

---

## ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

---

УДК 556.5

# МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ЛЕДНИКА ЛЕВЫЙ АКТРУ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОМЕТРИИ

© 2025 г. С. Г. Копысов<sup>1,2,\*</sup>, Д. А. Вершинин<sup>1</sup>, А. А. Ерофеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

\*e-mail: wosyrok@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2025 г.

После доработки 14.08.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

Формирование стока – многофакторный процесс, по-разному раскрывающийся под воздействием природно-климатических условий, что особенно ярко проявляется в условиях высокой неоднородности, характерной для горно-ледниковых бассейнов. Измерения стока воды с ледников не позволяют в полной мере контролировать данные гляциологического мониторинга, но дают возможность лучше понять физические процессы, связывающие местные метеорологические условия и таяние льда. Так, по результатам гидрометрических наблюдений за лето 2022 и 2023 гг. удалось выяснить, что в этот период гидрограф стока с ледника Левый Актру в основном формируют жидкие осадки и аблация ледника за предыдущие двое суток. Для удлинения рядов средних летних температур и осадков использовались уравнения связи данных метеостанции Актру – Голубое озеро (действует с августа 2019 г) и ГМС Кара-Тюрек. По полученным зависимостям был удлинён ряд стока воды за июнь–август с ледника Левый Актру и восстановлены пропуски в наблюдениях за аблацией. Сравнительный анализ восстановленных и измеренных значений выявил, что полученные расчётные зависимости завышают значения аблации в годы с пониженными летними температурами, для которых характерны летние снегопады. По ГМС Кара-Тюрек критическая средняя летняя температура, выше которой снижается вероятность снегопадов и увеличивается интенсивность таяния ледника Левый Актру, составляет +5.8 °C.

**Ключевые слова:** ледник, горная гидрология, ледниковый сток, формирование стока, аблация, эмпирико-статистические расчёты, Алтай

**DOI:** 10.7868/S2412376525040041

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата и сокращение ледников оказывают разнонаправленное влияние на сток горно-ледниковых рек в зависимости от местных условий и степени трансформации оледенения (Pellicciotti et al., 2010). Очевидно, что без понимания физических процессов, которые связывают местные метеорологические условия и таяние льда, невозможно достоверно моделировать изменения ледников. По данным (Корнилова и др., 2024), помимо общего потепления, свой вклад в изменения стока вносит изменение осадков, что требует детальных региональных исследований в освоенных горных регионах с использованием наиболее актуальной информации об оледенении

и прогнозах его изменения на фоне изменения других климатических факторов.

В работе (Торопов и др., 2020) наблюдаемое увеличение стока рек Алтая связывается с увеличением таяния льда за счёт положительного тренда теплового баланса, обусловленного в первую очередь ростом радиационного баланса из-за уменьшения количества общей облачности, а также увеличения турбулентного теплообмена атмосферы с ледниками.

Идея гидрологического контроля вполне естественна. По воспоминаниям М. Б. Дюргерова (1987) на гляциологических семинарах и симпозиумах всегда можно было ожидать вопрос М. В. Тронова: “А что показал гидрологический контроль?”. Смысл вопроса заключался в том, что

сток с ледника, аблация, измеренная гляциологическим способом или рассчитанная по методу теплового баланса (или температуре воздуха) должна быть проконтролирована измерениями стока на замыкающем бассейн гидрометрическом створе. Сам М.Б. Дюргеров считал (1987), что надо говорить не о контроле, а о независимом гидрометрическом измерении ледникового стока, но это не означает, что по своей точности он может быть контролирующим для гляциологического метода измерения аблации и ледникового стока.

Цель работы – реализация прямой и обратной задач гидрологического контроля аблации на леднике Левый Актуру. Практический эффект решения такой задачи связан с научным обоснованием условий и возможностей для восстановления пропусков и удлинения рядов наблюдений за интенсивностью таяния ледников по данным измеренного стока, атмосферных осадков и температуры воздуха.

Для получения сопоставимых гляциологических и гидрометрических данных створов, где производится учёт стока воды, должен располагаться максимально близко к исследуемому леднику, чтобы минимизировать внеледниковую часть бассейна, а также испарение и просачивание. Однако полного соответствия данных, полученных различными способами, невозможно достичь как из-за погрешности измерений, так и из-за разнообразия природных условий в горно-ледниковых бассейнах.

Фирн, снег и обнажённый лёд, а также их сочетания создают различные условия для преобразования талой воды в поверхностный и внутриледниковый сток. Поэтому в работе (Mackay et al., 2018) предложены три структуры моделей, отражающие возможные пути стока талой воды с ледника: линейная, параллельная и блоково-параллельная.

Летние снегопады повышают альбедо ледниковой поверхности, что приводит к снижению величины таяния по сравнению с расчётными значениями. Как неоднократно подчёркивал М.В. Тронов (1962) и подтверждали более поздние исследователи (Ледники Актуру, 1987), повторяемость летних снегопадов в условиях Алтая может быть решающим погодно-климатическим фактором, определяющим динамику ледников. Обычные снегопады на ледниках Актуру снижают границу снега на 400–500 м (Тронов, 1962). В работе (Нарожный, 2001) также отмечается, что с уменьшением температуры воздуха линейность связи между средневзвешенными по площади

величинами таяния и средними летними температурами воздуха (июнь–август) нарушается из-за увеличения повторяемости летних снегопадов.

Водный режим водотоков тесно зависит от погодных условий, но, как отмечала Л.Н. Шантыкова (1974), характер этой зависимости видоизменяется в сложном взаимодействии факторов, определяющих речной сток в горно-ледниковом бассейне. Именно поэтому в работах (Gabbi et al., 2014; Mackay et al., 2018) приходят к выводу, что применение сложных современных математических моделей (особенно при дефиците исходных пространственно-временных данных) не всегда приводит к улучшению результатов моделирования по сравнению с простыми зависимостями.

Учёт стока воды гидрометрическим методом – ряд недостатков, связанных с высокой погрешностью измерений расходов воды в турбулентном потоке с изменчивой геометрией руслового канала, а также отсутствием возможности измерения фильтрационной составляющей стока в русле и флювиогляциальных отложениях.

