

СОКРАЩЕНИЕ МАСШТАБОВ ГОРНОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА «ПРИЭЛЬБРУСЬЕ» В КОНТЕКСТЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Рыбак Олег Олегович

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник
ФГБУН «ФИЦ «Субтропический научный центр РАН», Сочи
o.o.rybak@gmail.com

Рыбак Елена Алексеевна

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник
ФГБУН «ФИЦ «Субтропический научный центр РАН», Сочи
elena.rybak@gmail.com

Корнева Ирина Алексеевна

к.г.н., старший научный сотрудник
ФГБУН «Институт географии РАН», Москва
comissa@mail.ru

Аннотация. Ледниковый комплекс Эльбруса является ключевым объектом на территории Национального парка «Приэльбрусье». Изменения регионального климата являются причиной постепенной деградации ледников Эльбруса, что в перспективе может вызвать ряд объективных сложностей для устойчивого развития туристско-рекреационной отрасли в регионе. В статье проанализировано сокращение оледенения Эльбруса за последнее столетие, а также аналогичные тенденции в изменении оледенения Кавказа в целом, определены минимальный и максимальный из вероятных сценариев климатических изменений в регионе и их последствия для ледников Эльбруса.

Ключевые слова: горные ледники, изменение климата, климат, оледенение Эльбруса, Приэльбрусье, туризм, устойчивое развитие, Центральный Кавказ.

Национальный парк «Приэльбрусье» был создан в 1986 г. Он занимает площадь более 100 тыс. га на территории двух районов Кабардино-Балкарской Республики. Расположенный в среднегорной и высокогорной зоне Центрального Кавказа, национальный парк включает ледниковый комплекс Эльбруса, который является крупнейшим на Кавказе массивом горного оледенения и состоит из более чем двух десятков ледников (Ледники и климат Эльбруса, 2020). Не будет преувеличением считать Эльбрус основным аттрактивным фактором для существования и развития туристической отрасли как национального парка, так и в регионе в целом. В условиях климатических изменений ледники Эльбруса претерпевают постепенную трансформацию, сокращается их объем и площадь. Поскольку основное направление туристско-рекреационной специализации Приэльбрусья связано с горными лыжами, то потепление климата и деградация оледенения Эльбруса в перспективе ближайших десятилетий будет своеобразным

вызовом для туристической отрасли. По всей видимости потребуются ее диверсификация и определенная смена парадигмы регионального развития.

Долгосрочный прогноз изменений регионального климата и горного оледенения основан на применении методов математического моделирования. В настоящей работе нами приводятся результаты расчетов минимального и максимального с точки зрения будущего потепления климатических сценариев и соответствующих им изменений характеристик ледников Эльбруса.

1. Деградация горного оледенения Кавказа во второй половине 20-го и в начале 21-го века.

Сокращение масштабов горного оледенения Большого Кавказа, начиная со второй половины XX века было зафиксировано самыми различными методами, включая как прямые инструментальные наблюдения, так и дистанционные: отмечалось сокращение площади, отступление фронтов ледников, уменьшение их толщины и, соответственно, уменьшение общего объема оледенения. Так, согласно П.М. Лурье и В.Д. Панову (2014) площадь оледенения северного склона Большого Кавказа в 20-м в. уменьшилась на 849 км² (52,6%), но число ледников за этот же период выросло на 245 (19%) за счет фрагментации оледенения. Площадь ледников Большого Кавказа сокращалась в среднем за период 1960–2014 гг. на 0,53% в год (Tielidze, Wheate, 2018). В первое десятилетие 21-го в. площадь ледников Главного Кавказского хребта сократилась по сравнению с концом 20 в. на 4,7% (Shahgedanova et al., 2014). За период 2000–2020 гг. их площадь сократилась на 1060,9±33,6 км² или на 23,2±3,8% (Tielidze et al., 2022). Изменение оледенения Эльбруса происходило аналогично указанным тенденциям, характерным для Кавказа в целом. Площадь оледенения Эльбруса с 1997 по 2017 гг. сократилась на 10,8%, а объем льда на 22,8%. Объем оледенения Эльбруса составлял в 2017 г. 5,03±0,85 км³ (для сравнения – в 1957 г. объем составлял около 7,6 км³), 68% которого находилось ниже 4000 м н.у.м. со средней толщиной снежно-ледовой толщи 44,6±7,3 м. Площадь оледенения сократилась на 10,8% с 1997 по 2017 г.: с 125,76±0,65 км² до 112,20±0,58 км². Баланс массы ледников Эльбруса сокращался на 0,55±0,04 м водн. экв./год за рассматриваемый период, что в три раза быстрее, чем в 1957–1997 гг. Ледники в восточном секторе Эльбруса сокращались с большей скоростью: 0,83 м водн. экв./год, в южном на 0,54 м водн. экв./год (Kutuzov et al., 2019).

