

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ПОДМОРЕННОГО ТАЯНИЯ НА ЛЕДНИКЕ ДЖАНКУАТ

О.О. Рыбак^{1,2}, Е.А. Рыбак^{1,2}, Корнева И.А.^{1,3}

¹Филиал Института природно-технических систем, г. Сочи, Курортный проспект, 99/18
E-mail: o.o.rybak@gmail.com

²Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи, ул. Театральная, 8а
E-mail: elena.rybak@gmail.com

³Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН,
г. Москва, ул. Глебовская, 20б
E-mail: comissa@mail.ru

На Центральном Кавказе значительные участки долинных и сложно-долинных ледников покрыты моренным материалом. Для выполнения корректных прогностических расчетов ледникового стока необходимо учитывать усиливающую или экранирующую роль поверхностной морены (в зависимости от толщины последней). В качестве объекта исследований был выбран ледник Джанкуат, который является типичным по морфометрическим характеристикам ледником в регионе. Нами был разработан специальный модельный блок и проведены численные эксперименты с реальными климатическими условиями. Помимо этого, для ледника Джанкуат построена карта толщины моренного чехла. Была подтверждена экранирующая роль поверхностной морены, в среднем вдвое замедляющей скорость таяния.

Ключевые слова: Кавказ, горный ледник, климат, поверхностная морена, скорость таяния, баланс массы, математическая модель, модель, прогноз.

Поступила в редакцию: 26.02.2018.

Введение. Основное препятствие в исследовании и прогнозировании состояния горного оледенения – недостаток исходных данных, причем данных самого разного характера – от метеорологических (климатических) до данных о внутреннем строении, толщине и свойствах поверхностного моренного чехла. Далеко не все данные могут быть получены дистанционными методами. Полевыми, а тем более регулярными наблюдениями охвачено минимальное количество ледников. В связи с этим появилась концепция реперных (опорных) ледников, иначе говоря, таких ледников, чьи морфологические и морфометрические характеристики и т.д. характерны для большинства ледников в некоторой области, и по изменениям которых можно судить об изменениях горного оледенения в области в целом. На Центральном Кавказе в качестве такового был выбран ледник Джанкуат. Непрерывные наблюдения за компонентами поверхностного баланса массы, за изменением положения языка и высоты поверхности здесь ведутся на протяжении последнего полувека. Вопрос о репрезентативности ледника Джанкуат многократно обсу-

дался в отечественной литературе [1–4]. Например, Коновалов [2] считает, что пространственная репрезентативность балансовых наблюдений на ледниках Джанкуат и Гарабаши (один из более, чем двух десятков, составляющих ледниковый комплекс Эльбруса) недостаточна для региональных выводов и расчетов ледникового стока. Это обстоятельство, тем не менее, не препятствует локальному исследованию составляющих баланса массы как функции климатических и других характеристик. Ограниченность доступных данных наблюдений является вынужденной причиной экстраполяции и обобщений. Так, авторы [4] основывают свои выводы о разнице в скорости таяния ледников северного и южного макросклонов Главного Кавказского хребта, опираясь на анализ фрагментарных данных, полученных только на ледниках Джанкуат (северный склон) и Зопхито (южный склон).

Моренный покров (или моренный чехол) на поверхности горных ледников всегда являлся камнем преткновения при расчетах величин таяния и ледникового стока. Моренный чехол коренным образом влияет на все процессы, происходя-

щие в пределах занятых им частей ледников. Он предопределяет интенсивность таяния на этих участках и объем стока с них, обуславливая облик поля поверхностного баланса массы [3]. При этом, в зависимости от генезиса, толщины, теплопроводности слагающих пород, их пористости и т.д., моренный покров может как усиливать, так и ослаблять таяние [3, 5–7]. Строго говоря, сам термин “моренный покров” является достаточно условным, так как на поверхности ледника могут присутствовать, помимо обломочного материала, пыль или вулканический пепел (например, в Исландии). В зависимости от морфологических и теплофизических свойств, моренный чехол каждого отдельного ледника характеризуется двумя величинами – критической толщиной и эффективной толщиной. Критической называется толщина, при которой скорость таяния под моренным чехлом равна скорости таяния чистой поверхности льда или снега в одинаковых условиях. Эффективная толщина чехла – толщина, при которой подморенное таяние максимально [8]. Обе этих величины меняются от ледника к леднику в довольно широком диапазоне – от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров (см. табл. 1 в [9]). Заметим, что критическая толщина моренного покрова на леднике Джанкуат несколько больше, чем на основной массе ледников – 7-8 см [10].

