

КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 6, с. 20–30

<https://www.sibran.ru>

ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 556.5
DOI: 10.15372/KZ20240602
EDN: OPHDXL

ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ОЗЕРА НИВАЛЬНО-ГЛЯЦИАЛЬНОЙ ЗОНЫ АЛТАЯ

Г.В. Пряхина^{1,*}, В.А. Распутина¹, Е.С. Зелепукина², Д.С. Зырянова¹,
Д.В. Банцев¹, М.В. Сыромятинова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича,
193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, к. 1, Россия

*Автор для контакта; e-mail: g65@mail.ru

Расчет водного баланса для водоемов, находящихся в горах, сложен ввиду недостаточности данных наблюдений и слабой изученности ряда процессов стокоформирования. Гидрологический режим высокогорных озер определяется, с одной стороны, климатическими факторами, а с другой – особенностями подстилающей поверхности водосборных бассейнов с различным соотношением ледниковых и неледниковых частей. В статье на основе данных полевых гидрологических, метеорологических и гляциологических наблюдений выполнен расчет водного баланса с суточным шагом для перигляциального озера, расположенного на территории Южно-Чуйского хребта (Центральный Алтай). Выполненный расчет позволил оценить вклад объемов талых ледниковых вод, таяния снежников и осадков в суммарный приток воды к водоему и выявить особенности поступления талых ледниковых вод в чашу озера. Выявлена преобладающая роль подповерхностного стока в приходной части водного баланса озера.

Ключевые слова: водный баланс, водный режим, перигляциальные озера, Южно-Чуйский хребет.

Ссылка для цитирования: Пряхина Г.В., Распутина В.А., Зелепукина Е.С., Зырянова Д.С., Банцев Д.В., Сыромятинова М.В. Оценка элементов водного баланса озера нивально-глациальной зоны Алтая // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 6, с. 20–30. DOI: 10.15372/KZ20240602. EDN: OPHDXL.

ASSESSMENT OF WATER BALANCE ELEMENTS OF A LAKE IN THE NIVAL-GLACIAL ZONE OF THE ALTAI MOUNTAINS

G.V. Pryakhina^{1,*}, V.A. Rasputina¹, E.S. Zelepukina², D.S. Zyryanova¹,
D.V. Bantsev¹, M.V. Syromyatina¹

¹Saint Petersburg State University,
Universitetskaya emb. 7–9, St. Petersburg, 199034 Russia
²Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
Bolshevik ave. 22, bld. 1, St. Petersburg, 193232 Russia

*Corresponding author; e-mail: g65@mail.ru

Calculating the water balance for lakes in the mountains is difficult due to insufficient observation data and poor knowledge of a number of runoff formation processes. The hydrological regime of high-mountain lakes is determined, on the one hand, by climatic factors, and on the other hand, by the characteristics of the underlying surface of catchments with different ratios of glacial and non-glacial parts. In this article, based on data from field hydrological, meteorological, and glaciological observations, the water balance was calculated with a daily step for a periglacial lake located in the Southern Chuya Ridge (Central Altai). Calculating the water balance made it possible to estimate the contribution of meltwater from glaciers and snowfields and of precipitation to the total inflow of water to the lake and to identify the features of the meltwater inflow from glaciers into the lake. The predominant role of subsurface runoff in the incoming part of the lake water balance has been revealed.

Keywords: water balance, water regime, periglacial lakes, Southern Chuya Ridge.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет водного баланса для водных объектов, находящихся в горах, несмотря на кажущуюся простоту уравнения, осложняется ввиду недостаточности данных наблюдений и слабой изученности процессов стокоформирования. Гидрологический режим высокогорных озер определяется климатическими факторами и особенностями подстилающей поверхности водосборных бассейнов с различным соотношением ледниковых и неледниковых частей. Сложность расчета водного баланса для озер, примыкающих непосредственно к леднику, заключается в первую очередь в получении инструментальным или расчетным путем данных о величине абляции ледника. При расчете водного баланса для водосборов со значительной долей неледниковых поверхностей степень неопределенности многократно возрастает из-за существенного увеличения числа составляющих, которые на сегодняшний день не поддаются определению либо плохо изучены. Так, например, данные о коэффициентах фильтрации перигляциальных отложений обрывочны; широкое развитие провальной фильтрации затрудняет определение времени добегания ледниковых вод до чаши озера и т. д. Значительные погрешности расчетов водного баланса горных территорий обусловлены объективными трудностями учета метеорологических условий: имеющиеся малочисленные метеостанции расположены в основном в низко- и среднегорьях, что в сочетании со сложным распределением метеорологических характеристик в горах снижает достоверность полученных вертикальных плuвиометрических и температурных градиентов. Труднодоступность высокогорных территорий, трудоемкость и дороговизна многолетних стационарных наблюдений, проводимых на Алтае [Тропинов и др., 1973; Галахов, Ревякин, 1977; Копысов, 2005; Ерофеев и др., 2022], а также немногочисленность расчетов водного баланса, например, для бассейна р. Актуу [Галахов и др., 1987], делают математическое моделирование одним из оптимальных методов расчета элементов водного баланса. Однако для понимания моделируемых процессов и проверки расчетных алгоритмов необходимы также натурные наблюдения и данные полевых измерений.

Целью настоящей работы стала оценка составляющих уравнения водного баланса высокогорного моренно-подпрудного озера на основе результатов полевых наблюдений и модельных расчетов. Выбор в качестве объекта исследования на Южно-Чуйском хребте озера Таможенное обусловлен его транспортной доступностью и возможностью организации комплексных гидрологических, метеорологических и гляциологических наблюдений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морено-подпрудное озеро Таможенное (индекс YCh2 по формирующемуся каталогу озер) расположено в 850 м к северу от ледника Некрасова (рис. 1). Высота уреза воды озера 2768 м, длина озера 360 м, ширина 110 м, площадь водного зеркала на момент проведения батиметрической съемки (2022 г.) составила 25 314 м² при соответствующем объеме водной массы 49 581 м³. Вытянутый в субмеридиональном направлении водосборный бассейн озера площадью 4.98 км² расположен на северном склоне Южно-Чуйского хребта в диапазоне высот от 2770 до 3700 м н.у.м.

