

ОТКЛИК ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ) НА РОСТ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

О.О. Рыбак^{1,2}, Е.А. Рыбак^{1,2}

¹Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи

²Филиал Института природно-технических систем, г. Сочи

E-mail: o.o.rybak@gmail.com, elena.rybak@gmail.com

Аннотация. Оледенение Кавказа постоянно сокращалось на протяжении 20-го и в начале 21-го столетия. Горные ледники, накапливая воду в течение холодного сезона, высвобождают ее в период таяния, формируя, таким образом, гидрологический режим в горных и предгорных регионах. Этот источник пресной воды чрезвычайно важен для промышленности и сельского хозяйства. В связи с этим стратегическое планирование регионального социально-экономического развития требует тщательной оценки ледникового стока в условиях климатических изменений. Прогноз ледникового стока является перспективным направлением для математического моделирования. Поскольку, из-за недостатка данных наблюдений и значительных вычислительных затрат, этот метод можно применять лишь к небольшому количеству ледников, целесообразно сосредоточить усилия на так называемых опорных (реперных) ледниках. Таковым для Центрального Кавказа является Джанкуат, типичный ледник на северном склоне Большого Кавказского хребта. Это один из наиболее изученных ледников, регулярные наблюдения на котором проводятся в течение последнего полувека.

Для оценки будущих изменений ледника на повышение приземной температуры воздуха нами применяется 3-х мерная модель течения льда, объединенная с моделью баланса массы и энергии на поверхности ледника. В качестве основы для климатического форсинга используются ряды наблюдений на близлежащих метеостанциях Терскол и Местиа. В прогностических численных экспериментах рассчитываются изменения конфигурации ледника и толщины льда. Показано, что ледник практически полностью исчезает при росте температуры воздуха на 3 °С. Время отклика ледника на внешнее воздействие зависит от величины роста температуры. Моренный чехол значительно замедляет скорость таяния, способствуя увеличению времени отклика.

Ключевые слова: климат, горный ледник, математическая модель, численный эксперимент, баланс массы, моренный чехол, ледниковый сток

Введение

Горные ледники – это уникальные природные объекты, чья динамика во многом определяется климатическими условиями. Ледники аккумулируют атмосферные осадки в холодный период года и отдают их в теплый период, в значительной мере формируя гидрологический режим горных и предгорных территорий. В прошедшие десятилетия наблюдалось отступление горных ледников по всей планете, что явилось причиной нарушения локального гидрологического режима, увеличения частоты опасных явлений – селей, прорыва ледниковых озер и др., незначительного повышения среднего глобального уровня моря и даже возникновения угроз для развития туризма (более подробно в [1] и в ссылках в этой работе). Не был исключением и Кавказ, в частности его северный макросклон, где площадь ледников в XX веке сократилась более чем наполовину [2, 3]. Деградация горного оледенения Кавказа, по всей видимости продолжится и в текущем столетии. Учитывая его роль как регулятора речного стока в регионе с быстрорастущим населением и развивающейся экономикой, прогноз изменения ледникового стока в условиях потенциального потепления климата –

это актуальная задача, очевидным инструментом решения которой представляется математическое моделирование. В настоящее время это направление бурно развивается во многих исследовательских центрах мира, однако по большей части сводится к моделированию поверхностного баланса массы и к экстраполяции результатов в будущее без должного учета динамики ледников и изменений их площади и объема. Примеры применения трехмерных динамических математических моделей для целей прогноза не столь многочисленны (например, [1, 4–6]), в которых описаны результаты численных прогнозов динамики некоторых альпийских ледников; аналогичные исследования для ледников Кавказа до настоящего времени не выполнялись). В настоящей работе рассматриваются результаты численных экспериментов с трехмерной математической моделью горного ледника, цель которых определить время отклика горного ледника Джанкуат на Центральном Кавказе на мгновенный рост приземной температуры воздуха. Джанкуат, будучи одним из наиболее изученных ледников Кавказа, где регулярные и непрерывные наблюдения за балансом массы ведутся на протяжении половины столетия,

а в последнее десятилетие проводятся метеонаблюдения непосредственно на леднике (только в течение теплого периода), а также ведется ряд других видов наблюдений (за скоростью течения, объемом речного стока в ближайшем к леднику речном створе) и исследований (радиозондирование толщины льда, мониторинг разрастания поверхностной морены) является идеальным объектом для математического моделирования.