Моренный покров на ледниках Центрального Кавказа составляет от 3 до 25% общей площади ледников [11]. Принятие концепции опорных ледников за основу прогнозирования изменения ледникового стока в крупных горных регионах требует, чтобы составляющие поверхностного баланса массы на опорном леднике рассчитывались максимально корректно. При этом необходимо учитывать усиливающую или экранирующую роль моренного чехла. В частности, согласно расчетам [4], годовая сумма абляции на заморененных участках ледника Джанкуат сокращается на 26%, что, в целом, согласуется с оценками [12] двух для ледников (Luman и Columbia) в штате Вашингтон. Согласно оценкам [12], годовая абляция под заморененными участками сокращается на 25 – 30% по сравнению с «чистыми», а абляция в поздний летний период, когда ис-

чезает весь сезонный снежный покров, на 30–40%.

Математические модели, в основе которых лежит как индексно-температурный метод [4], так и энерго-балансовый [13] уже использовались для расчетов таяния ледника Джанкуат. Их недостаток заключался в жесткой привязке к конкретным метеорологическим условиям (что налагает ограничения при проведении прогностических расчетов) и неучете особенностей снегонакопления на леднике Джанкуат. В связи с тем, что массбалансовую модель ледника предполагается использовать в будущем именно в прогностических расчетах при реализации различных климатических сценариев, количество климатических переменных должно быть сведено к минимуму. В настоящей работе, мы представляем результаты расчетов компонентов баланса массы ледника Джанкуат, выполненные для 10 балансовых лет с учетом реально существующего распределения моренного покрова на поверхности ледника.

1. Постановка численных экспериментов. Для выяснения роли моренного чехла (рис. 1) в формировании баланса массы ледника Джанкуат было проведено два численных эксперимента. Первый – контрольный, где моренный чехол отсутствовал. Второй – основной, где был задан моренный чехол толщиной, соответствующей оценкам по состоянию на 2010 г. (рис. 2). В обоих случаях была использована современная топография ледника [14], которая не менялась в ходе экспериментов. Кроме того, на настоящем этапе из расчетов был исключен динамический компонент – не учитывалась скорость течения льда и горизонтальный массообмен между участками ледника.

Математическая модель достаточно подробно описана в [15–18], в том числе блок теплообмена заморененной поверхности [16, 18], разработанный на основе алгоритмов, описанных в работе [7]. Построение рядов климатического форсинга – приземной температуры воздуха и количества осадков обсуждается в работе [17], где детально рассмотрены вопросы приведения приземной температуры воздуха на метеостанции (МС) Терскол к температуре на леднике и перерасчет сумм осадков на МС Местиа в

сумму осадков на леднике с учетом высотного градиента, метелевого переноса и лавинного питания (за основу взяты оценки [19]).

Длительность экспериментов составила десять модельных балансовых лет с 1999/2000 по 2008/2009. Балансовый год

начинается 01 октября, когда фактически прекращается поверхностное таяние на леднике, и заканчивается 30 сентября. Даты, разумеется, достаточно условны, поскольку таяние может прекращаться раньше или позже начала гидрологического года.



Рис. 1. Участки поверхности ледника Джанкуат в зоне абляции, покрытые моренным чехлом (фото О. Рыбака, август 2014 г.)