Общая площадь оледенения водосбора оз. Таможенное на 2023 г. составляла 1.58 км², в том числе: карово-долинный ледник Некрасова 0.96 км², несколько висячих ледников суммарной площадью 0.22 км² и 0.4 км² – часть ледника, перекрытая мореной (см. рис. 1). Границы области питания ледников Южно-Чуйского хребта соответствуют гипсометрическому уровню 3100 м [Хромова и др., 2021]. Зона абляции ледника Некрасова (от 2950 до 3100 м) отличается низкими уклонами и небольшой расчлененностью ледникового рельефа. Крутосклонность кара северо-западной экспозиции, способствующая лавинному переносу, определяет относительно большое снегонакопление на высотах 3100–3250 м и в то же время практическое отсутствие в летнее время снежно-firновой толщи на стенке кара (см. рис. 1). Выраженной зоны наложенного льда у границы питания во время полевых работ не наблюдалось.

Кроме того, в бассейне озера присутствуют многочисленные, но небольшие по площади сезонные и многолетние снежники. Вблизи края ледника на высоте 2900 м расположены небольшие (длиной 110 м и шириной 45 м), примерно одинаковых размеров приледниковые водоемы Чилл (YCh75) и НВ (YCh76). Площадь зеркала оз. Чилл на момент проведения батиметрической съемки (2022 г.) составила 1004 м². Территория водосбора представляет собой крутосклонную долину, у подножия склонов которой нагромождены конусы выноса из осыпного материала, а поверхность днища перекрыта моренными рыхлыми отложениями (размер валунов от 0.1 до 1.5 м). Сомкнутый растительный покров отсутствует, редкие пятна мхов и лишайников встречаются только вдоль берега озера. Ледниковые воды поступают в оз. Таможенное как поверхностным, так и подповерхностным путями: в южной части в водоем впадает несколько ручьев, стекающих с ледника и из приледниковых озер, причем на отдельных участках потоки переходят под поверхность (см. рис. 1, а). Целостность моренной перемычки, под-

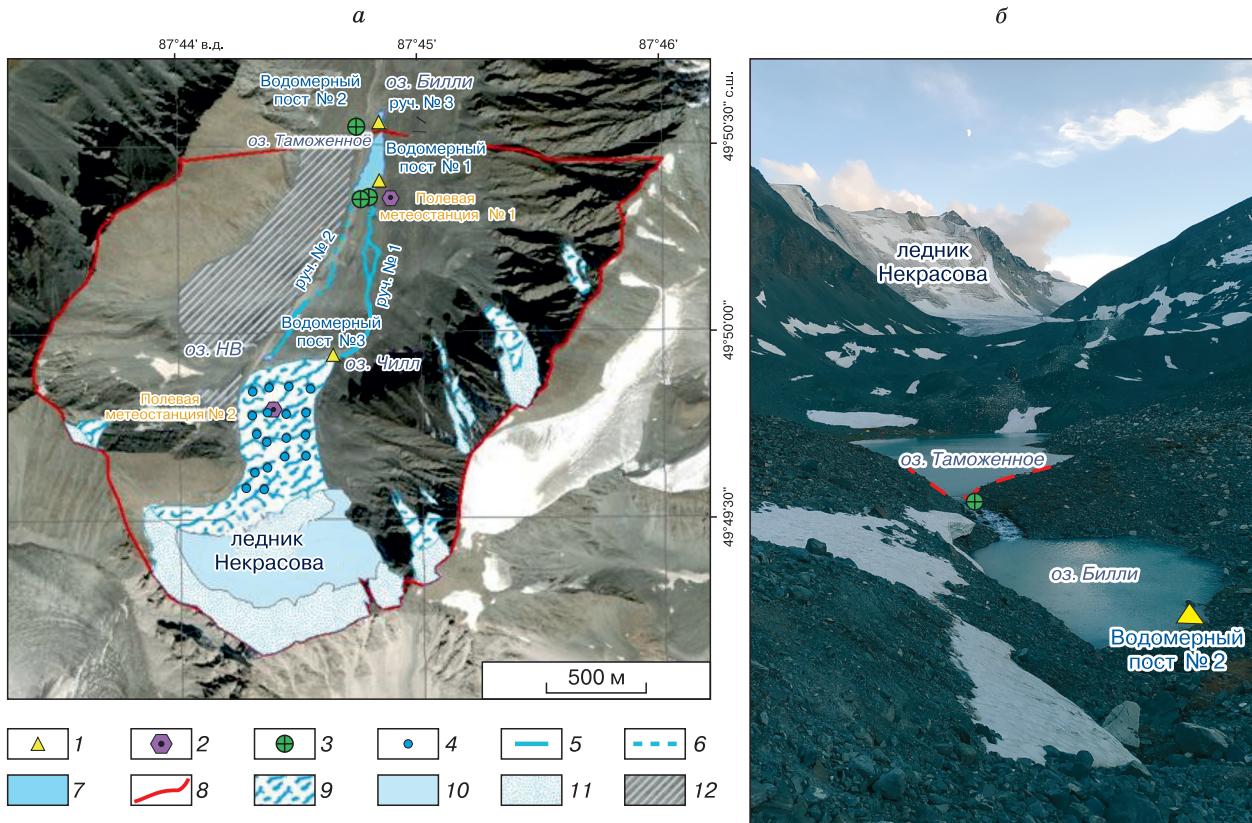


Рис. 1. Схема водосборного бассейна оз. Таможенное (а) и фотографии объектов исследования (б).

1 – водомерные посты; 2 – полевые метеостанции; 3 – пункты измерения расходов воды; 4 – аблационные рейки; 5 – водотоки; 6 – пропадающие участки ручьев; 7 – водоемы; 8 – границы водосбора оз. Таможенное; 9 – лед в зоне аблации; 10 – лед в зоне аккумуляции; 11 – снег на поверхности зоны аккумуляции; 12 – поверхность ледника, перекрытая мореной. Красным цветом на фотографии обозначен врез в подпруживающей перемычке оз. Таможенное. Фото В.А. Распутиной, 2023 г.

пружающей оз. Таможенное в северной части, нарушена трапециевидным врезом, по которому происходит отток воды в оз. Билли (YCh3), расположенное на высоте 2764 м, длиной 30 м, шириной 24 м, площадь водного зеркала 189 м² (см. рис. 1, б).

Материалами для исследования послужили данные полевых наблюдений, полученные в ходе комплексных экспедиций СПбГУ 2022 г. (11.07–29.07) и 2023 г. (11.07–4.08): ряды температуры воздуха, осадков, данные наблюдений за общей и нижней облачностью; данные о суточной величине аблации на леднике; ряды срочных уровней воды, температуры воды, влажности, скорости ветра и расходов воды, результаты наблюдений за приходящей суммарной и отраженной радиацией (табл. 1). Все наблюдения и измерения выполнялись в соответствии с утвержденными наставлениями и методиками проведения полевых работ.