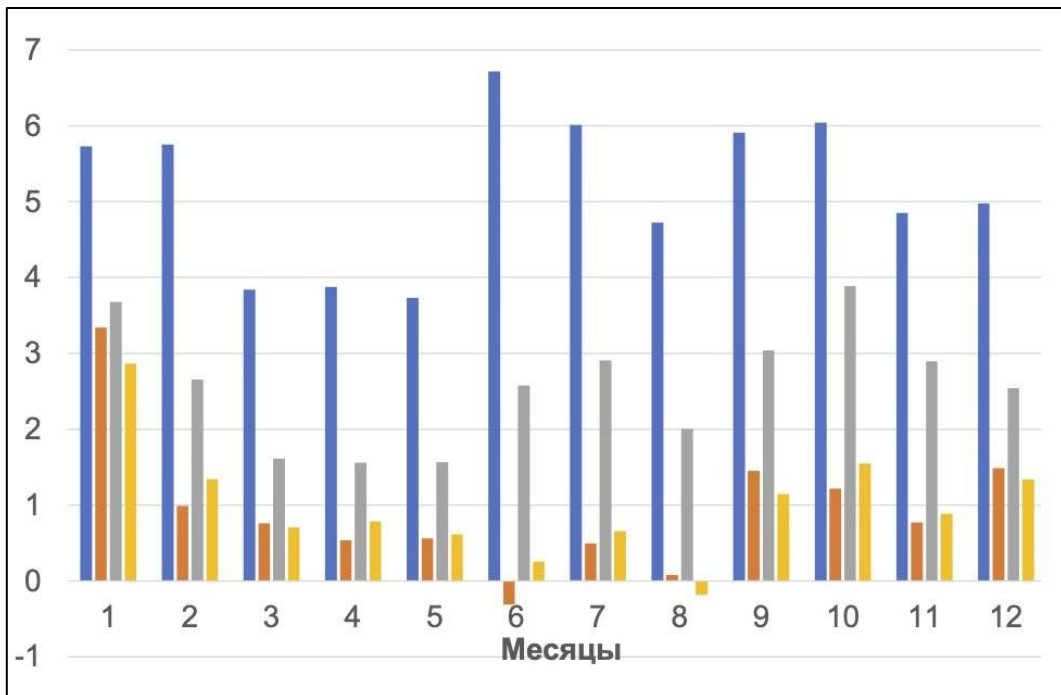
Продолжительные непрерывные наблюдения за компонентами баланса массы на Эльбрусе ведутся с 1982 г. на леднике Гарабаши (южный склон массива). Таким образом, контрольные модельные расчеты могут быть сопоставлены только с наблюдениями на Гарабаши до высоты около 4500 м н.у.м. За период 1982–1997 гг. средний баланс массы л. Гарабаши был слабо положительный и составил +0,09 м водн. экв., а с 1998 по 2017 гг. стал отрицательным и составлял около –0,63 м в.э. (Рототаева и др., 2019).

2. Климатические проекции в регионе Эльбруса.

Построение региональных климатических проекций основано на результатах глобального климатического моделирования на моделях общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Общепринятый подход к регионализации результатов глобального климатического моделирования состоит в том, что эволюция климата в относительно небольшом регионе воспроизводится с большим пространственным разрешением, 10–50 км, региональными (мезомасштабными) климатическими моделями в соответствии с граничными условиями, передаваемыми из МОЦАО (Морозова, Рыбак, 2015). В настоящем исследовании были использованы проекции регионального климата, полученные для нескольких макрорегионов мира на ансамблях региональных моделей в рамках программы CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment). Поскольку поля, генерируемые МОЦАО-РКМ содержали систематические ошибки, перед их практическим применением они были соответствующим образом скорректированы с использованием данных наблюдений в соответствии с методикой (Корнева и др. 2023, в печати). Аномалии 2006–2100 гг. отсчитывались от средних значений за исторический период 1977–2005 гг.