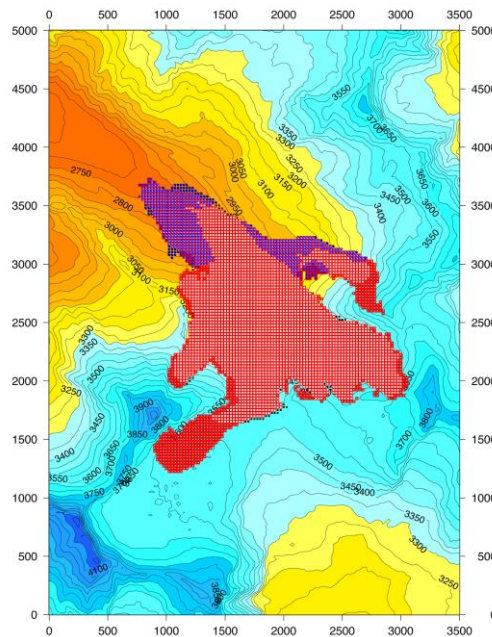


Рис. 2. Маска поверхности ледника Джанкуат. Каждому квадрату соответствует ячейка 25×25 м. Белым цветом обозначены ячейки, для которых существуют оценки толщины льда. Наложённые синие квадраты соответствуют ячейкам, покрытым моренным чехлом. Черным цветом окрашены окраинные ячейки, выходящие за контур условного модельного ледника, но для которых есть оценки толщины льда. Боковая оцифровка соответствует метрам от условной нулевой точки

2. Результаты и обсуждение. В результате проведения численных экспериментов были рассчитаны поля составляющих поверхностного баланса массы, в том числе скорость таяния (рис. 3). Очевидно, что моренный чехол существенно (в среднем вдвое) его замедляет, что, разумеется, приводит к изменениям

в полях баланса на поверхности (рис. 4) и в целом к увеличению баланса.

Распределения по высотным зонам расчетных составляющих поверхностного баланса массы, осредненные за 10 балансовых лет, показаны на рис. 5. Очевидно, что максимальные расхождения между двумя численными экспериментами наблюдаются в самой нижней вы-

сотной зоне. Эти расхождения нивелируются по мере увеличения высоты и, соответственно, снижения доли поверхности, покрытой моренным чехлом (см. также рис. 2). Расчеты показывают, что наличие моренного чехла способствует

сокращению поверхностного таяния и ледникового стока в целом по леднику на 6–13%, причем соотношение между характеристиками в основном и контрольном экспериментах меняется от года к году (рис. 6).

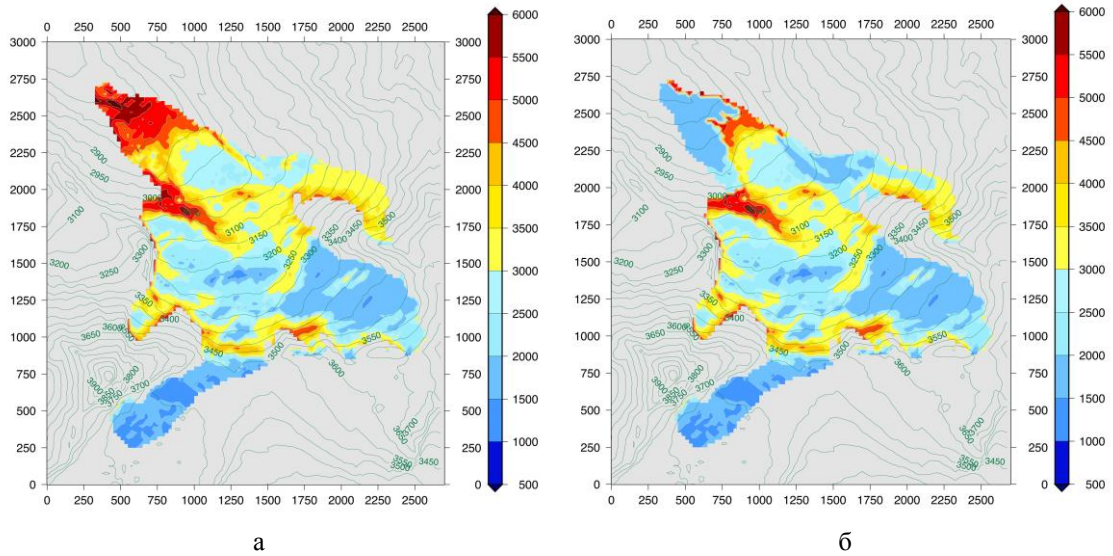


Рис. 3. Скорость поверхностного таяния ледника Джанкуат ($\text{мм} \cdot \text{год}^{-1}$ водн. экв.), осредненная за 1999/2000 – 2008/2009 гидрологические годы согласно результатам математического моделирования: а – без учета экранирующей роли поверхностной морены, б – с учетом последней

Полученные оценки, разумеется, ограничены тем фактом, что моренный покров непостоянен во времени. По мнению Поповнина и др. [3], за все время мониторинга не произошло принципиальной смены механизма, обуславливающего пространственные закономерности в распределении каменного мате-

риала по поверхности ледника. С другой стороны, увеличилась в количественном исчислении масса литогенного материала, влекомого ледником на своей поверхности. Происходит постоянное разрастание поверхностной морены, и, вероятно, в будущем эта тенденция сохранится.