Водный баланс озера рассчитывался посменно и для всего периода наблюдений. Для более детальной оценки вклада отдельных элементов при-

ходной и расходной частей баланса сутки были условно разбиты на “день” (10:00–20:00) и “ночь” (20:01–9:59). Выбор таких временных интервалов был обусловлен организацией синхронных наблюдений за величиной таяния в зоне аблации, стоком и уровнем воды. Все площади, используемые при расчете, определялись в программе ArcMap 10.4.1.

Водный баланс для периода аблации рассчитывался по уравнению

$$\Delta W_{\text{lake}} = W_{\text{inflow}} - W_{\text{outflow}} + \eta,$$

где ΔW_{lake} – изменение объема воды в озере за некоторый промежуток времени Δt , м³; W_{inflow} – приток воды в озеро, м³; W_{outflow} – отток воды из озера, м³; η – невязка, м³.

Изменение объема воды в озере ΔW_{lake} рассчитывалось как разница объемов на начало и конец расчетного периода, для определения которых использовалась кривая зависимости объемов от уровней воды, построенная по данным батиметрической съемки 2022 г.

ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ОЗЕРА НИВАЛЬНО-ГЛЯЦИАЛЬНОЙ ЗОНЫ АЛТАЯ

Таблица 1. Данные использованных в работе полевых наблюдений

Характеристика	Объект	Год	Дискретность измерений; объем данных	Способ измерения, прибор (оборудование)	Примечания
1	2	3	4	5	6
Величина аблакции	Ледник Некрасова	2022	1 раз в сутки; 432 значения	Отсчет по рейкам (с лицевой и обратной стороны) наблюдателем с точностью 0.5 см (погрешность 0.25 см); 12 реек длиной 1.5 м и диаметром 60 мм	Все рейки установлены ручным буром; плановая точность привязки реек GPS-приемником 3 м
		2023	1 раз в сутки; 720 значений	18 реек длиной 1.5 м и диаметром 60 мм	
Уровень воды	Оз. Таможенное	2022	4 раза в сутки; 72 значения	Отсчет по водомерной рейке наблюдателем с точностью 0.5 см	Сроки наблюдений 8:00, 12:00, 16:00, 20:00 часов
		2023	4 раза в сутки; 84 значения	Отсчет по водомерной рейке наблюдателем с точностью 0.5 см	
	Оз. Билли	2022	4 раза в сутки; 72 значения	Отсчет по водомерной рейке наблюдателем с точностью 0.5 см	
		2023	2 раза в сутки; 42 значения	Отсчет по водомерной рейке наблюдателем с точностью 0.5 см; уровнемер Solinst	
	Оз. Чилл	2022	48 раз в сутки; 240 значений	Уровнемер Levellogger	
		2023	48 раз в сутки; 288 значений	Уровнемер Solinst	
Скорость течения	Ручей № 1 втекающий	2022	9 значений	Измеритель скоростей ИСП-1М с винтом диаметром 70 мм	В отдельные дни проводились синхронные измерения скоростей течения каждые 2 часа с 10:00 до 20:00 на втекающих ручьях № 1 и 2 и вытекающем ручье № 3
		2023	30 значений	Поверхностные поплавки из пенополистирола (экспресс-метод)	
	Ручей № 2 втекающий	2022	9 значений	Измеритель скоростей ИСП-1М с винтом диаметром 70 мм	
		2023	30 значений	Поверхностные поплавки из пенополистирола (экспресс-метод)	
	Ручей № 3 вытекающий	2022	9 значений	Измеритель скоростей ИСП-1М с винтом диаметром 70 мм	
		2023	30 значений	Измеритель скоростей ИСП-1М с винтом диаметром 70 мм	
Глубина	Оз. Таможенное	2022	Более 1100 измерений	Галсами с весельной лодки; эхолот Garmin Echomap 42v	В 2023 г. по сравнению с 2022 г. контуры озера не изменились
		2023		Промеры вброд водомерной рейкой	
	Оз. Чилл	2022	70 измерений	Промеры вброд водомерной рейкой	
		2022	85 измерений	Промеры вброд водомерной рейкой	
	Оз. НВ	2022	12 для одного измерения		
		2023	расхода воды		
	Ручей № 1	2022	10 для одного измерения		
		2023			
	Ручей № 2	2022	10 для одного измерения		
		2023			
	Ручей № 3	2022	10 для одного измерения		
		2023			
Осадки	Полевая метеостанция № 1 на берегу оз. Таможенное (2770 м)	2022	1 раз в сутки; 18 значений	Осадкомер пластиковый	Время снятия отсчета 20:00 Время снятия отсчета в сроки наблюдения за уровнем воды Время снятия отсчета 12:00
		2023	4 раза в сутки; 84 значения		
	Полевая метеостанция № 2 на леднике Некрасова (3000 м)	2022	1 раз в сутки; 18 значений		
		2023	1 раз в сутки; 21 значение		
Температура и влажность воздуха	Полевая метеостанция № 1	2022	84 раза в сутки; 1728 значений	Автоматические датчики EClerk-M-RHT на высоте 2 м; дискретность измерений 15 мин	Помимо наблюдений за температурой датчики фиксировали относительную влажность воздуха
		2023	84 раза в сутки; 2268 значений		
	Полевая метеостанция № 2	2022	84 раза в сутки; 1512 значений		
		2023	84 раза в сутки; 1344 значений		

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
Температура поверхности	Температура морены в прибрежной части озер	2022	331 значение	Автоматический барологер Levellogger, дискретность измерений 30 мин	Барометр был установлен на поверхности морены
		2023	48 раз в сутки; 288 значений	Автоматический барологер Solinst, дискретность измерений 30 мин	
	Температура ледника	2023	3 раза в течение измерения аблации; 72 значения	Электронный термометр	Термометр установлен на поверхности ледника
Общая и нижняя облачность Скорость ветра	Полевая метеостанция № 1	2022	4 раза в сутки; 72 значения	Визуальные наблюдения	Сроки наблюдений 8:00, 12:00, 16:00, 20:00 часов
	Полевая метеостанция № 1	2023	4 раза в сутки; 84 значения	Чашечный анемометр MC-13	
Солнечная радиация (суммарная приходящая и отраженная)	Полевая метеостанция № 1	2023	Ежедневно в астрономический полдень и дополнительно в дни синхронных наблюдений за стоком проводились измерения каждый час суммарной приходящей и отраженной радиации	Пиранометр ПЕЛЕНГ СФ-06-21	Параллельно велись наблюдения за облачностью (общей и нижней). Отраженная радиация измерялась для разных поверхностей: ледник, снежник, морена
	Полевая метеостанция № 2		Измерения приходящей суммарной и отраженной радиации проводились несколько раз в полевой сезон с целью определения альбедо поверхности ледника		

Приток к озеру рассчитывался по уравнению

$$W_{\text{inflow}} = W_{\text{ice}} + W_{\text{snow}} + W_{\text{precip}} + W_{\text{ice/m}},$$

где W_{ice} – объем притока талой ледниковой воды, м³; W_{snow} – объем притока талой воды снежников и(или) сезонного снега, м³; W_{precip} – объем дождевых осадков, выпавших на поверхность водосбора и озера, м³; $W_{\text{ice/m}}$ – объем притока талой воды с зоны льда, перекрытого мореной, м³.