Статистическая регионализация в узлы регулярной пространственной сетки 25 и 50 м проводилась с помощью заданных постоянных значений вертикальных градиентов температуры воздуха и осадков. Для температуры воздуха были взяты значения, рассчитанные по данным наблюдений на 23 метеостанциях Кавказского региона (Морозова, Рыбак, 2017). Значение градиента в летний период согласуется с данными наблюдений на южном склоне Эльбруса (Рототаева и др., 2019), где вертикальный градиент с мая по август составлял от $-5,3^{\circ}\text{C км}^{-1}$ до $-7,1^{\circ}\text{C км}^{-1}$. Более детальные наблюдения на Эльбрусе вплоть до Восточной Вершины (Торопов и др., 2016) показали, что температурный градиент в период абляции составляет $-6^{\circ}\text{C км}^{-1}$ в нижней части склона (2150–3850 м) и $-7^{\circ}\text{C км}^{-1}$ в верхней части склона (3850–5150 м). Поскольку для расчета орографической составляющей осадков нужны метеорологические параметры с высоким пространственным разрешением, как по вертикали, так и по горизонтали, в настоящем исследовании ввиду крайней ограниченности исходных данных плювиометрический градиент был задан в виде констант отдельно для теплого и холодного сезонов. Полученные в результате расчетов суточные поля аномалий температуры и осадков осреднялись по области, занятой ледниками Эльбруса, за каждый календарный месяц и за прогностические десятилетия до 2100 г. Эти данные для двух климатических сценариев – «умеренного» RCP2.6 и «экстремального» RCP8.5 (рис. 1А, Б) были использованы в расчетах. Заметим, что аномалии осадков во всех случаях имеют выраженный сезонный ход с очевидным максимумом в холодный период года (рис. 1Б). Это обстоятельство, по-видимому, должно в некоторой степени нивелировать влияние прогнозируемого увеличения температуры воздуха, особенно в теплый период года (рис. 1А), на удельный баланс массы ледников Эльбруса (см. раздел 3).

А



Б

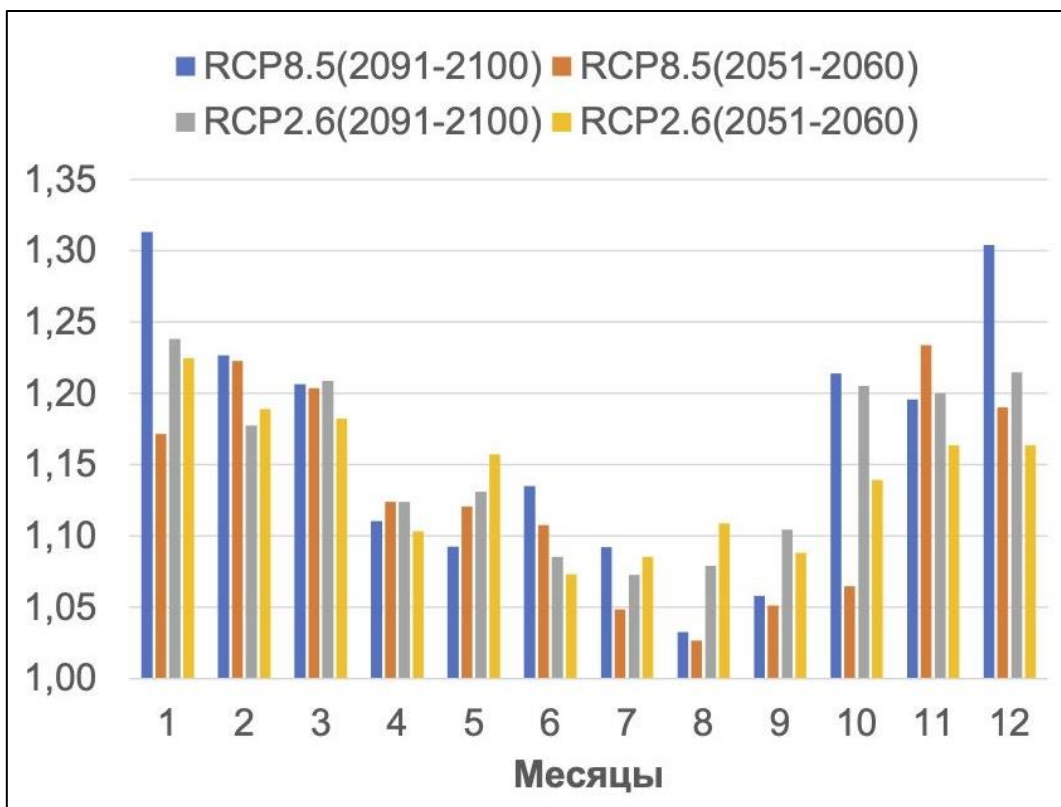


Рисунок 1 – Прогнозируемые аномалии приземной температуры воздуха, °С, на территории ледникового комплекса Эльбруса: А – осредненные за календарный месяц и за десятилетия 2051–2060 и 2091–2100 гг., в соответствии с климатическими сценариями RCP2.6 и RCP8.5; Б – аналогично на месячные суммы осадков, относительные величины.