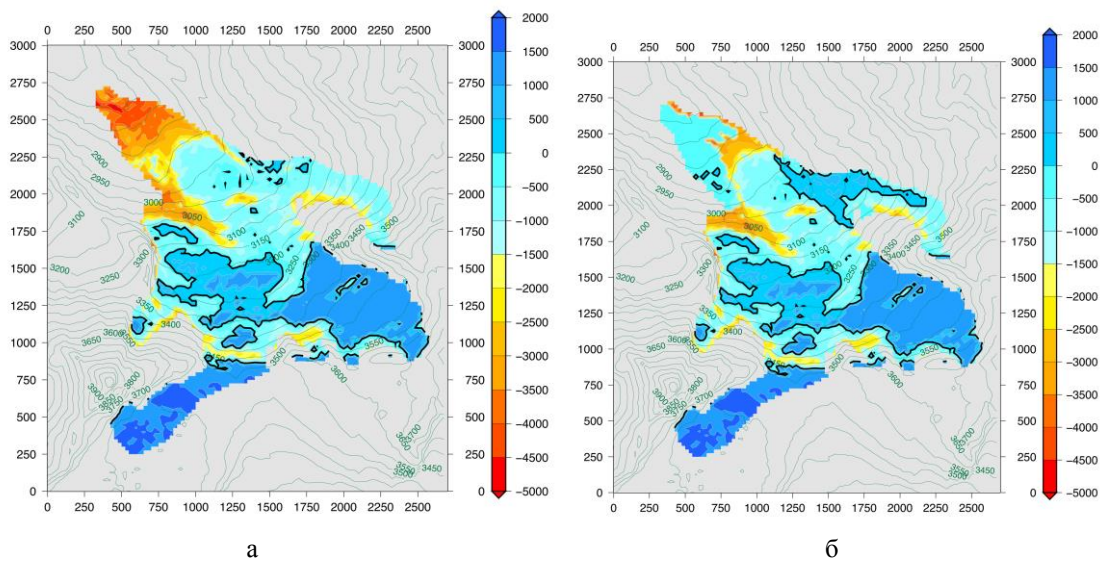


Рис. 4. Баланс массы на поверхности ледника Джанкуат, осредненный за 1999/2000 – 2008/2009 гидрологические годы ($\text{мм} \cdot \text{год}^{-1}$ водн. экв.), согласно результатам математического моделирования: а – без учета экранирующей роли поверхностной морены, б – с учетом последней. Жирной черной линией показана снеговая линия

Прогнозировать, где и когда, а также насколько (по толщине) увеличится моренный покров – задача чрезвычайно сложная. Более трех десятков лет назад была разработана модель вытаявания моренного материала из тела ледника [5]. Однако большое количество допущений, принятых в модели, делают ее применение в прогностических расчетах с большой заблаговременностью очень

проблематичным. Обломочный материал попадает на поверхность ледника и в результате процессов, прогнозировать которые можно, скорее всего, лишь на качественном уровне (камнепады, запыление и др.). Таким образом, использование текущей маски моренного покрова в численных экспериментах с постоянной топографией представляется вполне оправданным.