Объем притока талой воды с ледника определялся по формуле

$$W_{\text{ice}} = A_{\text{acc}} S_{\text{acc}} \cdot 10^{-3} + A_{\text{abl}} S_{\text{abl}} \cdot 10^{-3},$$

где A_{acc} – величина суточного таяния в зоне аккумуляции, мм водного столба; S_{acc} – площадь ледника в зоне аккумуляции, м²; A_{abl} – величина суточного таяния в зоне аблации, осредненная по всем рейкам методом Kriging в программе ArcMap, мм вод. ст.; S_{abl} – площадь ледника в зоне аблации, м².

Расчет таяния льда в зоне аккумуляции A_{acc} осуществлялся по формуле П.П. Кузьмина [1961], которая была дополнена составляющей, отвечающей за приносимое с дождевыми осадками тепло:

$$A_{\text{acc}} = \frac{1000}{L\rho} \left[(Q' + q)_0 (1 - r) (1 - 0.20N_T - 0.47N_L) - \right.$$

$$\left. - 86400 \varepsilon \sigma \theta_s^4 + 86400 \left(0.62 + 0.05 \sqrt{e_{200}} \right) \times \right]$$

$$\times \left(1 + 0.12N_T + 0.12N_L \right) \varepsilon \sigma \theta_a^4 + 0.001 \rho C_{p,w} P \theta_a \right] + \\ + a_c \gamma u, \quad (1)$$

где L – удельная теплота плавления, Дж/кг; ρ – плотность, кг/м³; $(Q' + q)_0$ – суточная суммарная солнечная радиация при безоблачном небе, Дж/м²; r – альбето поверхности; N_T , N_L – общая и нижняя облачность соответственно, д.ед.; ε – относительная поглощающая способность длинноволновой радиации деятельным слоем (коэффициент серости), бар/рад; σ – постоянная Стефана–Больцмана ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²· К⁴)); θ_a – температура воздуха, К; θ_s – температура поверхности, К; e_{200} – абсолютная влажность воздуха, мбар; u – скорость ветра на высоте флюгера, м/с; $C_{p,w}$ – теплоемкость воды, Дж/(кг· К); P – слой осадков, мм; $a_c \gamma u$ – составляющая таяния, обусловленная турбулентным теплообменом с атмосферой и скрытой теплотой конденсации и испарения.

Переменные a_c и γ в уравнении (1) определяются следующими выражениями:

$$a_c = 0.878 \frac{1 + 0.547u}{u},$$

$$\gamma = (\theta_a - \theta_s) + 1.75 (e_{200} - e_{ww}),$$

где e_{ww} – максимальная упругость водяного пара, мбар.

Время добегания талой воды по ледниковой поверхности оценивалось по разнице во времени наступления максимальных температур воздуха на леднике и максимального уровня воды в приледниковом озере Чилл.

Величина объема притока талой воды со снежников и сезонного снега в различных зонах на территории водосбора (W_{snow}) рассчитывалась по формуле

$$W_{\text{snow}} = h S_{\text{snow}} \cdot 10^{-3},$$

где h – слой таяния снежников, мм; S_{snow} – площадь снежников, м^2 .

Согласно П.П. Кузьмину [1961], расчет слоев таяния и испарения со снега произведен по формулам, аналогичным для льда (1), с соответствующими значениями альбедо r , коэффициента серости ε и скрытой теплоты плавления L .

Объем осадков (W_{precip}) определялся как произведение суммы осадков (по данным осадкомеров) и площади водосбора/озера. Время добегания выпавших жидких осадков устанавливалось по совмещенному графику хода уровня воды оз. Таможенное и суточных сумм осадков.

Объем притока талой воды с зоны ледника, перекрытого мореной, определялся уравнением

$$W_{\text{ice/m}} = A_{\text{ice/m}} S_{\text{ice/m}} \cdot 10^{-3},$$

где $A_{\text{ice/m}}$ – величина суточного таяния перекрытого мореной льда, мм вод. ст.; $S_{\text{ice/m}}$ – площадь зоны перекрытого мореной льда, м^2 .

Объем суточного таяния льда, перекрытого мореной, определялся на основе уравнения теплового баланса:

$$\begin{aligned} A_{\text{ice/m}} = & \frac{1000}{L\rho} \left[(Q' + q)_0 (1 - r) (1 - 0.20N_T - 0.47N_L) - \right. \\ & - 86400\varepsilon\sigma\theta_s^4 + 86400 \left(0.62 + 0.05\sqrt{e_{200}} \right) \times \\ & \times \left. (1 + 0.12N_T + 0.12N_L) \varepsilon\sigma\theta_a^4 + 86400 \lambda_m \left(\frac{d\theta_m}{dz} \right) \right], \end{aligned}$$

где λ_m – теплопроводность морены, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; θ_m – температура поверхности морены, К; z – глубина, м.

Расчет испарения со снега и льда ($E_{\text{ice/snow}}$) выполнялся по формуле [Кузьмин, 1961]:

$$E_{\text{ice/snow}} = (0.18 + 0.098u) (e_{wv} - e_{200}).$$

Величина испарения с морены (E_m) определялась по формуле [Константинов, 1968]:

$$E_m = \left(\frac{0.018(\theta_m - \theta_a)}{u} + 0.097u \right) (e_{wv} - e_{200}).$$

Для установления времени, за которое талые воды и осадки поступают в озеро, определялось

время добегания по неледниковой поверхности по разнице во времени наступления максимального уровня воды в приледниковом озере Чилл и в оз. Таможенное.

Отток воды из озера рассчитывался по уравнению

$$W_{\text{outflow}} = Z + Y,$$

где Z – объем испарения с поверхности озера, м^3 ; Y – объем руслового оттока из озера, м^3 .

Объем испарения Z рассчитывался как произведение слоя испарения E_{lake} на площадь озера.

