

РАСЧЕТ ТАЯНИЯ ЛЕДНИКА В УСЛОВИЯХ НЕДОСТАТКА ДАННЫХ

¹Зырянова Д.С., ¹Пряхина Г.В., ¹Распутина В.А., ^{1,2}Кузнецова М.Р.

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург;

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург,

e-mail: levienche13@gmail.com

Исследование и оценка стока с водосбора, частично покрытого ледником, является предметом интереса как для теоретической гидрологии, так и для управления водными ресурсами в рамках водопользования и прогнозов состояния водных ресурсов горных регионов. Многие горные ледники уязвимы к изменению климата, со временем это приводит к их отступанию. Вместе с тем таяние ледников приводит к образованию прорывоопасных озерно-ледниковых комплексов в районах деградации оледенения. Целью данной работы является расчет стока с ледников Алтая в условиях недостатка данных. В ходе данной работы были рассмотрены два алгоритма расчета таяния ледника, основанные на уравнении теплового баланса. Первый основан на уравнении теплового баланса, используемого в модели A-melt, второй – на уравнении П.П. Кузьмина. Компьютерные реализации моделей были протестированы с помощью данных, полученных на перигляциальном озере Таможенное (ледник Некрасова, Южно-Чуйский хребет). При сравнении результатов моделирования наилучшие статистические показатели были получены для второй модели, хотя она использует меньшее количество составляющих теплового баланса и в ней используются эмпирические формулы.

Ключевые слова: ледниковый сток, алгоритм расчета стока, расчет абляции, тепловой баланс, формула П.П. Кузьмина

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-27-00171.

CALCULATION OF GLACIER MELTING IN CONDITIONS OF LACK OF DATA

¹Zyryanova D.S., ¹Pryakhina G.V., ¹Rasputina V.A., ^{1,2}Kuznetsova M.R.

¹Saint Petersburg State University, Saint Petersburg;

²Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, e-mail: levienche13@gmail.com

The study and assessment of runoff from a watershed partially covered by a glacier is a subject of interest both for theoretical hydrology and for water resources management within the framework of water use and forecasts of the state of water resources in mountain regions. Many mountain glaciers are vulnerable to climate change, which eventually leads to their retreat. At the same time, the melting of glaciers leads to the formation of explosive lake-glacier complexes in areas of glaciatic degradation. The purpose of this work is to calculate the runoff from Altai glaciers in conditions of data shortage. In the course of this work, two algorithms for calculating glacier melting based on the heat balance equation were considered. The first one is based on the heat balance equation used in the A-melt model, the second one is based on the equation of P.P. Kuzmin. Computer implementations of the models were tested using data obtained on the periglacial lake Tamozhennoe (Nekrasov Glacier, Yuzhno-Chuisky Ridge). When comparing the simulation results, the best statistical indicators were obtained for the second model, although it uses fewer components of the thermal balance and uses empirical formulas.

Keywords: glacial runoff, runoff calculation algorithm, ablation calculation, thermal balance, P.P. Kuzmin equation

The work was carried out with financial support from the RSF grant No. 23-27-00171.

Одним из основных источников питания высокогорных рек и озер является ледниковый сток; его объем и распределение во времени определяют гидрологический режим водных объектов. С начала XXI в. многие горные ледники реагируют на глобальное потепление сокращением площадей поверхности и объемов. При этом таяние ледников приводит к образованию прорывоопасных озерно-ледниковых комплексов в районах деградации оледенения. Зачастую для решения широкого спектра задач в рамках водопользования, прогнозов состояния водных ресурсов и обеспечения

безопасности горных регионов необходимы оценки величин стока с водосборов, имеющих оледенение.

Для расчета стока с ледников часто используются региональные зависимости, в основу которых положены данные измерений абляции. Последние проводятся эпизодически и далеко не на всех ледниках. Возможность использования эмпирических формул часто ограничена конкретным регионом, а создание новых требует обширных данных фактических наблюдений. В этом случае целесообразно применение математических моделей, основанных на фи-

зических закономерностях, не зависящих от конкретного горного региона. В условиях недостатка данных (регулярные гидрометеорологические наблюдения приурочены к редким метеостанциям или постам, чаще всего расположенным значительно ниже по высоте) алгоритм модели должен использовать относительно легко определяемую исходную информацию об объекте, а также рассчитывать сток с любого ледника с минимально возможной погрешностью.