1. Краткое описание модели и исходных данных

Использованная в настоящем исследовании математическая модель была детально рассмотрена ранее, в связи с чем ниже мы ограничиваемся кратким ее описанием. Структура модели, достаточно подробно разобранный в [7], не претерпела значительных изменений. В основе динамического блока, отвечающего за расчет скорости течения льда [8], лежит приближение неполного второго порядка [9] – своего рода компромисс между решением полной системы уравнений Стокса, включающей все виды напряжений, и «приближением мелкого льда», которое ограничивается учетом только напряжений сдвига в вертикальной плоскости. Алгоритмы масс-балансового блока основаны на подсчете энергии, доступной для таяния в бесконечно тонком поверхностном слое [10], без учета теплообмена с нижележащими слоями. Теплообмен замороженных (покрытых слоем поверхностной морены – моренным чехлом) областей рассчитывается путем решения одномерного уравнения теплопроводности [11, 12] с учетом теплофизических свойств матери-

ала, слагающего моренный чехол [13] и маски чехла по состоянию на 2010 г. [14]. Ряды климатического форсинга строятся на основе среднесуточных данных наблюдений за приземной температурой воздуха на метеостанции Терскол, которая приводится к высоте около 3100 м, на которой в летние месяцы функционирует автоматическая метеостанция [15], и суточных сумм осадков на метеостанции Местиа [16]. Пересчет рядов осадков в ряды зимнего баланса массы производится с учетом особенностей циркуляции атмосферы, которые являются причиной существенного увеличения количества осадков на леднике Джанкуат по сравнению с наблюдаемым на ближайших сетевых метеостанциях [17], а также с учетом вертикального градиента осадков и лавинного питания [18]. Поле толщины льда в узлах пространственной сетки с шагом 25 м построено на основе данных радиозондирования [19], за исключением области в верхней части ледника – Джантуганского фирнового плато (рис. 1), где прямых измерений не проводилось, а толщина льда оценивалась косвенными методами [20]. Верхняя граница ледника, проходящая по Джантуганскому фирновому плато, проведена достаточно условно. Помимо ледника Джанкуат, плато является областью питания и крупнейшего в Грузии ледника Лекзыр (государственная граница проходит непосредственно по плато). 3-за постоянных, незначительных локальных изменений высоты относительно плоской поверхности плато, линия ледораздела, которая разделяет области питания двух ледников (Лекзыр и Джанкуат) постоянно меняет свое положение [21].

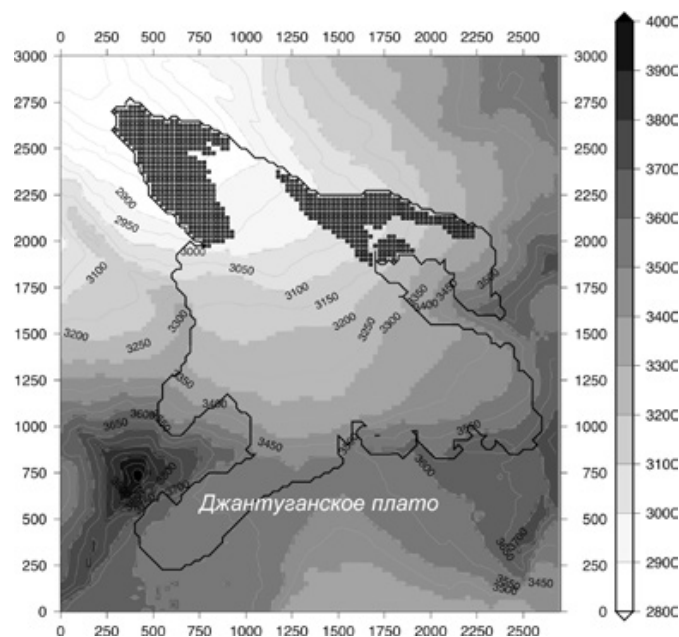


Рис. 1. Карта рельефа (высота над уровнем моря, м) ледника Джанкуат (контуры показаны черной жирной линией) и его окрестностей. Черными квадратиками выделены ячейки, покрытые моренным чехлом.

2. Постановка численных экспериментов

В настоящей работе мы исследуем отклик ледника Джанкуат на повышение приземной температуры воздуха при неизменном количестве атмосферных осадков. Под неизменным количеством подразумевается осредненные суточные суммы осадков за

балансовые годы с 1999/2000 по 2008/2009. Балансовый год начинается 1 октября, когда фактически прекращается поверхностное таяние на леднике, и заканчивается 30 сентября. За это же балансовые годы были усреднены среднесуточные значения приземной температуры воздуха (рис. 2).