### *Объект исследования*

Ледники горного узла Биши-Иирду, центральную часть которого занимает горно-ледниковый бассейн Актуру, расположены практически в центре Евразии. Левый Актуру с площадью 5.11 км<sup>2</sup> – самый большой ледник бассейна Актуру. Его верхняя граница расположена на высоте 4044 м над ур. моря (вершина Актуру-Баш), а нижняя соответствует высоте 2615 м над ур. моря. Среднее значение высоты границы питания (ELA), определённой балансовым методом по аблационным рейкам за период с 2019 по 2024 г., составляет 3371 м над ур. моря. Отношение площади аккумуляции к площади аблации (AAR) за тот же период составляет в среднем 45 %. Для сравнения, за период 2000–2009 гг. показатели ELA и AAR составили 3230 м над ур. моря и 57.6 % соответственно (WGMS..., 2008; 2012), что указывает на усиление аблации ледника в последние годы.

Толщина снега на языке ледника изменяется в диапазоне от 50 до 120 см, а в центральной части ледника в высотном диапазоне 3000–3400 м над ур. моря – от 300 до 450 см, достигая в некоторые годы в отдельных участках 500 см. При этом на сильно выпуклых склонах снег может сдуваться, оставляя участки открытого льда.

На поверхности ледника, наряду с трещинами, развиты глубокие и узкие воронки, промытые

поверхностными потоками ледника, непосредственное измерение глубины которых стальным тросом указывает на их значительную глубину: до 150 м (Кравцов, 1962).

Достопримечательность долины Актру — Голубое озеро, расположенное за мощным левым моренным валом ледника Левый Актру и подпитываемое ручьём, стекающим с ледника Стажёр. Озеро имеет площадь 15 700 м<sup>2</sup> при длине до 220 м. В 1950—1960 гг. озеро имело глубину свыше 70 м (Кравцов, 1962). По данным батиметрической съёмки, проведённой в 2009 г. Д.А. Вершининым эхолотом с точностью 0,1 м, максимальная глубина озера достигала 21,5 м. Вероятно, глубину озера Г.С. Кравцов определял сейсмическим методом, и она оказалась завышена. Иначе трудно объяснить такую разницу в глубинах только снижением уровня воды и заполнением чаши приносным материалом.

До сих пор слабо изучен вопрос о происхождении льда внутри морены. Так, по результатам геофизических исследований Г.С. Кравцов (1962) сделал вывод том, что моренный вал, отделяющий озеро от ледника, следует рассматривать как часть ледника, погребённую мощными каменными осыпями. В последние годы поверхность ледника в месте контакта с моренным валом активно понижается со скоростью около 4 м в год.

В качестве источника водного стока с моренного вала следует отметить фильтрацию из Голубого озера, поверхностный сток в результате снеготаяния, а также таяние верхних слоёв льда в летний период. На склонах морены данный процесс возникает в результате обнажения поверхности при сходе оползней в случае сильного насыщения моренных и осыпных отложений влагой (Ерофеев и др., 2024).

В настоящее время высотная отметка уреза воды в озере 2823 м значительно выше поверхности льда на левом урезе ледника (2760—2800 м), примыкающем к озеру, а уровень воды на 5—7 м меняется в течение года. Максимальный уровень в озере достигается после весеннего снеготаяния и поддерживается таянием на небольшом плоскoverшинном леднике Стажер (3200—3500 м над ур. моря), с которого стекает единственный водоток, питающий озеро. Минимальный уровень воды в бессточном озере наблюдается перед началом периода абляции, что указывает на фильтрацию воды через толщу моренного вала, так как испарение с озера мало, а в зимний период и вовсе отсутствует.

Река Актру относится к рекам со снежно-ледниковым питанием. Сток воды формируется в основном в результате таяния снега и ледников и приходится на тёплый период (с мая по сентябрь). Река характеризуется значительными колебаниями стока по годам, в течение сезона и в течение суток, что связано с режимом температур, осадков и таяния ледников (Вершинин и др., 2014).

Общий ход стока р. Актру в значительной мере зарегулирован, в том числе из-за того, что ледники обладают значительной внутренней ёмкостью, в том числе большую влагоёмкость имеет фирновая область ледников (попеременное таяние и замерзания) (Васильев, 1974). Поэтому в начальный период таяния талые воды расходуются на заполнение пустот в теле ледника и в моренных отложениях (Колюшкина, 1964). Кроме того, летние снегопады приводят к значительному нарушению зависимостей, определяющих речной сток (Шантыкова, 1974), что проявляется в сильном сокращении наблюдавшегося стока воды. Что касается жидких осадков, то лишь обложные обильные дожди способствуют повышению стока (Колюшкина, 1964).

Общий ход стока р. Актру в значительной мере зарегулирован (Васильев, 1974), в том числе из-за того, что ледники обладают значительной внутренней ёмкостью; этому способствует и способность фирна к временному накоплению и замерзанию талой воды. Поэтому в начальный период таяния талые воды расходуются на заполнение пустот в теле ледника и в моренных отложениях (Колюшкина, 1964). Кроме того, летние снегопады приводят к значительному нарушению зависимостей (уменьшается абляция), определяющих речной сток (Шантыкова, 1974), что проявляется в значительном сокращении наблюдавшегося стока воды — сток в августе 1967 г., когда осадки в большей степени выпадали в твёрдом виде, оказался на 13 % ниже среднемноголетнего. Что касается жидких осадков, то лишь обложные обильные дожди способствуют повышению стока (Колюшкина, 1964).

Некоторую роль в формировании стока играют подледниковые талые воды, незначительные по объёму, но формирующиеся в течение всего года (Васильев, 1974). Возможность формирования подледниковых талых вод подтверждена изучением в 1980—1982 гг. термического режима ледника Малый Актру (Ледники Актру, 1987), в результате выявлено, что в области абляции слои льда, лежащие на глубинах, превышающих 30 м, имеют температуру, близкую к нулю.

Временный гидрологический пост для учёта стока с ледника Левый Актуру организован на абсолютной высоте 2465 м ( $500\ 693^{\circ}\text{с.ш.}$ ;  $877\ 393^{\circ}\text{в.д.}$ ) выше слияния с ручьём, идущим от ледника Правый Актуру (рис. 1). Площадь исследуемого водосбора составляет  $9.9\text{ км}^2$ , на которой ледник долинного типа Левый Актуру занимает  $5.11\text{ км}^2$ , а плосковершинный ледник Стажёр  $0.19\text{ км}^2$ . Доля оледенения бассейна ( $f_l$ ) составляет 0.535. С 2019 г. ледник Левый Актуру – основной гляциологический репер в бассейне Актуру и на Алтае в целом (Кутузов и др., 2019). Режимные гляциологические характеристики и результаты масс-балансовых работ по этому леднику с 1977 г. передаются во Всемирную службу мониторинга ледников (WGMS..., 2008; 2012).

## МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

В горно-ледниковом бассейне Актуру очень существенна роль микроклиматических условий,

проявляющихся в разнообразии теплоэнергетических ресурсов (Ерофеев и др., 2022, 2023), и условий увлажнения, определяющихся не только величиной выпавших осадков, но и условиями их накопления и переноса (лавины, наледи (Савчук и др., 2023), метелевый перенос).

В настоящее время в бассейне Актуру мониторинг основных метеорологических величин выполняется в различных высотно-морфологических и ландшафтных комплексах. Оборудование размещено с учётом опыта многолетних исследований, выполнявшихся ранее сотрудниками проблемной научно-исследовательской лаборатории гляциоклиматологии Томского государственного университета.

Мониторинг метеорологического режима ледника Левый Актуру ведётся на его береговой морене в 150 м на юго-восток от Голубого озера с помощью двух автоматических метеостанций. Первой в августе 2019 г. была установлена автоматическая метеостанция, разработанная в ИМКЭС

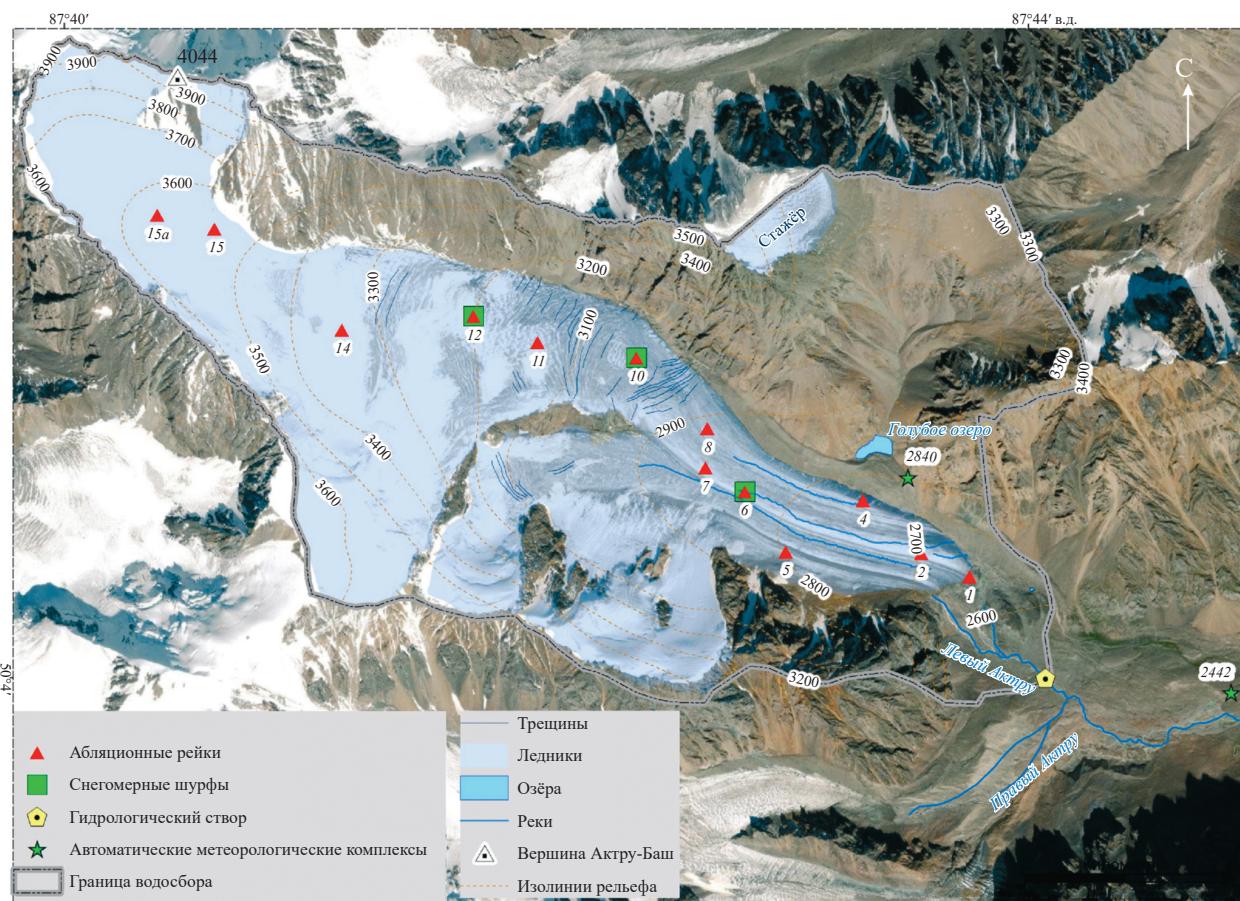


Рис. 1. Географическое положение и система гляциогидроклиматического мониторинга на водосборе Левый Актуру  
Fig. 1. Geographical location and system of glacio-hydroclimatic monitoring on the Leviy Aktru catchment area

СО РАН (Кураков, 2020). Метеостанция отличается малым весом и автономностью, установленный интервал измерений составляет 1 час. Полученные с сети метеорологического мониторинга данные регулярно заносятся в базу данных (Ерофеев и др., 2022), часть данных передаётся по каналам сотовой связи на удалённый сервер.

Зависимость для расчёта средней летней температуры в Актру-Альплагерь ( $T_{A-A}$ ) по соответствующей температуре на ГМС Кара-Тюрек ( $T_{K-T}$ ) (Нарожный, 2001) сохранила свою актуальность:

$$T_{A-A} = 0.67T_{K-T} + 4.74. \quad (1)$$

Однако коэффициент детерминации снизился с 0.83 (Нарожный, 2001) до 0.77 при использовании данных автоматических метеостанций, появившихся в долине Актру с 2015 г.