В настоящее время наибольшее применение имеют модели, основанные на уравнениях теплового баланса [1–4]. Среди них – уравнение П.П. Кузьмина [5, с. 235], применимое как для расчета таяния снега, так и для моделирования ледникового стока, а также модель A-melt, которая показала хорошую сходимость результатов рассчитанных и измеренных значений абляции при расчете стока ледникового бассейна Джанкуат на Кавказе [6].

Целью данной работы является тестирование алгоритмов расчета величин талого ледникового стока в условиях недостатка данных на примере ледника Некрасова (Алтай).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования, на примере которого выполнены расчеты, является карово-долинный ледник Некрасова, расположенный на территории Южно-Чуйского

хребта Центрального Алтая (рис. 1). Его площадь составляет 0,91 км², средняя высота – 3000 м.

Для оценки поверхностной абляции ледника производились измерения по деревянным рейкам (12 реек, длиной 1,5 и сечением 40 × 15 мм), которые были размещены в узлах сетки близкой к регулярной, покрывающей зону абляции ледника (рис. 2). Абляционные рейки устанавливались на характерных для ледника участках. Отсчеты снимались с помощью рулетки с точностью 0,5 см (погрешность 0,25 см) 1 раз в сутки с лицевой и обратной стороны рейки с последующим осреднением. С 12 (начало таяния) до 15 июля работы производились на рейках 1–8 (рис. 2), после чего были забурены рейки 9–12. Отсчеты по всем 12 рейкам продолжались до 29 июля.

В настоящей статье были рассмотрены два алгоритма расчета слоя таяния ледника. В основе первого лежит уравнение теплового баланса, представленное в модели A-melt [6]. Второй алгоритм основан на уравнении теплового баланса в форме, предложенной П.П. Кузьминым [5, с. 235].

Слой абляции в обоих случаях рассчитывается на основе теплового баланса ω кал/кв.см:

$$A = (10\omega) / L = \omega / 8, \quad (1)$$

где A – слой абляции (мм), L – скрытая теплота плавления льда (80 кал/г) [6].

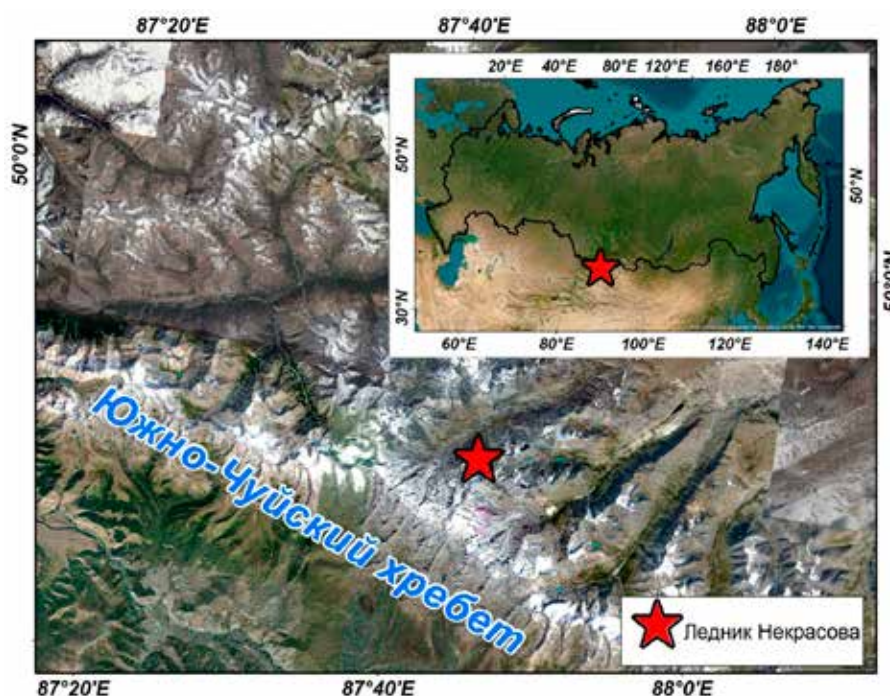


Рис. 1. Месторасположение ледника Некрасова



Рис. 2. Схема расположения абляционных рек на леднике Некрасова

Тепловая энергия ω кал/кв.см определяется с помощью уравнений теплового баланса, записанных для первого и второго случая уравнениями (2) и (3) соответственно:

$$\omega = S_{cp} + E_a - E_3 \pm \omega_T \pm \omega_{лк} \pm Q_M \pm S. \quad (2)$$

$$\omega = S_{cp} + E_3 + E_a + \omega_T. \quad (3)$$

где S_{cp} – приходная коротковолновая радиация, кал/см²; E_a – встречное излучение атмосферы, кал/см²; E_3 – длинноволновое излучение земной поверхности, кал/см²; ω_T – турбулентный теплообмен с атмосферой, кал/см²; $\omega_{лк}$ – скрытый поток тепла, возникающий за счет испарения, кал/см²; Q_M – поток тепла через чехол моренных отложений, кал/см²; S – тепло, приносимое с дождевыми осадками, кал/см².

Несмотря на то, что оба алгоритма основаны на уравнении теплового баланса, в первом учитывается большее количество составляющих (табл. 1), а также есть различия в используемых формулах и коэффициентах при их расчетах. Так, расчет суммарной приходной коротковолновой радиации различается только в использовании коэффициентов для учета нижней (N_H) и общей облачности (N_0). При $N_0 = N_H$ формулы становятся одинаковыми. Встречное излучение атмосферы принимается как константа в первом алгоритме, но рассчитывается во втором как составляющая уравнения П.П. Кузьмина. Испарение при расчете турбулентного теплообмена определя-

ется по формуле П.П. Кузьмина [5, с. 71]. Длинноволновое излучение поверхности рассчитывается по уравнению Стефана – Больцмана. Отметим также, что параметры с 5 по 7 (табл. 1) в уравнении П.П. Кузьмина (второй алгоритм) не учитываются.

Сумма $k_s + k_D N$ в уравнении (10) (табл. 1) зависит от прозрачности атмосферы. Коэффициент k_s является табличным значением (табл. 2). Коэффициент k_D при наличии устойчивого снежного покрова рассчитывается по формуле (11) (табл. 1). Отношение $D/S' = (D/S) \cdot (1/\sin h_{\text{пл}})$, где D/S является табличным значением (табл. 2). Полученное значение $(Q+q)_0$ необходимо умножить на долю светлого времени суток – D_z . Таблицы с описанными выше коэффициентами также приведены в [7, с. 130, 158–165].

Альbedo (α_s) определено с помощью формулы (12) (табл. 1). Расчет по данному уравнению начинается с момента последнего снегопада. В начальный момент времени $n = 0$ значение альbedo будет минимальным, так как на поверхности ледника будет лежать свежавыпавший снег. В дальнейшем снег начинает стареть и его альbedo постепенно растет в экспоненциальной зависимости от количества дней с последнего выпадения снега. Влияет на альbedo и то, какая температура воздуха была на момент снегопада: при положительных ее значениях рост альbedo будет быстрее, чем при отрицательных [8, 9].

В связи с отсутствием измеренных данных на леднике при расчете принимались следующие допущения: скорость ветра при тестировании обоих алгоритмов была принята как константа (в зависимости от высо-

ты местности, [10]); температура поверхности ледника – равной нулю, то есть температуре тающего льда; нижняя облачность равной общей. В табл. 2 приведены значения используемых при расчетах параметров.