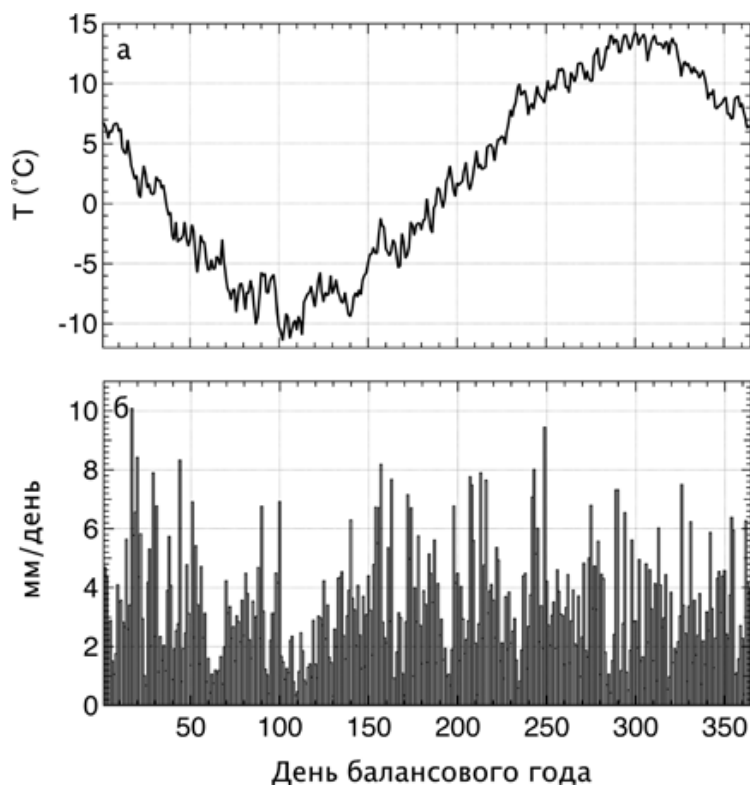


Рис. 2. Среднесуточная приземная температура воздуха (°C) на метеостанции Терскол (а); суточные суммы осадков (мм) на метеостанции Местиа. Данные усреднены для гидрологических лет 1999/2000–2008/2009.

Температура воздуха регулирует скорость поверхностного таяния (в том числе и подморенного), а также определяет соотношение между жидкими и твердыми осадками в общей их сумме. Таким образом, даже при неизменном количестве осадков при росте температуры воздуха снижается доля снега, что негативно сказывается на поверхностном балансе массы. Всего было проведено девять численных экспериментов – один контрольный, в котором температура воздуха оставалась неизменной, и восемь экспериментов, в которых среднесуточная температура была увеличена на 0,125 °C, 0,25 °C, и от 0,5 до 3 °C с шагом 0,5 °C. Во всех экспериментах в течение первых тридцати модельных лет был применено условие постоянства конфигурации, высоты поверхности и толщины льда. Происходило приспособление поля снежного покрова (а, следовательно, и зависящих от него полей альбедо поверхности, вторично замерзшей талой воды, полей турбулентных потоков явного и скрытого тепла) к заданным

климатическим условиям. По прошествии тридцати модельных лет условие постоянства конфигурации, высоты поверхности и толщины льда снимался, и происходила свободная эволюция ледника в течение следующих 300 модельных лет. По сути дела, в экспериментах изучалось время приспособления ледника к новым климатическим условиям, поскольку температура воздуха изменялась не постепенно, как это происходит в реальных условиях, а одновременно.

4. Результаты, обсуждение и заключительные замечания

Изменение конфигурации и поля толщины льда ледника в конце 300-летних численных экспериментов показаны на рис. 3 и 4 (кроме рис. 3а, где показаны результаты реконструкции на основе данных радиозондирования [19] и косвенных оценок на Джантуганском плато [20]). Интересно отметить, что даже при неизменной температуре воздуха

в результате приспособления поля толщины льда к современным климатическим условиям происходит увеличение толщины льда в большинстве окраинных областей, а также в правом рукаве ледника (рис. 3б). Одновременно происходит отступление границы в нижней части ледника там, где он не защищен слоем поверхностной морены. Суммарное сокращение площади составляет около 3 % (рис. 5а), в то же время объем ледника увеличивается на 23 % (рис. 5б). Характерно, что отступления ледника в языковой части не наблюдается. Достижение новой равновесной конфигурации ледника свидетельствует о том, что ледник находится в дисбалансе с условными современными климатическими условиями. Увеличение температуры воздуха даже на

крайне незначительную величину $0,125\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к отступанию языка ледника (покрытого моренным чехлом) приблизительно на 300 м, отчленению правого рукава с одновременным уменьшением толщины слоя льда в периферийных областях (рис. 3в). При росте температуры на $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ равновесный объем все еще на 4 % превышает наблюдаемый, однако площадь ледника сокращается на 13 % (рис. 5). Перелом в тенденции роста объема (наблюдается сокращение 3 %) наступает при повышении температуры на $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 5б). Тает практически весь лед под моренным чехлом на языке ледника, после чего экранирующий эффект чехла, сокращающего подморенное таяние на 20–65 % [11], не предохраняет ледник от ускоренного таяния при