Для восстановления рядов температур в горах лучше использовать данные метеостанций, расположенных на аналогичной абсолютной высоте. Метеостанция Кара-Тюрек ( $K-T$ ) и автоматическая метеостанция Актру, расположенная на Голубом озере, находятся на расстоянии около 60 км, но на близких высотах, что проявляется в синхронности рядов (рис. 2), а также в высоких значениях детерминации. Для восстановления рядов средних летних температур (2) и суммы летних осадков (3) на метеостанции Актру—Голубое озеро нами получены следующие уравнения связи:

$$T_{A-GO} = 1.17T_{K-T} - 0.76 \text{ при } R^2 = 0.98, \quad (2)$$

$$X_{A-GO} = 0.78X_{K-T} + 150 \text{ при } R^2 = 0.81. \quad (3)$$

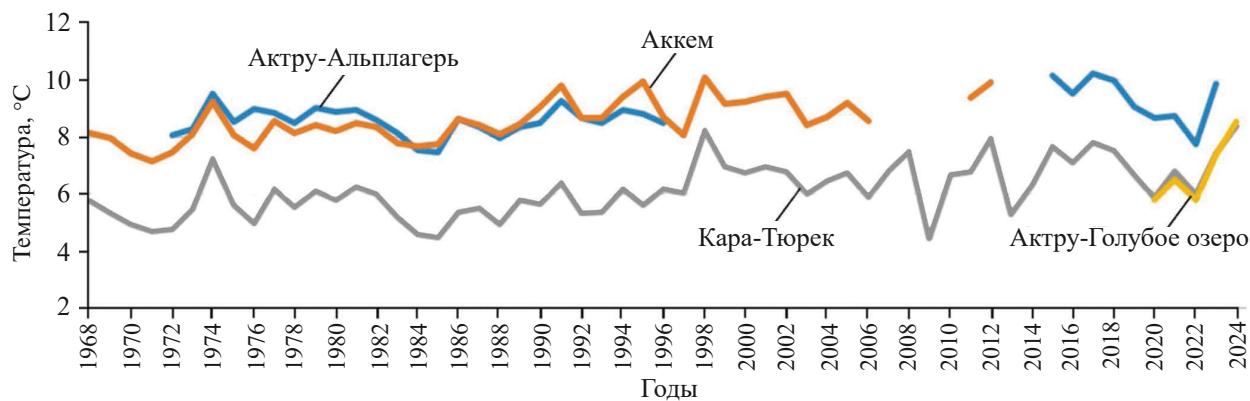
## ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Для организации гидрологического контроля за таянием ледника Левый Актру на ручье, стекающем с ледника, летом 2022–2024 гг. организован временный пост измерения уровня с помощью системы автоматического мониторинга уровня воды. По разнице времени прохождения характерных уровней воды (максимумы, точки перегиба хода уровней) на ледниковом ручье и на основном посту в течение суточного хода определено время добегания до основного гидрологического поста, расположенного вблизи географической станции “Актру”.

В створе поста на ручье “Левый Актру” периодически гидрометрическим способом измерялись расходы воды, что позволило получить кривые связи расходов воды на данном створе с расходами воды в основном гидрологическом створе, где расходы воды измерялись более подробно. По этой связи с учётом времени добегания рассчитаны ежечасные, а затем среднесуточные расходы воды (рис. 3).

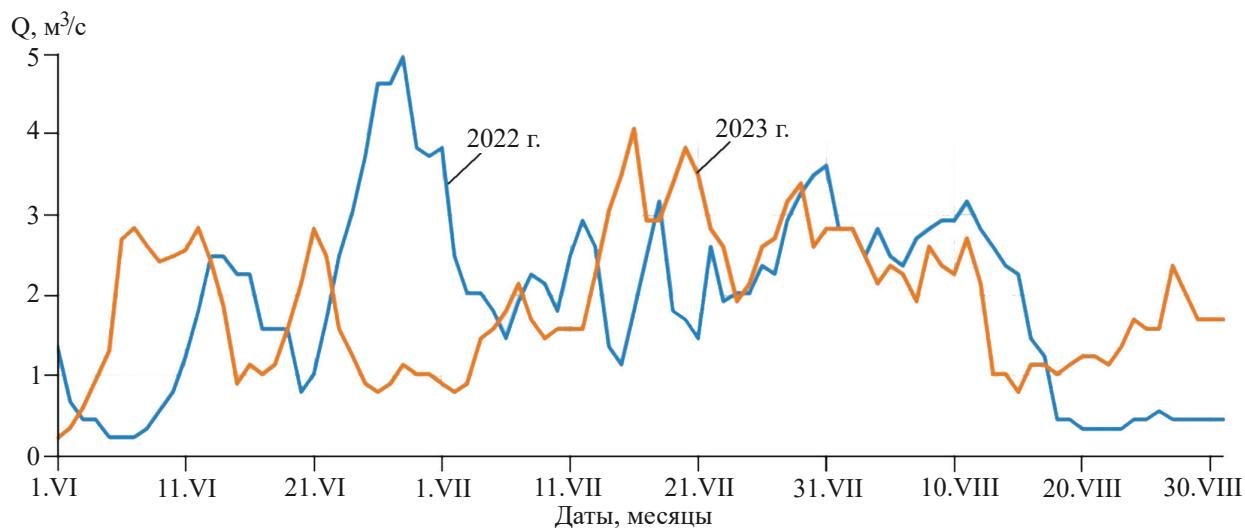
## МЕТОДИКА РАСЧЁТА СТОКА

При дефиците исходных пространственно-временных данных использование сложных



**Рис. 2.** Колебания средних летних температур (июнь–август) на высокогорных метеостанциях Алтая за период с 1968 по 2024 г.

**Fig. 2.** Fluctuation of average summer temperatures (June–August) at Altai high-mountain weather stations for the period from 1968 to 2024



**Рис. 3.** Расходы воды ( $Q$ ,  $\text{м}^3/\text{s}$ ), измеренные на гидрологическом створе р. Левый Актуру за июнь–август 2022 и 2023 гг.

Fig. 3. Runoff discharges ( $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ) measured at the Leviy Aktru river gauge station from June to August 2022 and 2023

моделей не имеет особых преимуществ по сравнению с использованием самых простых регрессионных зависимостей. В работе применена линейная структура модели – one linear reservoir cascade (Mackay et al., 2018), когда речной сток вычисляется как сумма стока с ледниковой и неледниковой поверхности. Так, по результатам наблюдений выяснилось, что гидрограф стока формирует жидкие осадки на всём водосборе и таяние на леднике с учётом относительной площади оледенения ( $f_l$ ) за расчётные и предыдущие сутки (таблица). Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) наблюдённого стока с суммой таяния и жидкими осадками для варианта 1 составил 0.56–0.62 за расчётный день, для варианта 2 за расчётные ( $i$ ) и предыдущие сутки ( $i-1$ ) – 0.67–0.77. Дополнительный учёт таяния и осадков в варианте 3 ещё за одни предыдущие сутки

( $i-2$ ) оказывает неоднозначное влияние. Учитывая погрешности измерения расходов воды, учёта стока, а также абляции, можно утверждать, что получены хорошие показатели соответствия.