Таблица 1

Формулы, используемые в расчетах элементов теплового баланса

Параметр	1 алгоритм	2 алгоритм (формула П.П. Кузьмина)
1 Суммарная приходная коротковолновая радиация	$S_{cp} = (Q + q)_0 (1 - \alpha_s) \cdot (1 - 0,67N_H - 0,14(N_O - N_H))$	$S_{cp} = (Q + q)_0 (1 - \alpha_s) \cdot (1 - 0,20N_0 - 0,47N_H)$
2 Встречное излучение атмосферы	Принимается как константа	$E_a = (1440(0,62 + 0,05\sqrt{e_{200}}) \cdot (1 + 0,12N_0 + 0,12N_H)) \varepsilon \sigma T_g^4$
3 Длинноволновое излучение поверхности	$E_z = \varepsilon \sigma (T_{нов} + 273,15)^4$	
4 Турбулентный теплообмен	$\omega_m = 390 \frac{(0,18 + 0,098u)(e_n - e_{200})}{(e_n - e_{200})} (T_g - T_{нов})$	$\omega_m = 80,878(1 + 0,547u) \cdot [(T_g - T_{нов}) + 1,75(e_{200} - e_n)]$
5 Скрытый поток тепла за счет испарения	$\omega_{лк} = C_{p,g} T_{нов} (0,0075 + 0,041u)(e_n - e_{200})$	Не учитывается
6 Поток тепла через чехол моренных отложений	$Q_m = \frac{\lambda(T_m - T_{нов})}{h_m}$	Не учитывается
7 Приход тепла, приносимый с атмосферными осадками	$S = C_{p,g} P T_g$	Не учитывается
8 Величина абсолютной влажности воздуха	$e_n = 6,11 \cdot 10^{7,5T_{нов}/(273,15+T_{нов})}$	
9 Давление насыщенного пара	$e_{200} = e_n R_h$	
10 Суточные суммы суммарной радиации	$(Q + q)_0 = D_z (k_{S'} + k_D N) \sin h_n \sum S$	
11 Коэффициент k_D	$k_D = \frac{\left(1 + \frac{D}{S'}\right) \cdot 1,19 - 1}{\left(1 + \frac{D}{S'}\right) \cdot 1,04 - 1}$	
12 Альбеда	$\alpha_s = \alpha_0 + K \cdot \exp(-nr)$	

Примечание: обозначения составляющих уравнений, значения коэффициентов и констант приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения параметров, используемых при расчетах

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения	Примечание
Скрытая теплота плавления льда	L	80	кал/г	–
Высота Солнца над горизонтом в полдень	h_n	55	град.	Зависит от времени года и местоположения изучаемого объекта
Коэффициент k_s	k_s	0,72	б/р	Табл. 29, [7, с. 165]
Коэффициент N	N	0,53	б/р	формула 7.23, [7, с. 158]
Суточная сумма радиации без учета облачности, прозрачности атмосферы и угла падения солнечных лучей	ΣS	800	кал/см ²	Рис. 41, [7, с. 161]
Отношение рассеянной радиации к прямой	D/S'	0,12	б/р	Табл. 24, [7, с. 130]
Доля светлого времени суток	D_z	16/24	б/р	Измеряется в полевых условиях
Минимальное альbedo	α_0	0,25	б/р	Соответствует альbedo старого подтаявшего снега
Максимальное альbedo	α_{max}	0,85	б/р	Соответствует альbedo свежеснегавшего снега
Коэффициент K	K	$K = \alpha_{max} - \alpha_0$	б/р	–
Номер дня с момента последнего снегопада	n	Увеличивается с каждым днем на 1. В день выпадения снега приравнивается к 0	дни	–
Коэффициент рецессии	r	$\begin{cases} r = 0,04 \text{ при } T_e < 0 \\ r = 0,08 \text{ при } T_e > 0 \end{cases}$	б/р	–
Встречное излучение атмосферы	E_a	0,15	кал/(см ² ·мин)	Для горных районов принимается 0,1–0,2
Коэффициент серости излучающего материала	ε	0,98	б/р	–
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	$8,26 \cdot 10^{-11}$	кал/(см ² ·мин·К ⁴)	–
Температура поверхности ледника	$T_{пов}$	0	°С	Измеряется в полевых условиях
Температура воздуха	T_e	Измеряется в полевых условиях	°С	Измеряется в полевых условиях
Скорость ветра на высоте флюгера	u	5,1	м/с	Для высоты 3000 м в августе, табл. 6.4, [10, с. 161]
Влажность воздуха	R_h	Массив данных с дискретностью измерения сутки	в долях единицы	Измеряется в полевых условиях
Теплопроводность морены	λ	2,22	Вт/м·К	–
Температура поверхности морены	T_m	Массив данных с дискретностью измерения сутки	°С	Измеряется в полевых условиях

Окончание табл. 2

Параметр	Обозначение	Значение	Единица измерения	Примечание
Слой осадков	P	Измеряется в полевых условиях	мм	Измеряется в полевых условиях
Теплоемкость воды	$C_{p,в}$	1	кал/град	–
Общая облачность	N_o	Массив данных с дискретностью измерения сутки	в долях единицы	Измеряется в полевых условиях
Нижняя облачность	N_n	Массив данных с дискретностью измерения сутки	в долях единицы	Измеряется в полевых условиях