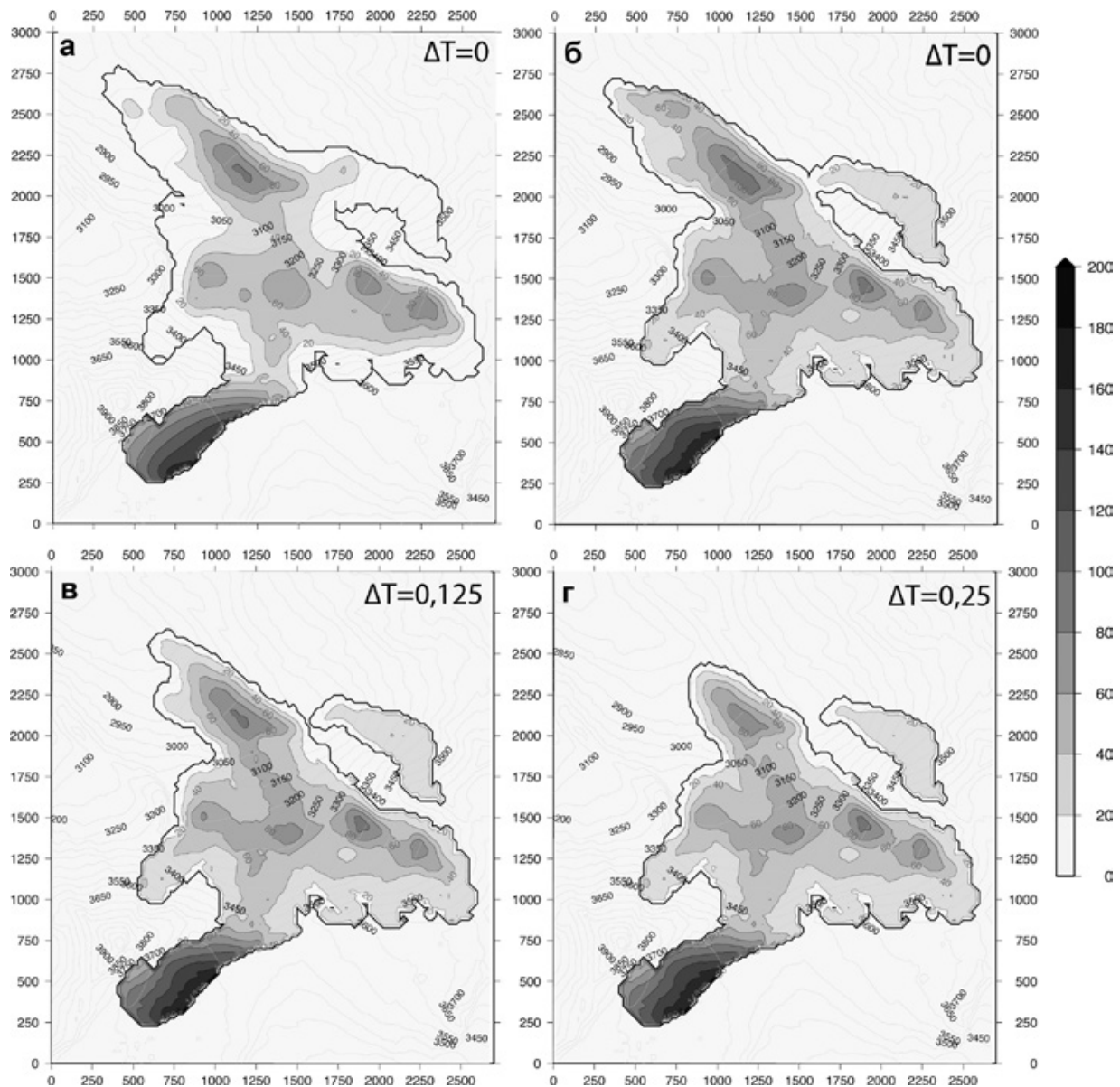


Рис. 3. Конфигурация и толщина льда ледника Джанкуат: а – реконструкция по данным моделирования и косвенных оценок, б-г – расчетные величины, полученные в численных экспериментах при росте приземной температуры воздуха на $0\text{--}0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Боковая оцифровка – в метрах от условной нулевой точки. На цветовой шкале справа – толщина льда (м). Серыми линиями показаны изолинии высоты (м над у.м.).

росте температуры на 1 °С. Это приводит к отступанию нижней границы ледника до высотной отметки приблизительно 3000 м над у.м. (рис. 4б). Ледник при этом теряет 20 % объема и 26 % площади (рис. 5). Дальнейший рост температуры на 2 °С (рис. 4в) и 3 °С (рис. 4г) приводит к тому, что лед остается лишь в высотных зонах, в частности на Джантуганском плато. Заметим, что рост температуры на 3 °С прогнозируется на Центральном Кавказе к концу 21-го столетия в соответствии с расчетами, проведенными на модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) и приведенными к масштабу региона с помощью гибридного метода даунскейлинга [22]. Разумеется, в экспериментах с МОЦАО рост температуры происходит не мгновенно, а постепенно

в течение всего времени проведения эксперимента, однако результат, достигнутый к концу столетия вполне можно сопоставить с задачами, решаемыми в настоящем исследовании.