Таяние льда и снега ( $A$ ) оценивалось по сети абляционных реек, установленных в различных высотно-морфологических зонах ледника. По данным в пункте наблюдений за абляцией, расположенном на абсолютной высоте 2840 м (абляционная рейка номер 6), средний многолетний коэффициент стаивания составляет 4.9 мм в.э. на градусо-день. Данный пункт мониторинга используется как аналог метеостанции, расположенной на Голубом озере на морене ледника Левый Актуру с абсолютной высотой 2840 м (Балтийская система высот).

**Таблица.** Коэффициенты детерминации между измеренным слоем стока в р. Левый Актуру и основными стокоформирующими факторами (осадки и абляция)

**Table.** Determination coefficients between the measured runoff layer in the Leviy Aktru river and the main runoff-forming factors (precipitation and glacier ablation)

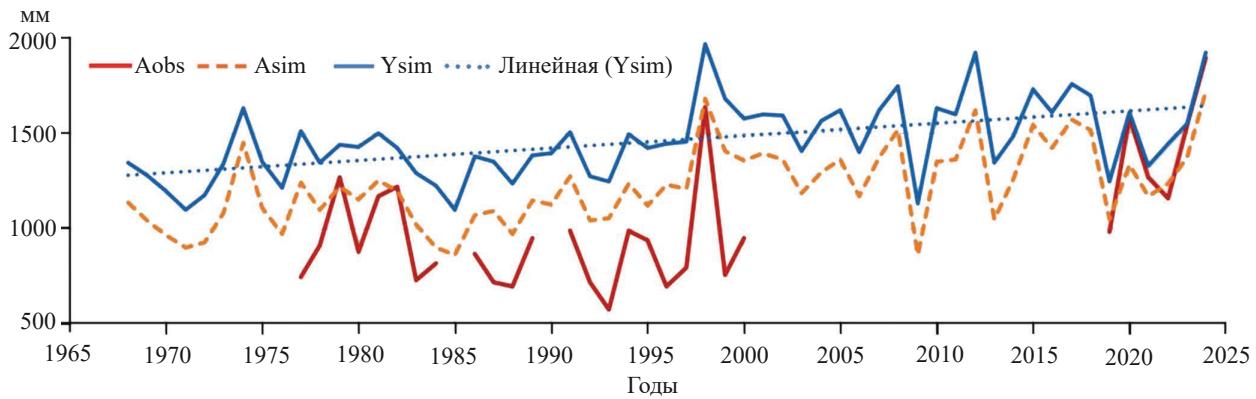
Период	Абляция, мм в.э. $A$	Осадки, мм $X$	Variант 1	Variант 2	Variант 3
			$(X + A f_l)$	$(0.5X_i + 0.5X_{i-1}) + (0.5A_i + 0.5AA_{i-1})f_l$	$(0.2X_i + 0.5X_{i-1} + 0.3X_{i-2}) + (0.2A_i + 0.5AA_{i-1} + 0.3A_{i-2})f_l$
Июнь–август 2022 г.	0.48	0.03	0.56	0.67	0.64
Июнь–август 2023 г.	0.56	0.02	0.62	0.74	0.76
Июнь–август 2023 г.	0.41	0.12	0.62	0.77	0.83

Не вся талая вода и летние осадки расходуются на формирование летнего стока: есть безвозвратные потери на испарение и межсезонное перераспределение стока за осенне-зимний период (сентябрь–май), а также несоответствие измеренных осадков и реально выпавших на водосборе. Все эти трудно учитываемые факторы принимаются во внимание поправочным коэффициентом 0.798 при достоверности аппроксимации суточных значений  $R^2 = 0.94$ . Для подбора данного коэффициента использовались суточные значения наблюдённого стока за 2022 и 2023 гг., а также расчётное значение абляции (по среднесуточной температуре) и осадки по АМС “Голубое озеро” за текущие и предшествующие сутки. Для перехода от данных по рейке номер 6 ( $A_{Л6}$ ) к данным по годовой абляции на всём леднике Левый Актру ( $A_{ЛА}$ ) используется коэффициент 0.685 при  $R^2 = 0.59$ . Данный коэффициент подобран по данным абляционных наблюдений за 2020–2024 гг. В результате, слой стока воды с ледника ( $Y_{ЛА}$ ) за лето (июнь–август) оценивается по следующей зависимости:

$$Y_{ЛА} = 0.798(f_{Л6}A_{Л6} + X_{A-го}). \quad (4)$$

Отсюда годовая абляция на леднике Левый Актру определяется как разница между слоем стока с ледника ( $Y_{ЛА}$ ) и произведением летних осадков ( $X_{A-го}$ ) на поправочный коэффициент:

$$A_{ЛА} = Y_{ЛА} - 0.685X_{A-го} \text{ при } R^2 = 0.60. \quad (5)$$



**Рис. 4.** Хронологический график смоделированного слоя стока воды ( $Y_{sim}$ ), измеренного ( $A_{obs}$ ) и смоделированного слоя таяния ( $A_{sim}$ ) на леднике Левый Актру за июнь–август

**Fig. 4.** Timeline of the simulated water runoff layer ( $Y_{simd}$ ), measured ( $A_{obs}$ ) and simulated melt layer ( $A_{sim}$ ) on the Levy Aktru Glacier from June to August

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлена реконструкция стока и абляции по формулам (4) и (5), которая показывает, что после 2019 г. данные по абляции (расчётные значения  $A$ ) близки к наблюдённым (относительная ошибка варьирует от  $-7$  до  $+16\%$ ). При этом за период 1977–2000 гг. по формуле (5) получаются завышенные значения (относительная ошибка от  $-85$  до  $+4\%$ , при среднем значении  $-35\%$ ), за исключением 1998 г.