3. Моделирование и прогноз поверхностного баланса массы ледникового комплекса Эльбруса.

3.1. Краткое описание модели и контрольный эксперимент. Поверхностный баланс массы определяет приход и расход массы, что наряду с перераспределением массы течением льда под действием силы тяжести формирует, в конечном итоге, конфигурацию ледника. Скорости течения льда на поверхности ледников Эльбруса относительно невелики, хотя, по-видимому, поле течения неравномерно из-за значительных различий в поле толщины льда (рис. 2А). Таким образом, эволюция ледников Эльбруса будет определяться, главным образом, поверхностным балансом массы. В настоящем исследовании динамический фактор был исключен из расчетов, кроме того, в прогностических расчетах конфигурация ледникового комплекса считалась неизменной и соответствующей измерениям 2017 г. (Kutuzov et al., 2019).

Математическая модель, использованная в настоящей работе, в целом соответствует описанной в более ранних исследованиях (Рыбак и др., 2019; Рыбак, Рыбак, 2018). Существенные изменения были внесены в радиационный блок модели – был использован новый алгоритм для расчета прозрачности атмосферы, основанный на данных о ее составе в регионе Северного Кавказа, учтены топографические эффекты перераспределения нисходящей коротковолновой и длинноволновой радиации и некоторые другие факторы (Рыбак и др., 2021, 2022). Расчеты проводились в области, занятой ледниковым комплексом Эльбруса (рис. 2А) с учетом затеняющего эффекта, который рассчитывался с учетом влияния рельефа во всей области. Шаг пространственной сетки составил 50 м.

В контрольном эксперименте входящими значениями климатического форсинга являлись среднесуточные значения приземной температуры воздуха в 2006 г. на метеостанции Терскол, пересчитанные в поле температуры на Эльбрусе с учетом данных наблюдений на Западном плато (Торопов и др., 2016). Поле осадков на Эльбрусе рассчитывалось с учетом плювиометрического градиента (Verhaegen et al., 2020) и того обстоятельства, что с высоты приблизительно 4000 м н.у.м. количество осадков перестает увеличиваться из-за прекращения роста влагосодержания атмосферы (Ледники и климат Эльбруса, 2020). Заметим, что поле аккумуляции на Эльбрусе не тождественно полю твердых осадков и осложняется влиянием ряда трудно формализуемых факторов, таких как метелевый перенос (Рототаева и др., 2019) и лавинное питание.