Время отклика ледника на внешнее воздействие соответствует тому моменту, когда его поведение становится стационарным – его площадь и объем не меняются при сохранении внешнего воздействия. В случае роста температуры на 0,5–3 °С объем перестает меняться приблизительно через 40 модельных лет (рис. 5б), тогда как площадь – через 100–120 лет (рис. 5а). Приспособление объема к равновесному состоянию при малом росте температуры воздуха (на 0,125 и 0,25 °С) требует гораздо большего времени – до 80 лет, а при нуле-

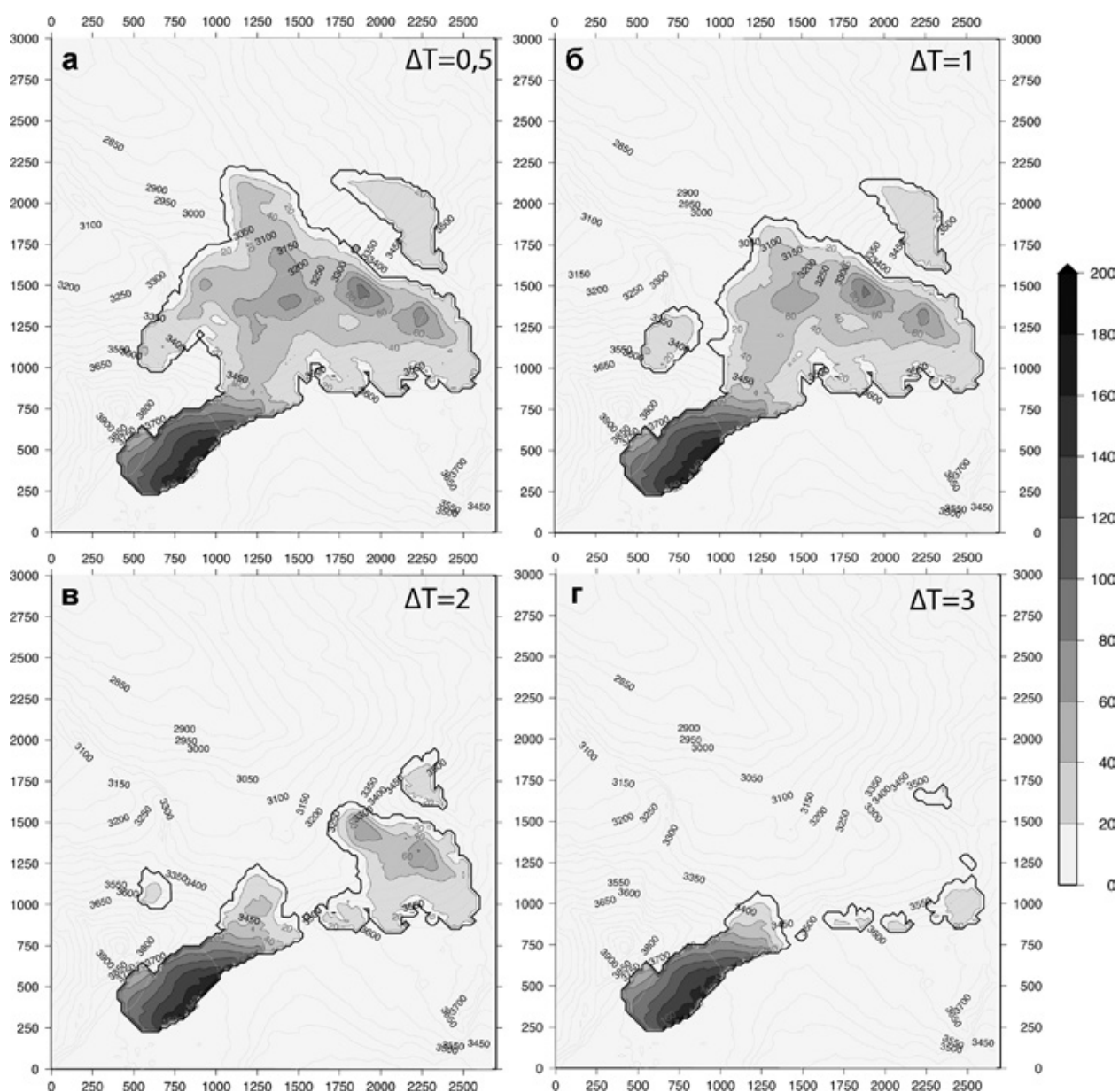


Рис. 4. Конфигурация и толщина льда ледника Джанкуат, полученные в численных экспериментах при росте приземной температуры воздуха на 0,5–3 °С. Остальные обозначения как на рис. 3.

вом росте – около 150 лет. Для приспособления площади также требуется больше времени. Эту разницу во временных масштабах приспособления можно объяснить, по-видимому, экранирующей ролью моренного чехла. При незначительном росте (или при отсутствии роста) температуры, таяние под слоем пород происходит медленнее, и требуется значительно больше времени, чтобы лед растаял на участках ледника, покрытых моренным чехлом. Заметим, что время отклика объема ледникового

комплекса Перс-Мортерач в Швейцарских Альпах, который превышает по площади Джанкуат примерно втрое, на температурный форсинг 0,5–3 °C несколько меньше – 20–30 лет, а отклик линейной протяженности (что в некоторой степени аналогично сокращению площади в настоящем исследовании) – 40–50 лет [4]. Причина опять же кроется в отсутствии значительного моренного чехла на ледниках комплекса и, соответственно, неучет его в модели.