Слой испарения с поверхности воды рассчитывался по формуле ГГИ [Албул, 2012]:

$$E_{\text{lake}} = 0.14 (1 + 0.72u) (e_{wv} - e_{200}).$$

Объем руслового оттока (Y) определялся по данным измерений расходов воды:

$$Y = Q_{\text{outflow}} \Delta t,$$

где Q_{outflow} – измеренный расход воды в ручье, $\text{м}^3/\text{с}$; Δt – интервал времени, с.

Количество воды, которое перехватывают приледниковые озера Чилл и НВ, определялось по зависимости объема водоемов от отметки уровня воды, полученной по результатам батиметрической съемки 2022 г.

Такие составляющие водного баланса, как повторное замерзание воды в снежно-firновой толще, расход талых вод на формирование наложенного льда и задержка талых вод в теле ледника, подземный приток или отток, фильтрация из озера, подземная аккумуляция воды в грунтах, слагающих берега и ложе водоема, в настоящей работе не учитывались. Все неучтенные компоненты были отнесены к невязке баланса (η), которая представляет собой суммарную погрешность расчета из-за слабой изученности элементов водного баланса либо их недоучета из-за отсутствия данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВОДНОГО БАЛАНСА И ОБСУЖДЕНИЕ

Балансовые расчеты были выполнены на основе измеренных и расчетных значений с суточным шагом, а также в целом за период.

Приходная часть уравнения водного баланса

Величина среднесуточной абляции ледника в 2022 г. (от 0 до 48 мм) была на 33 % ниже, чем в 2023 г. (от 14 до 94 мм). Ожидаемо величина абляции уменьшалась с увеличением высоты, а при приближении к границе “ледник–морена” росла, что связано с большим содержанием каменного материала во льду. Учитывая тесную связь между величиной абляции и среднесуточной температурой воздуха, измеренной на метеостанции, расположенной на леднике (коэффициенты корреляции составили 0.7 в 2022 г. и 0.8 в 2023 г.), а

также соответствие величин аблации средним региональным значениям, можно предположить, что оценка времени добегания талой воды на леднике по разнице в наступлении максимальной температуры воздуха над ледником и максимального уровня в приледниковом озере будет корректной.

Максимальные температуры воздуха, измеренные над ледником, регистрировались в интервале 15.00–17.00 часов для двух лет. Максимальные уровни воды, измеренные в примыкающем к краю ледника озере Чилл, в более холодном июле 2022 г. (по полевой метеостанции № 2 на леднике средняя температура воздуха составила 3.4 °C) наступали через 1.5–3 ч, а в более теплом июле 2023 г. (по полевой метеостанции № 2 на леднике средняя температура воздуха составляла 8.2 °C) через 2–4.5 ч (рис. 2, *a*), что в среднем составило около 3 ч. Вариация значений времени добегания, по мнению авторов, объясняется различной площадью таяния, а значит, и увеличением времени добегания в более теплый месяц. Поскольку жидкие осадки оказывают отепляющее воздействие и приводят к увеличению таяния (см. рис. 2, *b*), для оценки времени добегания были выбраны дни без осадков либо с очень малыми суммами осадков, а именно, период с 25 по 28 июля 2023 г.

Разница во времени наступления максимальных значений уровней воды в озерах Чилл и Таможенное (рис. 3) дает представление о скорости поступления суммарного (руслового и подповерхностного) притока к чаше водоема. Максимальный уровень воды в каскаде озер Таможенное–Билли регистрировался в интервале 4:30–5:30 часов, что в среднем на 8.5 ч позже, чем в оз. Чилл. Таким образом, время добегания не превышало суток, талый сток с ледника достигал чаши озера в среднем за 11–12 ч.

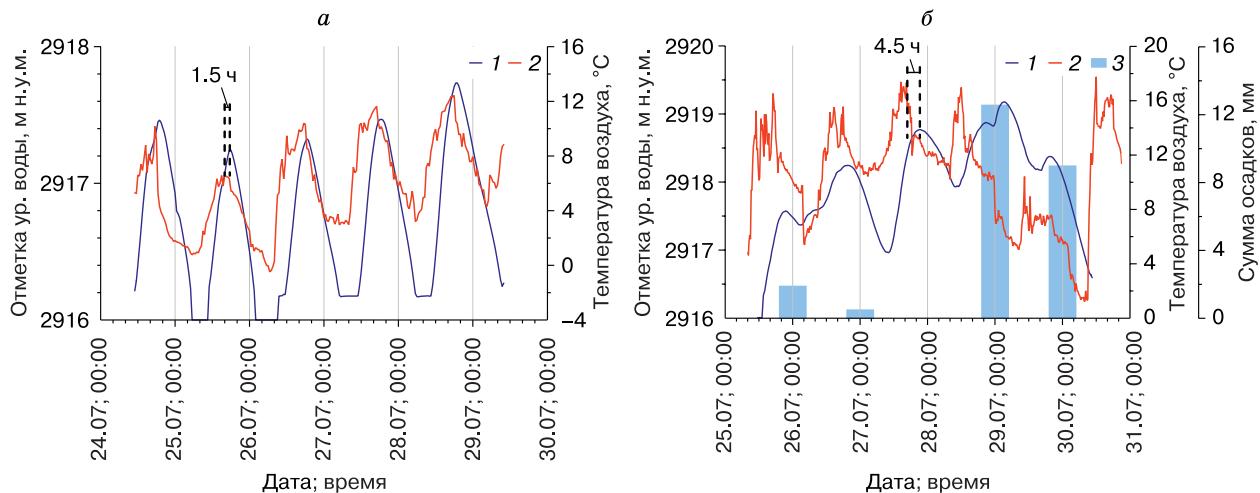


Рис. 2. Совмещенный ход уровня воды на водомерном посту на оз. Чилл и температура воздуха на метеостанции, расположенной на леднике Некрасова в 2022 г. (*a*) и 2023 г. (*b*). 1 – уровень воды; 2 – температура воздуха; 3 – суточная сумма осадков.

Для определения вклада таяния снежников в приходную часть уравнения водного баланса необходимо определить площадь снежников на водосборе на каждые расчетные сутки. Сравнительный анализ спутниковых снимков показал, что в исследуемый период площадь снежников на водосборе сократилась с 735 900 м² (14.07.2023 г.) до 21 800 м² (31.08.2023 г.). По построенной кривой для каждого расчетных суток определялась площадь снежников (рис. 4). Величина слоя таяния снежников, согласно расчетам, изменялась от 19 до 96 мм вод. ст. в зависимости от метеоусловий.

В дождливые дни (21, 29 и 30 июля 2023 г.) суммы выпавших осадков составили 10, 12.8 и 9.2 мм. В остальные дни величина суточных сумм осадков была менее 4 мм, что сопоставимо с величиной испарения и поэтому незначительно отразилось на росте уровня воды в оз. Таможенное.