Отчасти это можно объяснить неполным соответствием методических подходов к расчёту абляции с ледника, используемых в разные периоды программы масс-балансового мониторинга на леднике. Однако более вероятно существенное изменение условий таяния ледника в разные периоды наблюдений. На это же обстоятельство указывает тренд увеличения расчётного стока воды ( $Y_{sim}$ ) с ледника, подтверждающий наблюдаемые климатические изменения. Так, в период 1977–2000 гг. средняя летняя температура была  $+5.9$  °C, т.е. на  $1$  °C ниже, чем в период 2019–2024 гг. Причём в жаркое лето 1998 г. средняя летняя температура составляла  $+8.2$  °C, а ошибка расчёта  $-6\%$ , что косвенно подтверждает влияние летних снегопадов на таяние ледников. Критическая средняя летняя температура, выше которой снижается вероятность снегопадов и увеличивается интенсивность таяния ледника Левый Актру, по ГМС Кара-Тюрек составляет  $+5.8$  °C, по АМС Актру-Альплагерь  $+8.6$  °C, по АМС Голубое озеро  $+5.6$  °C.

Также выявлено, что если количество выпавших за летний период осадков выше среднего (1984 и 1986 гг.), то результаты расчётов по формуле (5) даже при низких температурах (+4.3 и +5.2 °C соответственно) ближе к наблюдённым данным. Возможно, это объясняется снижением вероятности ночных заморозков при высокой облачности, связанной с обильными осадками, что позволяет талой воде быстрее стекать с ледника. Это весомый аргумент с учётом того, что сток с ледника Левый Актуру формируют жидкие осадки и таяние на леднике за предыдущие двое суток.

В работе (Галахов и др., 2019) на основе материалов измеренного ледового баланса ледника ( $\text{г}/\text{см}^2$ ) Левый Актуру за 1977–1990 гг. сделана попытка увязать его со средней летней температурой на ГМС Кара-Тюрек (с учётом данных после 2019 г.  $R^2 = 0.57$ ). Примечательно, что существенное отклонение расчётных и наблюденных значений в 1977 г. в данной работе объясняется нарушением временных сроков снегосъёмки и установки аблационных реек.

Учёт влияния летних снегопадов на таяние ледников требует использования более сложных зависимостей, чем простые, и будет рассмотрен в отдельной работе с использованием расчётных методов таяния на основе уравнения теплового баланса и данных с автоматических метеостанций. Например, в работе (Зырянова и др., 2023) неплохие результаты получаются при использовании формулы П.П. Кузьмина для расчёта радиационного баланса.

Для расчётного створа на ручье Левый Актуру с учётом площади оледенения ( $f_l = 0.535$ ) доля таяния в слое стока за период 1968–2000 гг. составляла 39–47 %, в среднем 43.7 %. За период 2001–2024 гг. доля слоя таяния в слое стока составляла от 41 до 48 %, в среднем 45.5 %. Наблюдаемое увеличение доли таяния льда в слое стока на 2 % обусловлено увеличением таяния льда за счёт положительного тренда теплового баланса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование стока – многофакторный процесс, по-разному раскрывающийся под воздействием самоорганизации природно-климатических условий, что особенно ярко проявляется в условиях высокой неоднородности, характерной для горно-ледниковых бассейнов. Поэтому даже использование современных измерительных систем не позволяет говорить о полном гидрологическом контроле гляциологических наблюдений. Однако независимые

гидрометрические измерения ледникового стока крайне важны, так как позволяют раскрывать аспекты формирования стока, связанные не только с аблацией ледников. Поэтому мониторинг стока на р. Левый Актуру будет продолжен.

За период 2001–2024 гг. по сравнению с периодом 1968–2000 гг. наблюдается увеличение доли таяния льда в слое стока примерно на 2 %, что обусловлено увеличением таяния льда вследствие роста летних температур воздуха на 1.1 °C.

Благодаря полученным зависимостям удалось реконструировать сток р. Левый Актуру начиная с 1968 г., а также восстановить пропуски в значениях годовой аблации за 2001–2018 гг. Удалось выяснить, что предлагаемые расчётные зависимости завышают значения таяния ледников и стока воды в годы с пониженными летними температурами, для которых характерны летние снегопады.

По АМС Голубое озеро критическая средняя летняя температура, выше которой снижается вероятность снегопадов и увеличивается интенсивность таяния ледника Левый Актуру, составляет +5.6 °C. В исследуемом речном бассейне летние снегопады влияют на аблацию и сток воды, но учёт их влияния требует специального исследования. В дальнейшем также следует выполнить работы по оценке подледниковых талых вод, стоку воды с ледника Стажер и водному балансу Голубого озера.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 25-27-00409 “Современная динамика и реанализ баланса массы ледников горного узла Бишь-Иирду (Алтай)”.

**Acknowledgments.** The work was carried out as part of the Russian Science Foundation Grant No. 25-27-00409 “Modern Dynamics and Reanalysis of the Mass Balance of Glaciers in the Bish-Iirdu Mountain Range (Altai)”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев В.В. К вопросу о формировании стока р. Актуру / Материалы научной конференции “Проблемы гляциологии Алтая”, посвящённой 80-летию старейшего гляциолога М.В. Тронова. Томск: Томский госуд. ун-т, 1974. С. 236–244.
- Вершинин Д.А., Уйманова В.А., Овсянников С.А. Сток взвешенных наносов р. Актуру и особенности его режима за последние 50 лет // Вестник Томского гос. ун-та. 2014. № 381. С. 226–231.
- Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Коломейцев А.А., Мардасова Е.В., Шевченко А.А., Шереметов Р.Т. Влияние глобального потепления на ледниковый