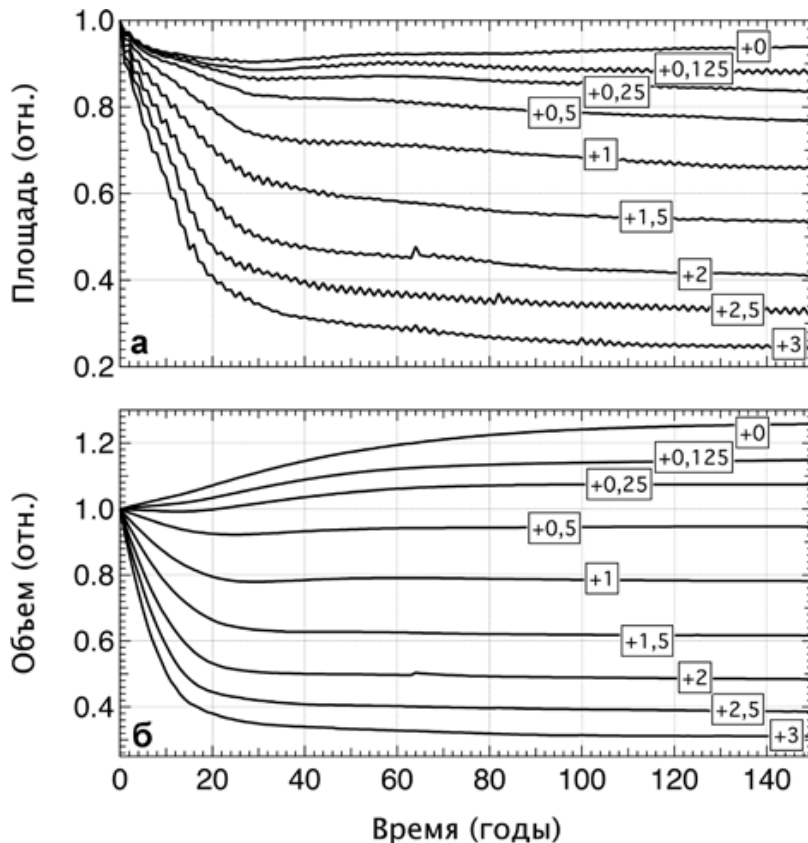


Рис. 5. Изменение относительных (нормированных на начальное значение) площади (а) и объема (б) ледника Джанкуат в численных экспериментах в течение первых 150 модельных лет.

В дальнейшем планируется провести исследование реакции ледника на мгновенное изменение сумм осадков, а также на непрерывный рост температуры и рост/сокращение осадков в течение 21-го столетия для получения оценки изменений ледникового стока, что критически важно для стратегического планирования водных ресурсов в регионе.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №52 «Обеспечение устойчивого развития Юга России в условиях климатических, экологических и техногенных вызовов» (подпрограмма «Освоение ресурсного потенциала, удержание лидерских позиций и обеспечение безопасности Черноморско-Каспийского региона на основе экосистемных принципов»).

Список литературы

1. Zekollari H., Fürst J.J., Huybrechts P. Modelling the evolution of Vadret da Morteratsch, Switzerland, since the Little Ice Age and into the future // Journal of Glaciology. 2014. V. 60. P. 1155–1168. doi: 10.3189/2014JoG14J053.
2. 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. 2014. № 4. С. 68–76.
3. Khromova T., Nosenko G., Kutuzov S. и др. Glacier area changes in Northern Eurasia // Environmental Research Letters. 2014. V. 9. P. 1–11.