Расходная часть уравнения водного баланса

Анализ измеренных расходов воды в вытекающем из озера ручье № 3 показал внутрисуточную вариативность значений, обусловленную изменением величины таяния в зависимости от погодных условий. Так, в период наблюдений с 10:00 до 16:00 часов фиксировалось снижение расходов воды, а затем их увеличение в соответствии с ходом уровня воды в озере. В зависимости от величины притока талых вод в озеро расход воды изменялся в диапазоне от 0.46 до 1.75 м³/с.

Рассчитанные величины суточного слоя испарения с водосбора изменились от 1 до 2 мм, что в пересчете на суммарный слой за исследуемый период составило 28 мм.

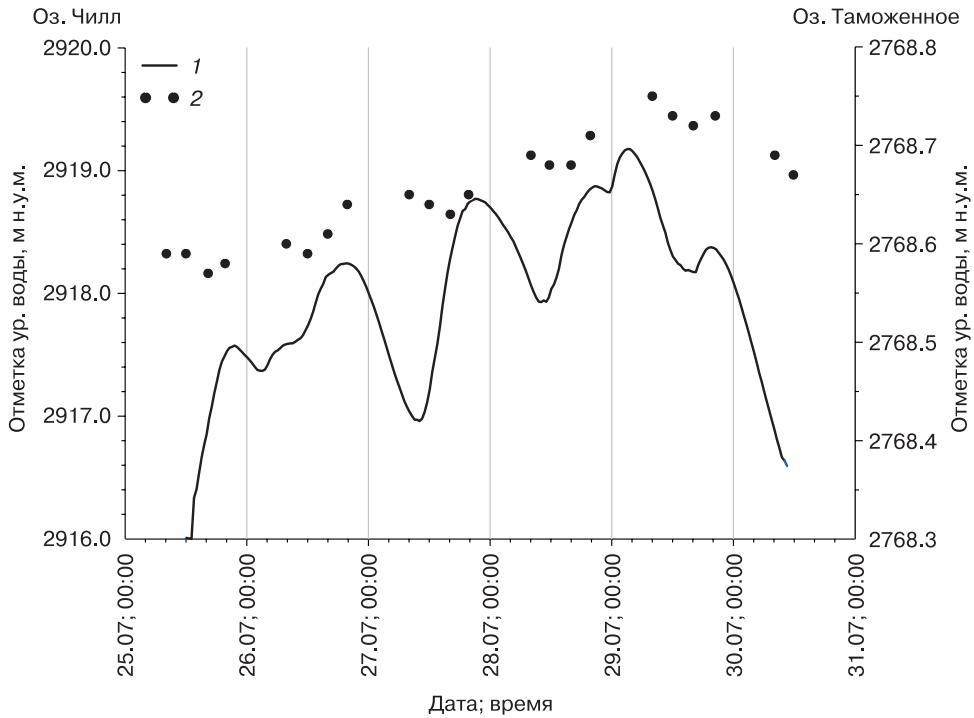


Рис. 3. Совмещенный график изменения уровня воды на озерах Таможенное и Чилл в 2023 г.

1 – данные, полученные по логгеру (оз. Чилл); 2 – дискретные значения (срочные наблюдения за уровнем воды по рейке на оз. Таможенное).

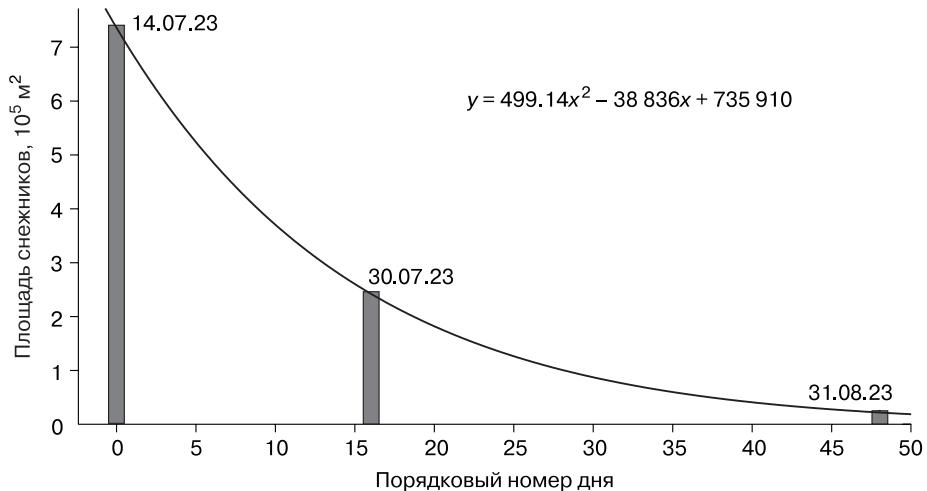


Рис. 4. Изменение площади снежников за июль–август 2023 г.

Увязка водного баланса

Величина невязки суточного водного баланса изменялась в пределах от -7 до $+9$ мм (рис. 5). В целом изменение суточной невязки соответствовало ходу среднесуточной температуры воздуха над ледником. Максимальные по модулю отрицательные суточные невязки, полученные в дни с пониженными температурами воздуха и низкими

величинами таяния, связаны, вероятно, с поступлением дополнительного количества воды за счет расходования динамических запасов ледника. Максимальные по модулю положительные значения невязки свидетельствовали о накоплении талой воды в емкостях перехвата, например, водоемах, коре таяния и др. Величина суммарной невязки за весь исследуемый период составила $+18$ мм.