- сток (по исследованиям в бассейне Актру: 1952–2012) // Известия Алтайского отдела РГО. 2019. Т. 52. № 1. С. 37–45.
- Дюргеров М.Б.* Гидрологический контроль ледниково-стока: развитие идей М.В. Тронова в гляциологии // Ледники и климат Сибири. Томск: Томский госуд. ун-т. 1987. С. 17–19.
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Вершинин Д.А.* Водно-ледниковые и климатические ресурсы бассейна Актру (Горный Алтай) / Свидетельство о регистрации базы данных № 2022623624 от 22.12.2022 г.
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Гармаева Т.Б.* Оценка испаряемости в горно-ледниковом бассейне Актру на основе фактических данных и геоинформационного моделирования // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 96–108.  
<https://doi.org/10.17223/25421379/25/>
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Рожин В.Е.* Термический режим поверхностных отложений морен ледников Актру в условиях потепления климата // Геосферные исследования. 2023. № 4. С. 115–131.  
<https://doi.org/10.17223/25421379/29/8>
- Зырянова Д.С., Пряхина Г.В., Распутина В.А., Кузнецова М.Р.* Расчёт таяния ледника в условиях недостатка данных // Успехи современного естествознания. 2023. № 12. С. 210–217.
- Колюшкина И.М.* Некоторые характерные черты гидрологического режима реки Актру // Гляциология Алтая. 1964. Т. III. С. 170–181.
- Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Мотовилов Ю.Г., Корнева И.А., Постникова Т.Н., Рыбак О.О.* Влияние изменений климата и деградации оледенения на водный режим в высокогорной части бассейна р. Тerek // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 2. С. 173–188.
- Кравцов Г.С.* Результаты сейсмических исследований на леднике “Большой Актру” // Вопросы географии Сибири Томск: Томский гос. ун-т. 1962. № 4. С. 71–75.
- Кутузов С.С., Ерофеев А.А., Лаврентьев И.И., Смирнов А.М., Копысов С.Г., Аббасов З.Р., Никитин К.А.* Восстановлены наблюдения на ледниках Актру на Алтае // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 306.
- Кураков С.А.* Автономные измерительные комплексы для контроля природной среды на труднодоступных территориях: дис. ... канд. техн. наук. Томск: Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН, 2020. 172 с.
- Ледники Актру (Алтай) / Под ред. Д.А. Буракова. Ледники Актру (Алтай). Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 118 с.
- Нарожный Ю.К.* Внешний массообмен ледников Актру: методика наблюдений, тенденции изменения и климатическая обусловленность // Вестник Томского гос. ун-та. 2001. № 274. С. 13–23.
- Нарожный Ю.К., Никитин С.А., Лукьянов А.А., Осинов А.В.* Горно-ледниковый бассейн Актру: новые морфометрические и ресурсные характеристики // Вопросы географии Сибири. 2006. № 26. С. 67–74.
- Савчук Д.А., Николаева С.А., Кузнецов А.С.* Дендроиндикация прошлых природных событий на флювиогляциальных отложениях долинного зандра Актру (Горный Алтай) // Геосферные исследования. 2023. № 2. С. 155–171.  
<https://doi.org/10.17223/25421379/27/11>
- Тронов М.В.* О влиянии летних снегопадов на режим ледников Алтая // Гляциология Алтая. 1962. Вып. I. С. 161–168.
- Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А., Хромова Т.Е., Никитин С.А.* Современная деградация горного оледенения Алтая, её последствия и возможные причины // Метеорология и гидрология. 2020. № 45 (5). С. 118–130.
- Шантыкова Л.Н.* Водный режим Актру в аномальный летний сезон 1967 г. // Гляциология Алтая. 1974. Вып. VIII. С. 112–123.
- Gabbi J., Carenzo M., Pellicciotti F., Bauder A., Funk M.* A comparison of empirical and physically based glacier surface melt models for long-term simulations of glacier response // Journ. of Glaciology. 2014. № 60. P. 1140–1154.  
<https://doi.org/10.3189/2014JoG14J011>
- Mackay J.D., Barrand N.E., Hannah D.M., Krause I.S., Jackson Ch.R., Everest J., Aðalgeirsdóttir G.* Glacio-hydrological melt and run-off modelling: Application of a limits of acceptability framework for model comparison and selection // The Cryosphere. 2018. № 12. P. 2175–2210.  
<https://doi.org/10.5194/tc-12-2175-2018>
- Pellicciotti F., Bauder A., Parola M.* Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps // Water Resources Research. 2010. V. 46. № 10. P. 1–16.  
<https://doi.org/10.1029/2009WR009039>
- WGMS. Fluctuations of Glaciers 2000–2005. Volume IX. Haeberli W., Zemp M., Kääb A., Paul F., Hoelzle, M. ICSU(FAGS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 2008. 266 p.
- WGMS. Fluctuations of Glaciers 2005–2010, Volume X. Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hoelzle M., Paul F., Haeberli W. (eds.), ICSU(WDS)/ IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 2012. 336 p.

**Citation:** Kopysov S.G., Vershinin D.A., Erofeev A.A. The monitoring of state of the Leviy Aktru Glacier by means of hydrometry. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2025, 65 (4): 573–583. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040041.

## The monitoring of state of the Leviy Aktru Glacier by means of hydrometry

© 2025 S. G. Kopysov<sup>a,b,‡</sup>, D. A. Vershinin<sup>a</sup>, A. A. Erofeev<sup>b</sup>

<sup>a</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>b</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>‡</sup>e-mail: wosypok@mail.ru

Received May 12, 2025; revised August 14, 2025; accepted September 25, 2025

The formation of runoff is a multifactorial process which is revealed in different ways under the influence of natural and climatic conditions. This is particularly evident in conditions of the high heterogeneity characteristic of mountain-glacial basins. Measurements of glacier runoff do not allow for full control of glaciological monitoring data, but they make it possible to understand better the physical processes that connect local meteorological conditions and ice melting. Hydrological observations during the summers of 2022 and 2023 demonstrated that the runoff hydrograph from the Leviy Aktru Glacier is primarily formed by liquid precipitation and glacier ablation over the previous 48 hours. To extend the series of mean summer temperatures and precipitation totals, constraint equations were applied using data from the Aktru—Goluboe Ozero weather station (operational since August 2019) and the Kara-Tigurek meteorological station. Based on the obtained dependencies, the series of water flow from the Leviy Aktru glacier in June–August was extended, and the gaps in the observations of ablation were restored. A comparative analysis of the restored and measured values revealed that the calculated dependencies overestimate the values of ablation in years with lower summer temperatures, which are characterized by summer snowfalls. According to the Kara-Tigurek weather station, the critical average summer temperature above which the probability of snowfall decreases and the intensity of melting of the Leviy Aktru glacier increases is +5.8 °C.