4. Zekollari H., Huybrechts P. On the climate–geometry imbalance, response time and volume–area scaling of an alpine glacier: insights from a 3-D flow model applied to Vadret da Morteratsch, Switzerland // *Annals of Glaciology*. 2015. V. 56. P. 51–62. doi: 10.3189/2015AoG70A921
5. Jouvet G., Huss M., Blatter H. et al. Numerical simulation of Rhonegletscher from 1874 to 2100 // *Journal of Computational Physics*. 2009. V. 228. P. 6426–6439. doi: 10.1016/j.jcp.2009.05.033
6. Jouvet G., Huss M., Funk M., Blatter H. Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate // *Journal of Glaciology*. 2011. V. 57. P. 1033–1045. doi: 10.3189/002214311798843359
7. Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Кутузов С.С. и др. Калибровка математической модели динамики ледника Марух, Западный Кавказ // *Лед и снег*. 2015. Т. 55. № 2. С. 9–20.
8. Fürst J.J., Rybak O., Goelzer H. et al. Improved convergence and stability properties in a three-dimensional higher-order ice sheet model // *Geoscientific Model Development*. 2011. V. 4. P. 1133–1149.
9. Pattyn F. A new three-dimensional higher-order thermomechanical ice sheet model: Basic sensitivity, ice stream development, and ice flow across subglacial lakes // *Journal of Geophysical Research*. 2003. V. 108. doi:10.1029/2002JB002329.
10. Nemes J., Huybrechts P., Rybak O., Oerlemans J. Reconstruction of the surface mass balance of Morteratschgletscher since 1865 // *Annals of Glaciology*. 2009. V. 50. P. 126–134.
11. Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Корнева И.А. Модельные расчеты подморенного таяния на леднике Джанкуат // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь: ИПТС. 2018. Вып. 12 (32). С. 86–92.
12. Reid T.D., Brock B.W. An energy-balance model for debris-covered glaciers including heat conduction through the debris layer // *Journal of Glaciology*. 2010. V. 56 (199). P. 903–916.
13. Божинский А.Н., Красс М.С., Поповнин В.В. Роль моренного чехла в теплофизике горных ледников // *Материалы гляциологических исследований*. 1985. Вып. 52. С. 31–46.
14. Поповнин В.В., Резепкин А.А., Тиелидзе Л.Г. Разрастание поверхностной морены на языке ледника Джанкуат за период прямого гляциологического мониторинга // *Криосфера Земли*. 2015. Т. 19. № 1. С. 89–98.
15. 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*. 2018. V. 107. doi:10.1088/1755–1315/107/1/012041.
16. Рыбак О.О., Рыбак Е.А. Применение данных сетевых метеорологических станций для расчета баланса массы ледников (на примере ледника Джанкуат, Центральный Кавказ) // *Системы контроля окружающей среды*. Севастополь: ИПТС. 2017. Вып. 9 (29). С. 100–108.
17. Голубев Г.Н., Дюргеров М.Б., Маркин В.А. и др. Ледник Джанкуат (Центральный Кавказ). Водно-ледовый и тепловой баланс горноледниковых бассейнов. Л.: Гидрометеиздат, 1978, 183 с.
18. Поповнин В.В., Пылаева Т.В. Лавинное питание ледника Джанкуат // *Лед и Снег*. 2015. Т. 55. № 2. С. 21–32.
19. Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Петраков Д.А. и др. Толщина, объем льда и подледный рельеф ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) // *Лед и Снег*. 2014. Т. 54. № 4. С. 7–19. doi: http://dx.doi.org/10.15356/2076–6734-2014–4-7–19.
20. Пастухов В.Г. Полный массообмен ледника Джанкуат. Дипломная работа. Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, 2011, 150 с.
21. Поповнин В. В. Миграция ледораздела на Джантуганском фирновом плато // *Материалы гляциологических исследований*. 1995. №79. С. 123–127.
22. Морозова П.А., Рыбак О.О. Регионализация данных глобального климатического моделирования для расчёта баланса массы горных ледников // *Лед и Снег*. 2017. Т. 57. №4. С. 437–452. doi:10.15356/2076–6734-2017–4-437–452

RESPONSE OF DJANKUAT GLACIER (CENTRAL CAUCASUS) FOR THE SURFACE AIR TEMPERATURE INCREASE

O.O. Rybak^{1,2}, E.A. Rybak^{1,2}

¹Sochi Research Center of RAS, Sochi

²Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi

E-mail: o.o.rybak@gmail.com, elena.rybak@gmail.com

Abstract. Glaciation of Caucasus has been continuously degrading during the 20th and in the beginning of the 21st century. Mountain glaciers accumulate water during the cold season and release it during the warm season of the year contributing essential amount of water into local hydrological network. This source of fresh water is essentially important for agriculture and industry of the adjacent territories. That is why strategic planning of regional social and economic development requires thorough evaluation of glacial run-off under changing climatic conditions. Its prediction is a challenging task for mathematical modeling. Since it is possible to apply modeling methods to only not numerous selected glaciers because of lack of observations and considerable computational cost, it is reasonable to focus on so-called reference glaciers. Djankuat is a typical valley glacier on the northern slope of the main Caucasus chain. It is one of the most studied glaciers in Russia, which has been continuously monitored during the last fifty years.

We apply a 3-D higher order ice flow model coupled with a surface energy- and mass balance model to evaluate future state of a glacier as a response on the instantaneous increase of surface air temperature. To force the model, we utilize surface air temperature and precipitation records from the nearest weather stations (Terskol and Mestia). In the prognostic numerical experiments, we simulate changes in configuration and ice thickness. We find that the glacier almost totally disappears under the most extreme temperature growth (+3 °C). Response time of the glacier on temperature forcing depends on the value of perturbation. Debris layer insulates ice, slows down melting and increases response time.