Оценка сходимости рассчитанных и измеренных величин слоя таяния оценивались относительно критического коэффициента корреляции:

$$K_{крит} = \frac{2}{\sqrt{m+2}}, \quad (4)$$

где m – период, для которого производилось сравнение результатов моделирования и измерений абляции.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов показал удовлетворительную сходимость суточных слоев таяния ледника, рассчитанных с помощью обоих алгоритмов и величиной абляции по данным измерений на леднике

(рис. 3). Коэффициенты корреляции K между расчетными и измеренными значениями составили 0,59 и 0,61 для первого и второго алгоритмов соответственно, что превысило в обоих случаях критическое значение коэффициента корреляции $K_{крит}$, составляющее 0,46 (при уровне значимости $\alpha = 5\%$).

$$K_{крит} = \frac{2}{\sqrt{17+2}} = 0,46.$$

Абсолютная и относительная погрешности расчетов, средняя квадратическая ошибка оказались меньше по второй модели (табл. 3). Таким образом, несмотря на упрощенную запись уравнения теплового баланса, второй алгоритм точнее описывает таяние ледника, хотя обе модели можно считать приемлемыми.

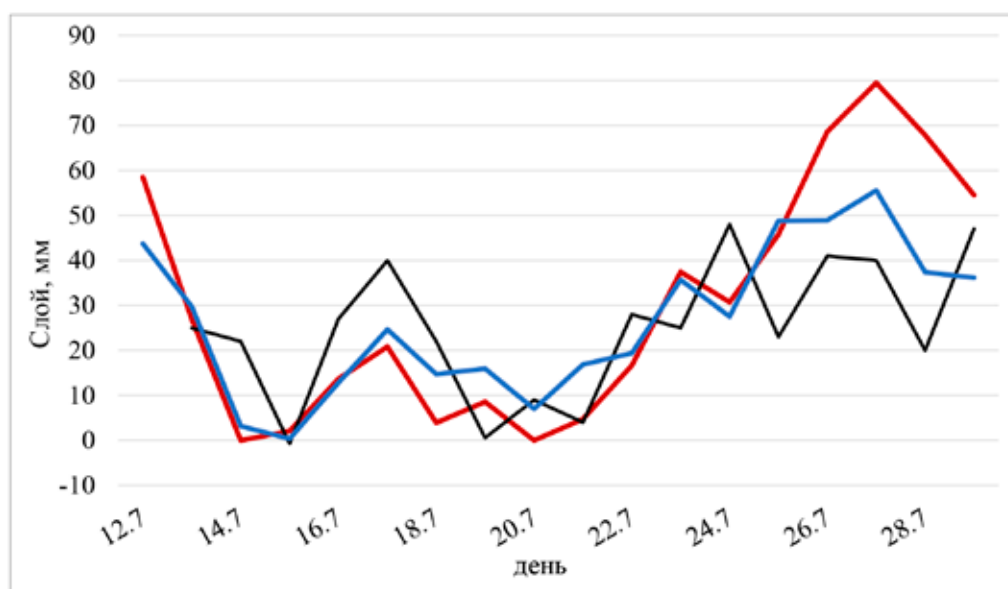


Рис. 3. Графики хода значений слоя таяния ледника Некрасова: черным цветом обозначены измеренные значения 12–29 июля 2022 г.; красным – рассчитанные по первому алгоритму; синим – рассчитанные по второму алгоритму

Таблица 3

Статистические характеристики расчетов

	1-й алгоритм	2-й алгоритм
Коэффициент корреляции	0,58	0,61
Абсолютная погрешность суммарного стока, мм	41	17
Относительная погрешность суммарного стока, %	17	4
Средняя квадратическая ошибка, мм	28,0	13,1

Таблица 4

Величины суммарного слоя таяния

Суммарный измеренный слой стока, мм	Рассчитанный по 1-му алгоритму, мм	Рассчитанный по 2-му алгоритму (формула П.П. Кузьмина), мм
421	462	438

Рассчитанная величина суммарного стока за рассмотренный период по первому алгоритму превышает суммарный сток на 10%, по второму – на 4% (табл. 4), что в целом можно считать удовлетворительным результатом в обоих случаях.