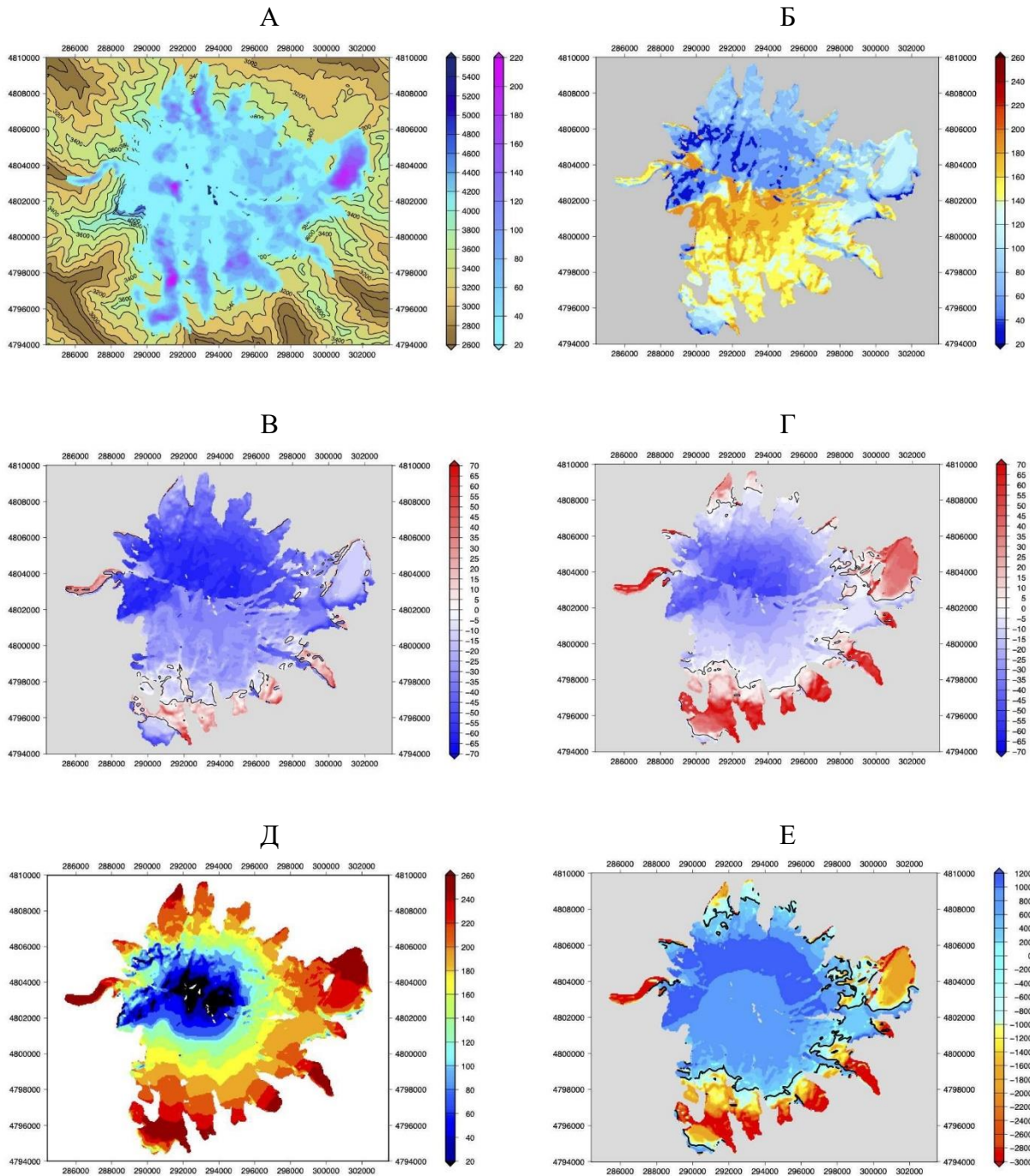


Рисунок 2 – Цифровая модель рельефа исследуемой территории и результаты контрольного эксперимента: А – Цифровая модель рельефа на территории вокруг ледникового комплекса Эльбруса, м н.у.м., и толщина льда ледникового комплекса, м; Б – среднегодовая суммарная солнечная радиация, приходящая на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам с учетом облачности, Вт м⁻²; В, Г – радиационный баланс на поверхности ледника, Вт м⁻², в среднем за год (В) и за июль (Г), тонкой сплошной линией показано положение нулевого баланса; Д – количество дней с абляцией; Е – поверхностный баланс массы, мм водн. экв., сплошной черной линией показана снеговая линия.

Положение солнца на небосводе для расчета суммарной солнечной радиации рассчитывалось по Iqbal (1983). Для Эльбруса характерно значительное

влияние ориентации склонов на количество прямой радиации, приходящей непосредственно на поверхность ледника (рис. 2Б). Северный склон получает ее значительно меньше южного и, соответственно, более крутые склоны южной ориентации – больше более пологих склонов в средних частях окраинных ледников этой же ориентации. На северном склоне картина обратная. Такое распределение суммарной радиации определило поле радиационного баланса, рассчитанное в контрольном эксперименте (рис. 2В, Г). Радиационный баланс является основным фактором, определяющим скорость поверхностного таяния и количество дней в году, когда таяние возможно (рис. 2Д). Заметим, что сам факт таяния в соответствии с модельными расчетами возможен вплоть до самых вершин Эльбруса. Это косвенно подтверждается прямыми метеонаблюдениями на Восточной вершине, когда фиксировались положительные значения температуры воздуха (Михаленко и др., 2021). Снеговая линия расположена на высоте примерно 3750 м н.у.м.