Keywords: climate, mountain glacier, mathematical model, numerical experiment, mass balance, debris, glacial run-off

References

1. Zekollari H., Fürst J.J., Huybrechts P. Modelling the evolution of Vadret da Morteratsch, Switzerland, since the Little Ice Age and into the future // *Journal of Glaciology*. 2014. V. 60. P. 1155–1168. doi: 10.3189/2014JoG14J053. (in English).
2. Lurie P.M., Panov P.M. Changes of modern glaciation of the Northern slope of the Greater Caucasus in the XXth century and prediction of its degradation in the XXIst century // *Meteorologia i gidrologia*. 2014. No. 4. P. 68–76. (in Russian).
3. Khromova T., Nosenko G., Kutuzov S. et al. Glacier area changes in Northern Eurasia // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9. P. 1–11. (in English).
4. Zekollari H., Huybrechts P. On the climate–geometry imbalance, response time and volume–area scaling of an alpine glacier: insights from a 3-D flow model applied to Vadret da Morteratsch, Switzerland // *Annals of Glaciology*. 2015. V. 56. P. 51–62. doi: 10.3189/2015AoG70A921. (in English).
5. Juvet G., Huss M., Blatter H. et al. Numerical simulation of Rhonegletscher from 1874 to 2100 // *Journal of Computational Physics*. 2009. V. 228. P. 6426–6439. doi: 10.1016/j.jcp.2009.05.033. (in English).
6. Juvet G., Huss M., Funk M., Blatter H. Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate // *Journal of Glaciology*. 2011. V. 57. P. 1033–1045. doi: 10.3189/002214311798843359. (in English).
7. Rybak O.O., Rybak E.A., Kutuzov S.S. et al. Calibration of a mathematical model of Marukh Glacier, Western Caucasus // *Liod i Sneg*. 2015. V. 55. No. 2. P. 9–20 (in Russian).
8. Fürst J.J., Rybak O., Goelzer H. et al. Improved convergence and stability properties in a three-dimensional higher-order ice sheet model // *Geoscientific Model Development*. 2011. V. 4. P. 1133–1149. (in English).
9. Pattyn F. A new three-dimensional higher-order thermomechanical ice sheet model: Basic sensitivity, ice stream development, and ice flow across subglacial lakes // *Journal of Geophysical Research*. 2003. V. 108. doi:10.1029/2002JB002329. (in English).
10. Nemeč J., Huybrechts P., Rybak O., Oerlemans J. Reconstruction of the surface mass balance of Morteratschgletscher since 1865 // *Annals of Glaciology*. 2009. V. 50. P. 126–134. (in English).
11. Rybak O.O., Rybak E.A., Korneva I.A. Model-based calculations of sub-moraine melting at Djankuat glacier // *Sistemy kontrolya okruzhajushej sredy*. Sevastopol: IPTS. 2018. No. 12 (32). P. 86–92. (in Russian).
12. Reid T.D., Brock B.W. An energy-balance model for debris-covered glaciers including heat conduction through the debris layer // *Journal of Glaciology*. 2010. V. 56 (199). P. 903–916. (in English).
13. Bozhinsky A.N., Krass M.S., Popovnin V.V. The role of debris cover in mountain glaciers' teplophysics // *Materialy Gliatsiologicheskikh issledovanij*. 1985. No. 52. P. 31–46. (in Russian).
14. Popovnin V.V., Rejepkin A.A., Tielidze L.G. Superficial moraine expansion on the Dzhankuat Glacier snout over the direct glaciological monitoring period // *Kriosfera Zemli*. 2015. V. 19. No. 1., P. 89–98. (in Russian).

15. *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. 2018. V. 107. doi:10.1088/1755-1315/107/1/012041. (in English).
16. *Rybak O.O., Rybak E.A.* Implementation of observations at regular meteorological stations for mass balance calculation of mountain glaciers (case study of Djankuat glacier, Central Caucasus) // Systemy kontrolya okruzhajuschej sredy. Sevastopol: IPTS. 2017. No. 9(29). P. 100–108 (in Russian)
17. *Golubev G.N., Dyurgerov M.B., Markin V.A. et al.* Lednik Djankuat (Tsentralny Kavkaz). Vodnolednokovy i teplovoj balance gornolednikovyh bassejnov [Djankuat Glacier (Central Caucasus). Water, ice and heat balance of mountain glacier basins]. Leeningrad: Gidrometeizdat, 1978, 183 pp. (in Russian).
18. *Popovnin V.V., Pylayeva T.V.* Avalanche feeding of the Djankuat Glacier // Liod i Sneg. 2015. V. 55. № 2. P. 21–32 (in Russian).
19. *Lavrentiev I.I., Kutuzov S.S., Petrakov D.A. et al.* Ice thickness, volume and subglacial relief of Djankuat Glacier (Central Caucasus). Liod i Sneg. 2014. V. 54. No. 4. P. 7–19. doi: <http://dx.doi.org/10.15356/2076-6734-2014-4-7-19> (in Russian).
20. *Pastukhov V.G.* Polny massobmen lednika Djankuat [Full mass exchange of Djankuat Glacier]. Diploma Paper. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Faculty of cryolithology and glaciology, 2011, 150 pp. (in Russian).
21. *Popovnin B. B.* Migration of ice divide on Djantugan firn plateau // Materialy Gliatsiologicheskikh issledonanij. 1995. No. 79. P. 123–127. (in Russian).
22. *Morozova P.A., Rybak O.O.* Downscaling of the global climate model data for the mass balance calculation of mountain glaciers // Liod i Sneg. 2017. V. 57. No 4. P. 437–452. doi:10.15356/2076-6734-2017-4-437-452 (in Russian).