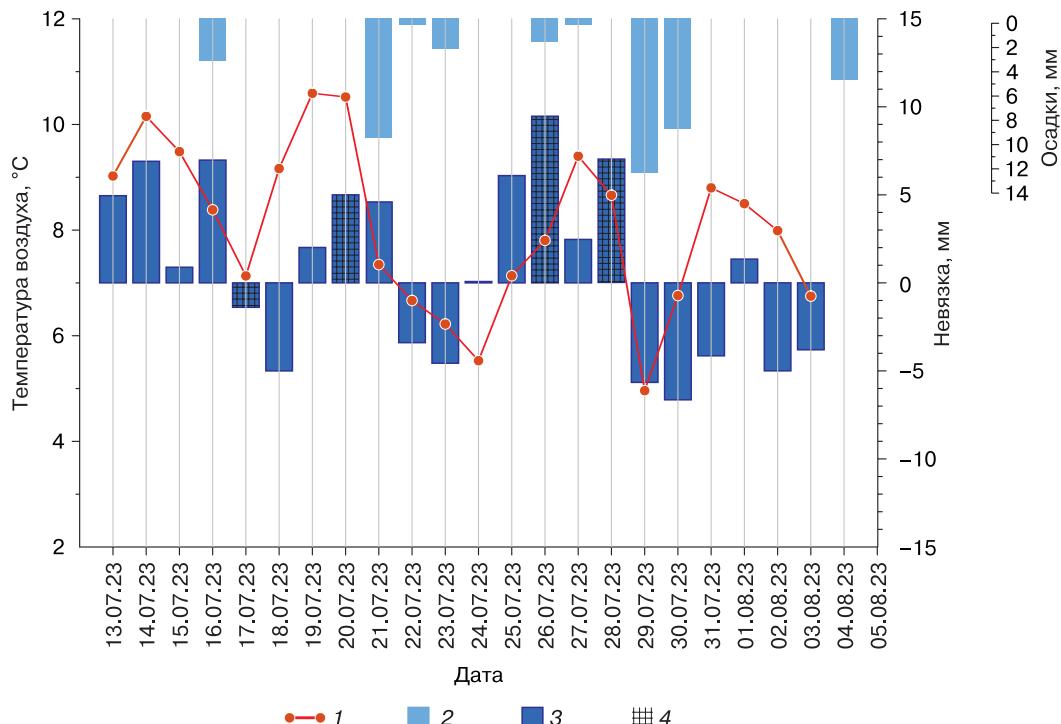


Рис. 5. Совмещенный ход среднесуточной температуры воздуха, суточных сумм осадков и величины невязки.

1 – среднесуточная температура воздуха; 2 – суточные суммы осадков; 3 – величина невязки; 4 – невязка в дни синхронных наблюдений.

Для анализа регулирующей роли приледниковых озер Чилл и НВ были оценены емкости перехвата. В период наблюдений 2022 г. ход уровня оз. Чилл четко соответствовал ходу аблации: увеличение в дневные часы и уменьшение ночью. В более теплом 2023 году размеры водоема увеличились, канал стока перестал справляться с

возросшими объемами воды, что изменило характер хода уровня: в течение отдельных суток и в целом за период наблюдался рост уровня воды с непериодическим спуском озерных вод (см. рис. 2, б). Емкость перехвата в зависимости от условий конкретных суток изменялась от 2000 до 7000 м³. Учет такого “регулирования” оз. Чилл

Таблица 2. Распределение стока в течение суток в дни синхронных наблюдений

Дата	Объем аблации на леднике (м ³)	Объем таяния снежников за сутки (м ³) ¹	Суммарный приток с учетом осадков и испарения (м ³)	Сток (м ³) за период с 10:00 до 20:00			Сток (м ³) за период с 20:00 до 10:00			Доля дневного/ночного притока от общего (%)		
				суммарный русло-рековый приток ²	русло-рековый отток с учетом аккумуляции в озере ³	суммарный подповерхностный приток ⁴	доля притока русло-рековым путем от общего притока (%)	русло-рековый отток с учетом аккумуляции в озере ³	суммарный русло-рековый приток ⁵			
17.07	58 506	52 705	5171	14 904	59 886	44 982	13	85 198	23 654	32 842	20	52/48
20.07	83 168	38 661	-6132	6430	42 048	35 618	6	65 696	13 572	60 077	12	36/64
24.07	38 178	12 772	2878	6876	22 046	15 170	13	39 180	9323	22 459	17	41/59
26.07	65 208	20 875	416	4018	19 447	15 429	5	30 617	5946	61 106	7	23/77
28.07	89 115	21 922	-3126	7387	28 868	21 481	7	57 629	16 006	63 037	15	27/73

¹ Рассчитан по формуле Кузьмина. ² Определен по измеренным расходам. ³ Определен по измеренным расходам.

⁴ Рассчитан как разница между измеренными русловым оттоком и русловым притоком. ⁵ Определен по восстановленным расходам. ⁶ Рассчитан как разница между суммарным притоком и оттоком (суммарным дневным и русловым ночных).

ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА ОЗЕРА НИВАЛЬНО-ГЛЯЦИАЛЬНОЙ ЗОНЫ АЛТАЯ

при расчете баланса в среднем снижает невязку баланса на 1–2 мм. Отметим также, что в связи с мелководностью оз. НВ (на момент исследований глубина не превышала 0,5 м) роль водоема в перехвате талого ледникового стока пренебрежимо мала: чаша водоема быстро заполнялась водой, после чего происходил ее перелив через гребень подпруживающей озеро моренной перемычки.

По оценкам авторов, мощность коры таяния на леднике Некрасова невелика и количество задержанной в ней воды оценивается не более 10 % от величины суточной аблации, что соответствует слою воды в среднем ~6 мм вод. ст. для июля 2023 г., а в пересчете на весь водосбор составило ~2 мм. Полученное значение согласуется с оценкой величины аккумуляции воды в коре таяния по данным наблюдений на леднике Джанкуат на Кавказе [Голубев, 1976].

Анализ соотношения элементов уравнения водного баланса в дни, когда происходили синхронные изменения расходов воды (табл. 2), показал, что в среднем около 40 % талого и дождевого стока поступало в озеро в период с 10:00 до 20:00 часов. С учетом времени добегания этот сток формировался в предыдущие 12 часов. Объем руслового притока по измеренным данным составлял в среднем 14 % от суммарного суточного притока воды к озеру. Это означает, что в течение суток большая часть воды поступала в озеро подповерхностным путем.

Подобный тип стекания не является фильтрацией, а скорее всего, представляет собой потоки воды в дренах в толще морены, причем даже при низкой водности эти потоки сохраняют “характер свободного течения”. В гидрологической литературе такой вид стекания обозначается как “быстрый грунтовый сток” со средними скоростями от нескольких сантиметров до долей сантиметра в секунду [Гарциман и др., 2020]. Наша экспертная оценка скорости движения подповерхностного потока составила около 3 см/с. Наличие подобного подповерхностного стока было зафиксировано авторами на водосборе оз. Нуурган в Монгольском Алтае [Пряхина и др., 2021].

Таким образом, можно утверждать, что для озер внутриконтинентальных гор Сибири, расположенных на некотором удалении от ледника, значительная часть талой воды поступает подповерхностным путем.

На основе расчетов суточных водных балансов был получен баланс для всего периода наблюдений (табл. 3). Основной вклад в приходную часть баланса оз. Таможенное за период наибольшей аблации внесло таяние ледника и снежников. Непревышение суммарной невязки 10%-го порога допускает неучет трудноопределимых составляющих баланса перигляциальных озер без сущ-

Таблица 3. Составляющие водного баланса оз. Таможенное за период 13.07–03.08.2023 г.

