WOS: JIF = 0.7)
2. **Постникова Т.Н., Рыбак О.О.** Глобальные гляциологические модели: новый этап в развитии методов прогнозирования эволюции ледников. Часть 2. Постановка экспериментов и практические приложения. Лёд и Снег. 2022;62(2):287-304. <https://doi.org/10.31857/S2076673422020133> (Импакт-фактор по WOS: JIF = 0.7)
3. **Newall J.C.H., Думова (Постникова) Т., Serra E., Blomdin R., Fredin O., Glasser N.F., Saganuma Y., Harbor J.M., Stroeven A.P.** The glacial geomorphology of western Dronning Maud Land, Antarctica // Journal of Maps. 2020. Vol. 16. № 2. P. 468-478, DOI: 10.1080/17445647.2020.1761464 (Импакт-фактор по WOS: JIF = 2.2)
4. **Yushkova O., Думова (Постникова) Т.** Modelling the reflection of radio waves from cold glaciers // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1632. P. 012011–012011. doi:10.1088/1742-6596/1632/1/012011 (Импакт-фактор по Scopus: SJR = 0.18)

Публикации в материалах конференций:

5. *Yushkova O., Думова (Постникова) Т., Popovnin V.*: Radio-wave reflectivity from cold glaciers, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-21606, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-21606>
6. *Юшкова О.В., Думова (Постникова) Т.Н.* Особенности электрофизических свойств «холодных» ледников // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2020. С. 134-140.
7. *Думова (Постникова) Т., Rybak, O., and Popovnin, V.* Towards elaboration of a surface mass balance model of a mountain glacier using a stochastic weather generator, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-18265, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-18265>, 2020
8. *Думова (Постникова) Т., Rybak, O., Zekollary, H., Huss, M., Korneva, I., Gubanov, A., Nosenko, G.*: Modelling future evolution of glaciation in the Central Caucasus, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-9032, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9032>.
9. *Postnikova T., Rybak O., Zekollari H., Huss M., Gubanov A., Nosenko G.* Debris cover effect on the evolution of glaciation in the Northern Caucasus, 2022, EGU22-7736, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-7736>
10. *Postnikova T., Rybak O., Zekollari H., Huss M., Gubanov A.* Debris cover effect on the evolution of glaciation in the Northern Caucasus in the 21st century. Student for Student Summer School, Obergurgl, Austria. September 5-9 2022
11. *Postnikova T., Rybak O., Zekollari H., Huss M., Gubanov A., Krylenko I., Kornilova E., Nosenko G.* Debris Cover Effect On The Evolution Of Glaciation And Runoff In The Northern Caucasus. International Mountain Conference, Innsbruck, Austria, September 11-15 2022. https://www.imc2022.info/wp-content/uploads/static/abstracts/fs_72/abstract_fs_72_id_528_dymova_taisiya.pdf
12. *Postnikova T., Rybak O., Zekollari H., Huss M., Gubanov A.* Future evolution of the debris cover on the glaciers in the Northern Caucasus. 26th Alpine Glaciology Meeting, Zurich, Switzerland, February 9-10 2023.
13. *Postnikova, T., Rybak, O., Zekollari, H., Huss, M., and Gubanov, A.* (2023) Future evolution of glaciers in the Caucasus: focus on debris-cover evolution., EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-893, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-893>
14. *Dymova, T., Rybak, O., Korneva, I., Zekollari, H., Fürst, J., Kutuzov, S., Lavrentiev, I.* (2023): Projections of Elbrus glaciers throughout the 21st century, XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) (Berlin 2023). <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4261>