**Keywords:** glacier, mountain hydrology, glacial runoff, runoff formation, ablation, empirical-statistical calculations, Altai

## REFERENCES

- Vershinin D.A., Uimanova V.A., Ovsyannikov S.A. Suspended load in the Aktru river and peculiarities of its regime over the last 50 years. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta.* Tomsk State University Journal. 2014, 381: 226–231. [In Russian].
- Vasil'ev V.V. K voprosu o formirovaniyu stoka r. Aktru. Materialy nauchnoj konferencii Problemy gleyaciologii Altaya, posvyashchyonnoj 80-letiyu starejshego gleyaciologa M.V. Tronova. On the Formation of the Aktchu River Flow. Proceedings of the Scientific Conference on Glaciology of the Altai Mountains, dedicated to the 80th anniversary of the oldest glaciologist, M.V. Tronov. Tomsk: Tomsk State University. 1974: 236–244. [In Russian].
- Galakhov V.P., Samoilova I. S. Yu., Kolomeytsev A.A., Mardasova E.V., Shevchenko A.A., Sheremetov R.T. Global warming effect on glacier runoff based on the Aktru basin studies for 1952–2012. *Izvestiya AO RGO*.
- Bulletin of the Russian Geographical Society. 2019, 1 (52): 37–45.  
<https://doi.org/10.24411/2410-1192-2019-15204> [In Russian].
- Dyurgerov M.B. Hydrological Control of Glacial Runoff: Development of M.V. Tronov's Ideas in Glaciology. *Ledniki i klimat Sibiri. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet.* Glaciers and the Climate of Siberia. Tomsk: Tomsk State University. 1987: 17–19. [In Russian].
- Erofeev A.A., Kopysov S.G., Garmaeva T.B. Estimation of potential evaporation in the Aktru mountain-glacier basin based on actual data and GIS-based modeling. *Geosfernye issledovaniya. Geosphere Research.* 2022, 4: 96–108.  
<https://doi.org/10.17223/25421379/25/6> [In Russian].
- Erofeev A.A., Kopysov S.G., Rozhin V.E. Temperature regime of Aktru glaciers moraines surface deposits under climate warming conditions. *Geosfernye issledovaniya. Geosphere Research.* 2023, 4: 115–131.  
<https://doi.org/10.17223/25421379/29/8> [In Russian].

- Erofeev A.A., Kopysov S.G., Vershinin D.A. Vodno-lednikovye i klimaticeskie resursy bassejna Aktru (Gornyj Altaj). Water-glacial and climatic resources of the Aktru basin (Gorny Altai). Certificate of registration of the database № 2022623624 от 22.12.2022. [In Russian].*
- Zyryanova D.S., Pryakhina G.V., Rasputina V.A., Kuznetsova M.R. Calculation of glacier melting in conditions of lack of data. Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya. The successes of modern natural science. 2023, 12: 210–217. [In Russian].*  
<https://doi.org/10.17513/use.38194>
- Kutuzov S.S., Erofeev A.A., Lavrentiev I.I., Smirnov A.M., Kopysov S.G., Abbasov Z.R., Nikitin K.A. Observations on the Aktru glaciers in Altai have been restored. Led i Sneg. Ice and Snow. 2019, 59 (3): 306.*  
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-469> [In Russian].
- Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Yu.G., Korneva I.A., Postnikova T.N., Rybak O.O. Changes in water regime in the high-mountain region of the Terek River (North Caucasus) in connection with climate change and degradation of glaciation. Led i Sneg. Ice and Snow. 2024, 64 (2): 173–188.*  
<https://doi.org/10.31857/S2076673424020014> [In Russian].
- Kravtsov G.S. Results of seismic research on the Bolshoy Akhtru glacier. Voprosy geografii Sibiri Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet. Geography of Siberia. Tomsk: Tomsk State University. 1962, 4: 71–75. [In Russian].*
- Kolyushkina I.M. Some characteristics of the hydrological regime of the Aktrusa River. Glyaciologiya Altaya. Glaciology of Altai. 1964, 3: 170–181. [In Russian].*
- Kurakov S.A. Avtonomnye izmeritelnye kompleksy dlja kontrolija prirodnoi sredy na trudnodostupnykh territoriakh. Autonomous measuring systems for monitoring the natural environment in hard-to-reach areas. Ph.D. Tomsk: Federal State Budgetary Institution of Science Institute for Monitoring of Climate and Environmental Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMKES SB RAS). 2020: 172 p. [In Russian].*
- Ledniki Aktru (Altay).Glaciers Aktru (Altai). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 119 p. [In Russian].*
- Narozhnyj Yu.K., Nikitin S.A., Luk'yanov A.A., Osipov A.V. The Aktru Glacier Basin: New Morphometric and Resource Characteristics. Voprosy geografii Sibiri. Questions of the geography of Siberia. 2006, 26: 67–74. [In Russian].*
- Narozhnyj Yu.K. External mass transfer of the Akhtru glaciers: observation methods, trends, and climatic dependence. Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Bulletin of Tomsk State University. 2001, 274: 13–23. [In Russian].*
- Savchuk D.A., Nikolaeva S.A., Kuznetsov A.S. Dendroindication of past events on fluvioglacial deposits of the Aktru outwash plain (the Altai Mountains). Geofernye issledovaniya. Geosphere Research. 2023, 2: 155–171.*  
<https://doi.org/10.17223/25421379/27/11> [In Russian].
- Tronov M.V. On the influence of summer snowfalls on the regime of the Altai glaciers. Glyaciologiya Altaya. Glaciology of the Altai. 1962, 1: 161–168. [In Russian].*
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., Khromova T.E., Nikitin S.A. Modern degradation of the Altai mountain glaciation, its consequences, and possible causes. Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and Hydrology. 2020, 45 (5): 118–130.*
- Shantykova L.N. The water regime of Aktru during the abnormal summer season of 1967. Glyaciologiya Altaya. Glaciology of Altai. 1974, 8: 112–123. [In Russian].*
- Gabbi J., Carenzo M., Pellicciotti F., Bauder A., Funk M. A comparison of empirical and physically based glacier surface melt models for long-term simulations of glacier response. Journal of Glaciology. 2014, 60: 1140–1154.*  
<https://doi.org/10.3189/2014JoG14J011>
- Mackay J.D., Barrand N.E., Hannah D.M., Krause S., Jackson Ch.R., Everest J., Aðalgeirs ðóttir G. Glacio-hydrological melt and run-off modelling: application of a limits of acceptability framework for model comparison and selection. The Cryosphere. 2018, 12: 2175–2210.*  
<https://doi.org/10.5194/tc-12-2175-2018>
- Pellicciotti F., Bauder A., Parola M. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps. Water Resources Research. 2010, 46 (10): 1–16.*  
<https://doi.org/10.1029/2009WR00903>
- WGMS. Fluctuations of Glaciers 2000–2005. Vol. IX. Haeberli W., Zemp M., Kääb A., Paul F., Hoelzle, M. ICSU(FAGS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO. WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 2008: 266 p.*
- WGMS. Fluctuations of Glaciers 2005–2010, Volume X. Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S.U., Hoelzle, M., Paul, F., and Haeberli, W. (eds.), ICSU(WDS)/ IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland. 2012: 336 p.*