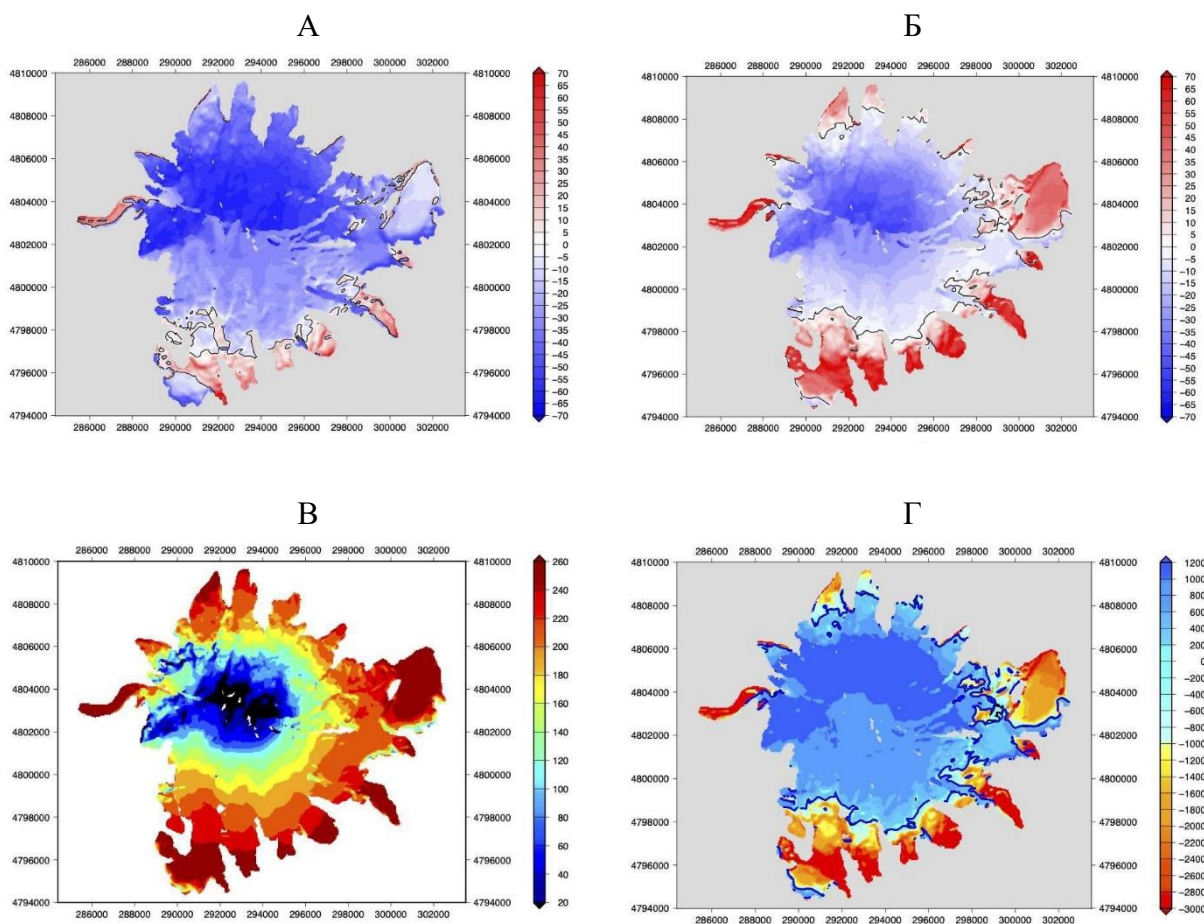


Рисунок 3 – Результаты расчетов согласно сценарию RCP2.6 для десятилетия 2051–2060 гг.: А, Б – радиационный баланс на поверхности ледника, Вт м^{-2} , в среднем за год (А) и июль (Б), тонкой сплошной линией показано положение нулевого баланса; В – количество дней с абляцией; Г – поверхностный баланс массы, мм водн. экв., сплошной синей линией показана снеговая линия, черной – снеговая линия в контрольном эксперименте.