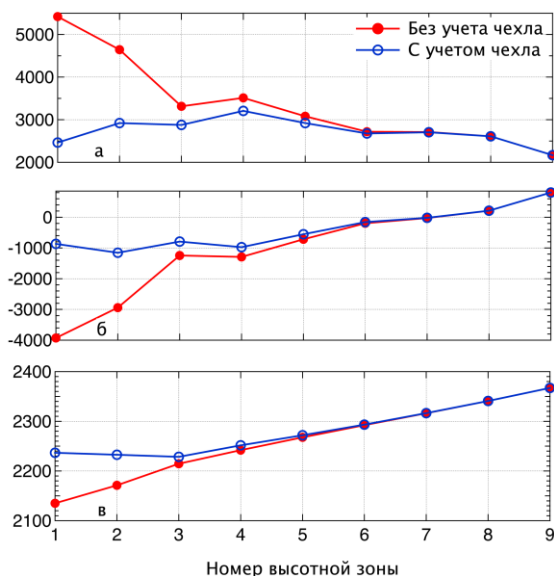


Рис. 5. Распределения скорости таяния (а), поверхностного баланса массы (б) и аккумуляции (в) на леднике Джанкуат с учетом экранирующей роли поверхностной морены и без ее учета, осредненные за 1999/2000–2008/2009 гидрологические годы (мм водного эквивалента) и по высотным зонам (1 – до 2800 м, 2 – 2800–2900 м, 3 – 2900–3000 м, 4 – 3000–3100 м, 5 – 3100–3200 м, 6 – 3200–3300 м, 7 – 3300–3400 м, 8 – 3400–3500 м, 9 – выше 3500 м)

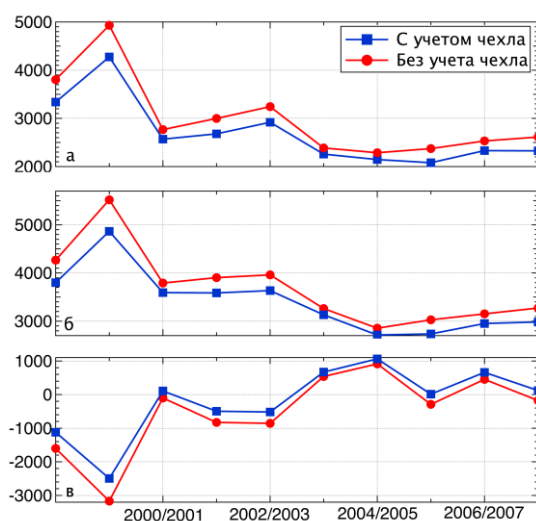


Рис. 6. Значения скорости таяния (а), стока (б) и поверхностного баланса массы (в), мм·год⁻¹ водн. экв. в среднем по площади ледника Джанкуат с учетом экранирующей роли поверхностной морены и без ее учета в течение 1999/2000–2008/2009 гидрологических лет

Заключение. В настоящей статье были представлены результаты расчета скорости таяния участков ледника Джанкуат под моренным чехлом. Поверхностная морена может выступать как в качестве усилителя таяния (до определенной критической толщины несколько сантиметров, зависящей от физических свойств пород, слагающих моренный чехол), так и в качестве изолятора. Вторая роль более важна, так как толщина моренного чехла, как правило, существенно больше критической. В связи с тем, что значительные площади ледников в разных регионах мира покрыты моренным чехлом, для корректных расчетов ледникового стока необходимо принимать во внимание экранирующую роль поверхностной морены. Для валидации модели был выбран типичный для Центрального Кавказа ледник Джанкуат, где систематические наблюдения проводятся на протяжении последнего полувека. Согласно расчетам, под моренным чехлом, с толщиной и теплофизическими свойствами, как на леднике Джанкуат, скорость таяния в годовом исчислении приблизительно вдвое ниже, чем на открытых участках льда. В целом по леднику, экранирующий эффект поверхностной морены приводит к снижению скорости поверхностного таяния и ледникового стока на 6–13%.

Разработанный и протестированный модельный блок предполагается в будущем встроить в динамическую модель горного ледника и использовать для прогностических расчетов.

Авторы благодарят М.М. Каминскую (географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова) за подготовку цифровой карты распределения моренного материала на поверхности ледника Джанкуат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ледник Джанкуат (Центральный Кавказ). Водно-ледовый и тепловой баланс горноледниковых бассейнов / под*

ред. И.Я. Боярского. Л.: Гидрометеиздат. 1978. 183 с.

2. *Коновалов В.Г.* Моделирование и реконструкция параметров речного стока и баланса массы ледников на Северном Кавказе // *Лёд и Снег*. 2014. № 3 (127). С. 16–30.