Составляющие водного баланса	Слой, мм
Таяние льда в зоне аблации	109
Таяние льда, снега в зоне аккумуляции	129
Таяние перекрытого мореной льда	61
Таяние снежников на неледниковой части водосбора	112
Сумма осадков	35
Испарение	28
Отток с учетом аккумуляции в озере	400
Невязка	18

Причина. Площадь водосбора озера 4,89 км², доля оледенения 26 %.

ственной потери точности, что важно как при моделировании, так и при расчетах на неизученных объектах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые для перигляциального озера Алтая были выполнены балансовые расчеты с суточным шагом. Основной вклад в суммарный приток воды к водоему вносит таяние ледников и снежников, при этом выявлен преобладающий способ поступления воды в чашу озера подповерхностным путем. Предложенная оценка скорости движения подповерхностного стока для исследуемого водосбора сопоставима с литературными данными.

Большие значения невязки при расчете суточных балансов связаны с невозможностью инструментальной фиксации таких процессов, как формирование динамических запасов ледника и их расходование, поверхностное задержание воды в емкостях перехвата (понижениях в рельефе, котловинах малых приледниковых водоемов) на водосборе исследуемого озера, потеря воды на сливание каменистого материала и др., в сочетании с отсутствием достаточных данных для их моделирования. На современном этапе можно судить лишь на качественном уровне о причинах отдельных экстремальных значений полученных невязок. Вместе с тем увеличение временного интервала при расчете водного баланса снижает величину невязки.

Накопление фактического материала в результате дальнейших исследований озерно-ледниковых комплексов в перспективе приведет к более точной количественной оценке элементов баланса и учету таких составляющих, как, например, регулирующая роль ледника.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 23-27-00171 “Моделирование прорывов водоемов, подпруженных дамбами естественного происхождения”).

Литература

Албул И.П. Применение формулы ГГИ для расчета испарения с водной поверхности при различном составе исходной информации // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Науки о Земле, 2012, вып. 3, с. 125–136.

Галахов В.П. Ледники Актуру / В.П. Галахов, Ю.К. Нарожнев, С.А. Никитин и др. Л., Гидрометеоиздат, 1987, 117 с.

Галахов В.П., Ревякин В.С. Водный баланс горно-ледникового бассейна р. Актуру // Материалы гляциол. исслед., 1977, № 30, с. 179–185.

Гарцман Б.И., Губарева Т.С., Лупаков С.Ю. и др. Формы линейной организации склонового стока в среднегорье (на примере Сихотэ-Алиня) // Вод. ресурсы, 2020, т. 47, № 2, с. 123–132.

Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л., Гидрометеоиздат, 1976, 249 с.

Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Гармаева Т.Б. Оценка испаряемости в горно-ледниковом бассейне Актуру на основе фактических данных и геоинформационного моделирования // Геосфер. исслед., 2022, № 4, с. 96–108.

Константинов А.Р. Испарение в природе. Л., Гидрометеоиздат, 1968, 532 с.

Копысов С.Г. Ландшафтная гидрология геосистем лесного пояса Центрального Алтая: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2005, 20 с.

Кузьмин П.П. Процессы таяния снежного покрова. Л., Гидрометеоиздат, 1961, 344 с.

Пряхина Г.В., Кашкевич М.П., Попов С.В. и др. Формирование и развитие моренного (приледникового) озера Нуруган, Северо-Западная Монголия // Криосфера Земли, 2021, т. XXV, № 4, с. 26–35.

Тронов М.В., Олейник И.Я., Шантыкова Л.Н. Опыт комплексного исследования водного баланса в горно-ледниковом репрезентативном бассейне (бассейн Актуру на Алтае) // Гляциогидроклиматология горных стран, 1973, № 25, с. 66–73.

Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф. и др. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лед и снег, 2021, т. 61, № 3, с. 341–358.

References

Albul I.P. Application of the GGI formula for calculating evaporation from a water surface with different composition of the initial information. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle [Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences], 2012, vol. 3, p. 125–136.

Galakhov V.P., Narozhnev Yu.K., Nikitin S.A. et al. Ledniki Aktru [Aktru Glaciers]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 117 p. (in Russian).

Galahov V.P., Revjakin V.S. Water balance of the mountain-glacial basin of the Aktru river. Materialy glaciologicheskikh issledovanij [Materials of glaciological research], 1977, No. 30, p. 179–185.

Gartsman B.I., Gubareva T.S., Lupakov S.Y., Shamov V.V., Shekman E.A., Orlyakovskii A.V., Tarbeeva A.M. The forms of linear structure of overland flow in medium-height mountain regions: case study of the Sikhote Alin. Water Resources, 2020, vol. 47 (2), p. 179–188.

Golubev G.N. Gidrologiya lednikov [Hydrology of glaciers]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1976, 249 p. (in Russian).

Erofeev A.A., Kopysov S.G., Garmaeva T.B. Estimation of evaporation in the Aktru mountain-glacier basin based on actual data and geoinformation modeling. Geosfernye issledovaniya [Geosphere Research], 2022, No. 4, p. 96–108.

Konstantinov A.R. Isparenie v prirode [Evaporation in nature]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1968, 532 p. (in Russian).

Kopysov S.G. Landshaftnaja hidrologija geosistem lesnogo pojasa Central'nogo Altaja [Landscape hydrology of geosystems of the forest belt of Central Altai]: Abstract of the thesis for a Candidate Degree in Geographical Sciences. Tomsk, 2005, 20 p. (in Russian).

Kuz'min P.P. Processy tajania snezhnogo pokrova [Processes of melting snow cover]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1961, 344 p. (in Russian).

Pryakhina G.V., Kashkevich M.P., Popov S.V., Rasputina V.A., Boronina A.S., Ganyushkin D.A., Agatova A.R., Nepop R.K. Formation and evolution of moraine-dammed (periglacial) lake Nurgan, northwestern Mongolia. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2021, vol. XXV, No. 4, p. 22–29.

Tronov M.V., Olejnik I.Ja., Shantykova L.N. Experience of a comprehensive study of water balance in a representative mountain-glacial basin (Aktru basin in Altai). Glyaciogidroklimatologija gornyh stran [Glaciohydroclimatology of mountain countries], 1973, No. 25, p. 66–73.

Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Y., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). Led i sneg [Ice and Snow], 2021, vol. 61, No. 3, p. 341–358.

Поступила в редакцию 2 июля 2024 г.,
после доработки – 31 июля 2024 г.,
принята к публикации 18 октября 2024 г.