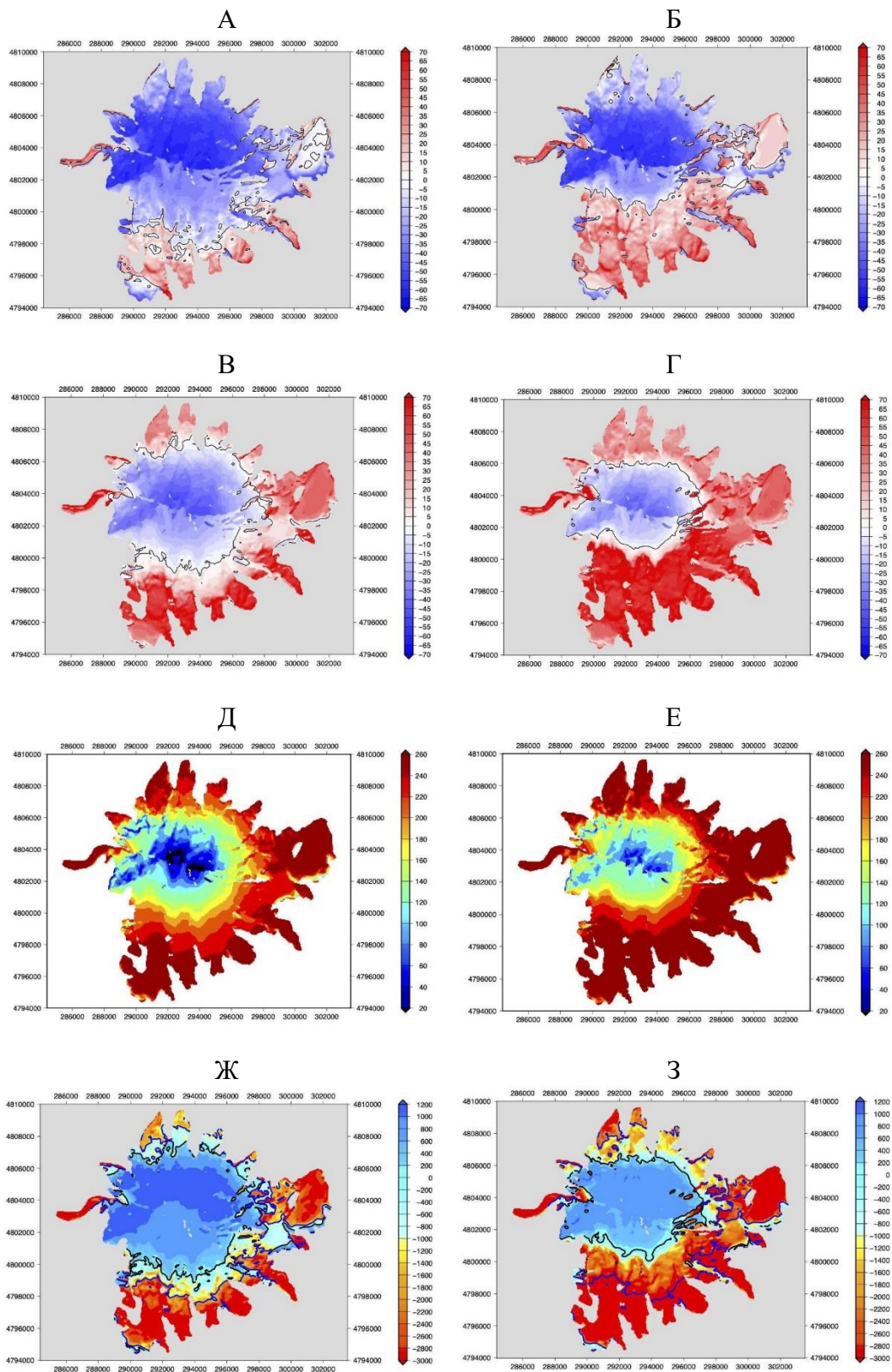


Рисунок 4 – Результаты расчетов согласно сценариям RCP2.6 (А, В, Д, Ж) и RCP8.5 (Б, Г, Е, З) для десятилетия 2091–2100 гг.: А, Б, В, Г – радиационный баланс на поверхности ледника, Вт м⁻², в среднем за год (А, Б) и июль (В, Г), тонкой сплошной линией показано положение нулевого баланса; Д, Е – количество дней с абляцией; Ж, З – поверхностный баланс массы, мм водн. экв., сплошной черной линией показана снеговая линия, черной – снеговая линия в контрольном эксперименте.

3.2 Прогностические эксперименты. Прогностические расчеты были выполнены для двух климатических сценариев и двух периодов времени (см. раздел 2). Результаты для середины столетия (2051–2060 гг.) для обоих сценариев очень схожи, поскольку ряды климатического форсинга также мало различаются (рис. 1А, Б). В связи с этим на рисунке 3 приведены прогностические поля только для сценария RCP2.6. По сравнению с контрольным экспериментом увеличится количество дней с абляцией (рис. 3В). Рост приземной температуры приведет к уменьшению доли твердых осадков и снижению альбедо, что в свою очередь явится причиной увеличения поглощенной солнечной радиации и ускорения таяния. Тем не менее, положение снеговой линии практически не будет отличаться от ее положения в контрольном эксперименте. Это означает, что до середины столетия увеличение зимних осадков компенсирует увеличение объемов таяния вследствие увеличения количества поглощенной солнечной радиации и приземной температуры воздуха (рис. 2Е, 3Г).