3. *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.

4. *Lambrecht A., Mayer C., Hagg W., Popovnin V., Rezepkin A., Lomidze N., Svanadze D.* A comparison of glacier melt on debris-covered glaciers in the northern and southern Caucasus // *The Cryosphere*. 2011. V. 5. P. 525–538.

5. *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.

6. *Østrem G.* Ice melting under a thin layer of moraine and the existence of ice cores in moraine ridges // *Geografiska Annaler, Series A*. 1959. V. 31. P. 228–230.

7. *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.

8. *Adhikary S., Seko K., Nakawo M., Ageta Y., Miyazaki N.* Effect of surface dust on snow melt // *Bulletin of Glacier Research*. 1997. V. 15. P. 85–92.

9. *Kirkbride M.P., Dugmore A.J.* Glaciological response to distal tephra fallout from the 1947 eruption of Hekla, south Iceland // *Journal of Glaciology*. 2003. V. 49(166). P. 420–428.

10. *Popovnin V.V., Rozova A.V.* Influence of sub-debris thawing on ablation and runoff of the Djankuat Glacier in the Caucasus // *Hydrology Research*. 2002. V. 33. No. 1. P. 75–94.

11. *Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001–2010 гг. на изменения температуры и количества осадков / Г.А. Носенко, Т.Е. Хромова, О.В. Рототаева [и др.] // Лёд и Снег*. 2013. № 1 (121). С.

26–33.

12. *Pelto M.* Mass balance of adjacent debris-covered and clean glacier ice in the North Cascades, Washington // *IAHS Publ.* 2000. V. 264. P. 35–42.

13. *Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В.* Моделирование таяния поверхности горного ледника // *Лёд и Снег.* 2011. № 4 (116). С. 24–31.

14. *Толицина,* объем льда и подледный рельеф ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) / *И.И. Лаврентьев, С.С. Кутузов, Д.А. Петраков [и др.]* // *Лёд и Снег.* 2014. № 4 (128). С. 7–19.

15. *Калибровка* математической модели динамики ледника Марух, Западный Кавказ / *О.О. Рыбак, Е.А. Рыбак, С.С. Кутузов [и др.]* // *Лёд и снег.* 2015. № 2 (130). С. 9–20.

16. *Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Морозова П.А.* Моделирование и прогноз баланса массы горных ледников Центрального Кавказа в условиях климатических изменений // *Системы контроля окружаю-*

щей среды. Севастополь: ИПТС. 2016. Вып. 6 (26). С. 93–100.

17. *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.

18. *Рыбак О.О., Рыбак Е.А.* Расчет скорости таяния участков горного ледника, покрытых моренным чехлом // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс].* Краснодар: КубГАУ. 2017. № 09 (133). Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/09/pdf/78.pdf> (дата обращения: 20.01.2018).

19. *Поповнин В.В., Пылаева Т.В.* Лавинное питание ледника Джанкуат // *Лёд и Снег.* 2015. № 2 (130). С. 21–32.

MODEL-BASED CALCULATIONS OF SUB-MORaine MELTING AT DJANKUAT GLACIER

O.O. Rybak^{1,2}, E.A. Rybak^{1,2}, I.A. Korneva^{1,3}

¹ Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Kurortny Ave., 99/18

² Sochi Scientific Research Centre, Russian Academy of Sciences, Sochi, Teatralnaya St., 8a

³ Institute of Global Climate and Ecology of Roshydromet and RAS, Moscow, Glebovskaya St., 20b

Considerable areas on the surface of valley and complex valley glaciers in Central Caucasus are covered with debris. In order to correctly carry out prognostic calculations of glacial run-off, it is necessary to account for amplifying or insulating role of the debris layer (dependently on the thickness of the latter). We focus our study on Djankuat glacier, which is a typical one in the region because of its morphometrical properties. Besides, a map of debris thickness was built for Djankuat. We elaborated a special model block and carried out numerical experiments with real climatic conditions. Insulating role of the debris layer was confirmed. On average melting rate under debris cover reduced by the factor of two.

Keywords: Caucasus, mountain glacier, climate, debris layer, mass balance, mathematical model, monitoring, prediction