Несмотря на то, что рассматриваемые алгоритмы основаны на уравнении теплового баланса, результаты расчета заметно различаются. Было выявлено, что наибольшую погрешность в расчете первой модели вносит турбулентный теплообмен, для определения которого необходимо рассчитывать суточные величины испарения. В случае расчета последнего по формуле Семенова турбулентный теплообмен не зависит от влажности воздуха, что вносит ошибку в расчет. Кроме того, при расчете по первому алгоритму величина встречного излучения атмосферы принимается как константа (табл. 2) и не отражает реально существующую динамику, что также может вносить большую погрешность. Отметим также, что существенную ошибку при расчетах может вносить неточное определение значений суммарной солнечной радиации [5, с. 157]. Также рекомендуется использовать значения альбедо, полученные с помощью специального оборудования в полевых условиях. Особое внимание хотелось бы обратить на коэффициент D_2 . Необходимость его применения была выявлена в процессе численных экспериментов.

Все вышеприведенные факторы способны вызывать в той или иной мере погрешности и ошибки расчета. Первый алгоритм явно завышает данные, полученные в результате расчетов, из-за неподходящего уравнения для вычисления суточного испа-

рения и одновременно занижает из-за принятия значения встречного излучения атмосферы как константы. Наиболее интересен тот факт, что в сумме эти параметры дают близкие друг к другу значения, то есть ошибки нивелируют друг друга. Модель П.П. Кузьмина может занижать рассчитанные слои стока из-за недоучета тепла, приносимого с осадками.

Заключение

При тестировании алгоритмов наилучшие результаты показала модель, основанная на уравнении П.П. Кузьмина, коэффициент корреляции для расчетов стока с ледника составил 0,61 при критическом значении 0,46. Вторая модель при учете большего количества составляющих теплового баланса показала менее точный результат из-за существенных погрешностей в расчете испарения и недоучете изменений величины встречного излучения атмосферы (принималась как константа).

В дальнейшем для расчета слоев стока с ледников Алтая планируется использовать алгоритм, основанный на уравнении П.П. Кузьмина с учетом тепла, приносимого с осадками, и измеренных в полевых условиях значений приходящей радиации и скорости ветра.

Список литературы

1. Зырянова Д.С., Пряхина Г.В. Обзор методов расчета стока с водосбора, частично покрытого ледником // XIX Большой географический фестиваль: сборник материалов участников фестиваля (Санкт-Петербург, 7–9 апреля 2023 г.). СПб.: Свое издательство, 2023. С. 168–173.
2. Кузнецова М.Р., Пряхина Г.В. Методы расчета слоя таяния снега в антарктическом оазисе Холмы Ларсеманн // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. № 67 (3). С. 515–528.

3. Прохорова У.В., Терехов А.В., Иванов Б.В., Веркулич С.Р. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV, № 3. С. 50–60.
4. Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Морозова П.А. Моделирование и прогноз баланса массы горных ледников Центрального Кавказа в условиях климатических изменений // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 6 (26). С. 93–100.
5. Кузьмин П.П. Процессы таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1961. 344 с.
6. Рец Е.П., Петраков Д.А., Шпунтова А.М. Использование физико-математической модели таяния снега и льда A-Melt для реконструкции баланса массы ледников Внутреннего Тянь-Шаня // III Виноградовские чтения. Грани гидрологии: сборник докладов международной научной конференции (Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г.). СПб.: Научное издательство «Технологии» 2018. С. 122–126.
7. Сивков С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1968. 232 с.
8. Hanzer F., Helfricht K., Marke T., Strasser U. Multilevel spatiotemporal validation of snow/ice mass balance and runoff modeling in glacierized catchments // The Cryosphere. 2016. № 10. P. 1859–1881.
9. Prokhorova U., Terekhov A., Ivanov B., Demidov V. Heat balance of a low-elevated Svalbard glacier during the ablation season: A case study of Aldegondabreen // Arctic, Antarctic, and Alpine Research. 2023. Vol. 55, Is. 1. P. 1–12.
10. Севастьянов В.В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. Томск: Издательство Томского государственного университета, 1998. 201 с.