Более значительные изменения прогнозируются к концу 21-го в. (рис. 4). В случае реализации сценария RCP2.6 радиационный баланс станет заметно более положительным. Произойдет это не из-за роста количества прямой солнечной радиации (оно остается таким же, как и в контрольном эксперименте). К уже описанным выше последствиям (в отношении радиационного баланса, (рис. 4А–Г), но более заметным, чем в середине века, приведет рост температуры воздуха. Снеговая линия поднимется приблизительно на 200 м по сравнению с контрольным экспериментом в среднем по всему ледниковому комплексу – несколько больше на южном склоне и меньше на северном (рис. 4Ж). В случае реализации сценария RCP8.5 ожидается, что изменения будут гораздо более ощутимыми, главным образом из-за роста температуры воздуха в летний сезон на 6–7 °С. Снеговая линия поднимется на 600 м по сравнению с контрольным экспериментом. Рост осадков в декабре и январе на 30% смягчит последствия роста температуры. Расчеты показывают, что если количество осадков не увеличится, то поверхностный баланс массы станет еще более отрицательным, а снеговая линия поднимется еще на 200 м.

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания ФИЦ СИЦ РАН FGRW-2021-0015, № госрегистрации 122032300363-3

Список использованных источников

- Ледники и климат Эльбруса. М., СПб: Нестор-История, 2020. 372 с.
- Корнева И.А., Рыбак О.О., Сатылканов Р.А. Климатические проекции по данным проекта CORDEX в регионах Центрального и Внутреннего Тянь-Шаня // *Фундаментальная и прикладная климатология*. Т. 9, № 2. 2023. (в печати)
- Лурье П.М., Панов В.Д. Изменение современного оледенения северного склона Большого Кавказа в XX в. и прогноз его деградации в XXI в. // *Метеорология и гидрология*. № 4. 2014. С. 68–76.

Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Торопов П.А., Владимирова Д.О., Абрамов А.А., Мацковский В.В. Гляциоклиматические исследования Института географии РАН в кратере Восточной вершины Эльбруса в 2020 году // Лед и снег. Т. 61, № 1. 2021. С. 149–160.

Морозова П.А., Рыбак О.О. Регионализация данных глобального климатического моделирования для расчёта баланса массы горных ледников // Лед и Снег. Т. 57, № 4. 2017. С. 437–452.

Рототаева О.В., Носенко Г.А., Керимов А.М. и др. Изменения баланса массы ледника Гарабаши (Эльбрус) на рубеже XX–XXI вв. // Лёд и Снег. Т. 59, № 1. 2019. С. 5–22.

Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Яицкая Н.А. и др. Модельные исследования эволюции горных ледников на примере ледника Сары-Тор (Внутренний Тянь-Шань) // Криосфера Земли. Т. 23, № 3. 2019. С. 33–51.

Рыбак О.О., Сатылканов Р., Рыбак Е.А. и др. О параметризации коротковолновой солнечной радиации в гляциологических приложениях // Метеорология и Гидрология. № 8. 2021. С. 5–20.

Рыбак О.О., Сатылканов Р., Рыбак Е.А. и др. Параметризации противоизлучения атмосферы в гляциологических приложениях // Метеорология и Гидрология. № 9. 2022. С. 5–19.

Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С. и др. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // Лёд и Снег. Т. 56, № 1. 2016. С. 5–19.

Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation. Toronto et al.: Academic Press, 1983. 389 pp.

Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A. et al. Volume Changes of Elbrus Glaciers From 1997 to 2017 // Frontiers in Earth Sciences. Vol. 7, Article 153. 2019. 16 pp.

Rybak O.O., Rybak E.A. Model-based calculations of surface mass balance of mountain glaciers for the purpose of water consumption planning: focus on Djankuat Glacier (Central Caucasus) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 107. 2018.

Shahgedanova M., Nosenko G., Kutuzov S. et al. Deglaciation of the Caucasus Mountains, Russia/Georgia, in the 21st century observed with ASTER satellite imagery and aerial photography // The Cryosphere. Vol. 8, №. 6. 2014. P. 2367–2379.

Tielidze L.G., Jomelli V., Nosenko G.A. Analysis of Regional Changes in Geodetic Mass Balance for All Caucasus Glaciers over the Past Two Decades // Atmosphere. Vol. 13, Article 256. 2022.

Tielidze L.G., Wheate R.D. The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // The Cryosphere. Vol. 12. 2018. P. 81–94.

Verhaegen, Y., Huybrechts, P., Rybak, O., Popovnin, V. Modelling the evolution of Djankuat Glacier, North Caucasus, from 1752 until 2100 AD // The Cryosphere. Vol. 14, №. 11. 2020. P. 4039–4061.