

ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЛЕДНИКАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО АЛТАЯ В 2025 ГОДУ

© 2025 г. А. А. Ерофеев¹, П. А. Торопов^{2,*}, А. М. Смирнов², Е. Д. Дроздов², С. Г. Копысов¹

¹Томский государственный университет, лаборатория гляциоклиматологии, Томск, Россия

²Институт географии РАН, отдел гляциологии, Москва, Россия

*e-mail: tormet@inbox.ru

Поступила в редакцию 19.08.2025 г.

После доработки 09.09.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

Во время полевого сезона 2025 г. проведены гляциоклиматические наблюдения на леднике Левый Актуру, положившие начало постоянному мониторингу. С помощью геодезических методов даны оценки гляциологических параметров ледников Левый Актуру и Водопадный. Выявлены интересные особенности высотного распределения снегонакопления и отмечен вклад летних снегопадов в изменение радиационного режима ледника в период аблации. Спектральный анализ рядов данных выявил значительную роль горно-долинной циркуляции в формировании термического режима над поверхностью ледника, а также влияние синоптической изменчивости на режим облачности и ход относительной влажности над ледником. Полученные данные необходимы для выявления механизмов деградации оледенения Алтая, оценки ледниковой составляющей стока и верификации моделей ледниковых систем. В частности, расчёты изменчивости основных гляциологических параметров с использованием минимальной модели Эрлеманса с использованием измеренных характеристик баланса массы (1977–2012 гг.) показали, что ледник Левый Актуру может быть использован в качестве модельного объекта.

Ключевые слова: Алтай, баланс массы ледника, горная метеорология, гляциоклиматология

DOI: 10.7868/S2412376525040142

ВВЕДЕНИЕ

Ледниковые системы – один из ключевых индикаторов региональных и глобальных изменений климата, а сами ледники – важный источник пресной воды, провоцирующий целый спектр опасных природных явлений. Поэтому мониторинг ледников уже давно стал неотъемлемой частью гляциологии. Кроме того, эта информация необходима для настройки и верификации моделей ледниковых систем. Большую часть ключевых характеристик ледников (за исключением толщины льда) можно достаточно успешно восстановить на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Однако точность прямых гляциологических наблюдений до сих пор существенно выше дистанционных. Поэтому измерения компонент баланса массы ледников, репрезентативных для той или иной горной системы, по-прежнему актуальны.

В России до недавнего времени наиболее полные систематические измерения гляциологических и метеорологических параметров в высокогорных районах проводили только на Кавказе (Ледники и климат Эльбруса, 2022).

На территории горного Алтая репрезентативный объект – ледник Левый Актуру. Гляциологический мониторинг здесь, как и на большинстве ледников постсоветского пространства, начался в конце 50-х годов прошлого века (Ледники Актуру, 1987). В период работ экспедиции Томского государственного университета в 1957–1962 гг. на ледниках Алтая наряду с гляциологическими работами проводились также актинометрические наблюдения (Белова, 1972). Однако после распада СССР такие работы стали проводиться нерегулярно и неполно. Первая попытка возобновить систематические гляциологические наблюдения на Алтае была предпринята

сотрудниками Томского государственного университета и Института географии РАН в 2019 г., когда, помимо традиционных масс-балансовых работ, по обновлённой методике была выполнена радиолокационная съёмка (Кутузов и др., 2019). До настоящего момента основным источником информации о динамике оледенения на Алтае и причинах аномального таяния была спутниковая информация и данные атмосферных реанализов. Для более полного и глубокого понимания гляциоклиматических процессов на Алтае необходимо возобновление натурных измерений на здешних ледниках.

ОПИСАНИЕ ПОЛЕВЫХ РАБОТ

В течение полевого сезона 2025 г. выполнена снегомерная съёмка по 250 точкам (14–16 мая, в дни максимального снегонакопления) (рис. 1, *a*), измерена плотность снега в опорных шурфах и установлена речная сеть для измерения аблации. Важным результатом стал постоянный теплобалансовый мониторинг вблизи границы питания ледника Левый Актуру. До этого момента постоянные измерения метеорологических величин в высокогорной зоне для задач гляциологии и гляциоклиматологии проводились только на Эльбрусе (Торопов и др., 2024). Автоматическая метеостанция (далее – АМС) установлена на моренном блоке, лежащем на поверхности ледника, на высоте 3600 м над ур. моря вблизи вершины Актуру-Баш таким образом, что все измерения проводятся над ледовой поверхностью (см. рис. 1, *b*). АМС включает актинометрический комплекс Hukseflux NR01, состоящий из двух пиранометров, измеряющих приходящую и отражённую солнечную радиацию, и пиргеометров, регистрирующих тепловое излучение атмосферы и ледяной поверхности (см. рис. 1, *a*). Также в автоматизированном режиме фиксируется температура и влажность воздуха на уровне 2 м над поверхностью льда. Полученные данные систематизируются и загружаются в базу данных (Ерофеев и др., 2022). Выполнены также оценки гляциологических параметров ледников Левый Актуру и Водопадный геодезическими методами. С помощью геодезической системы Pentax G6 и на основе метода Precise Point Position определены точные координаты реперных пунктов, заложенных на скальных блоках вблизи фронтов ледников. Положение поверхности ледников определяли с помощью съёмки в режиме “кинематики реального времени”. Эта информация будет использована

для аэрофотосъёмки и лазерного сканирования поверхности ледников в целях оценки межгодовой изменчивости их баланса массы. Кроме того, проводились гидрологические измерения на двух створах: р. Актуру, вблизи одноимённого альплагеря (2150 м над ур. моря), и на руч. Левый Актуру (2465 м над ур. моря).

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Минимальная высота снежного покрова на леднике Актуру составляет 0.2 м (преимущественно в верхних зонах), а максимальная близка к 5 м (в центральной части ледника) при среднем значении около 1.5 м (см. рис. 1, *b*). Интересной особенностью сезона аккумуляции 2024–2025 гг. и, по всей видимости, ледника Актуру в целом является отсутствие выраженного высотного градиента снегозапасов при перепаде высот между крайней нижней и крайней верхней точками ледника более 1000 м. На таких масштабах в большинстве случаев проявляется плювиометрический градиент (Вагу, 2010), который должен отразиться на высоте снежного покрова в разных высотноморфологических зонах. По всей видимости, специфическая особенность ледника Актуру – это высокие значения коэффициента концентрации снежного покрова (Ходаков, 1964), величина которого определяется интенсивностью перераспределения снега по поверхности ледника прежде всего за счёт метелевого переноса и лавинного питания.

Радиационный режим ледника характеризуется прежде всего очень высокими значениями приходящей коротковолновой радиации; максимальные значения достигают 1400 Вт/м², что больше величины солнечной постоянной (рис. 2). Это связано с дополнительным вкладом радиации, отражённой от облаков и окрестных заснеженных склонов. Ярко проявилось влияние летних снегопадов на радиационный режим ледниковой поверхности (Волошина, 2001). Отмечено несколько снегопадов, вызывавших рост среднесуточных значений альбедо поверхности от 0.35–0.4 до 0.6–0.65. Полученный временной ход отражённой радиации поможет верифицировать параметризации альбедо снежного покрова, которое критически зависит от возраста и влаго содержания снега.

Выполнен спектральный анализ рядов температуры и относительной влажности воздуха (рис. 3). Показано, что основной вклад в изменчивость температуры вносит, естественно,

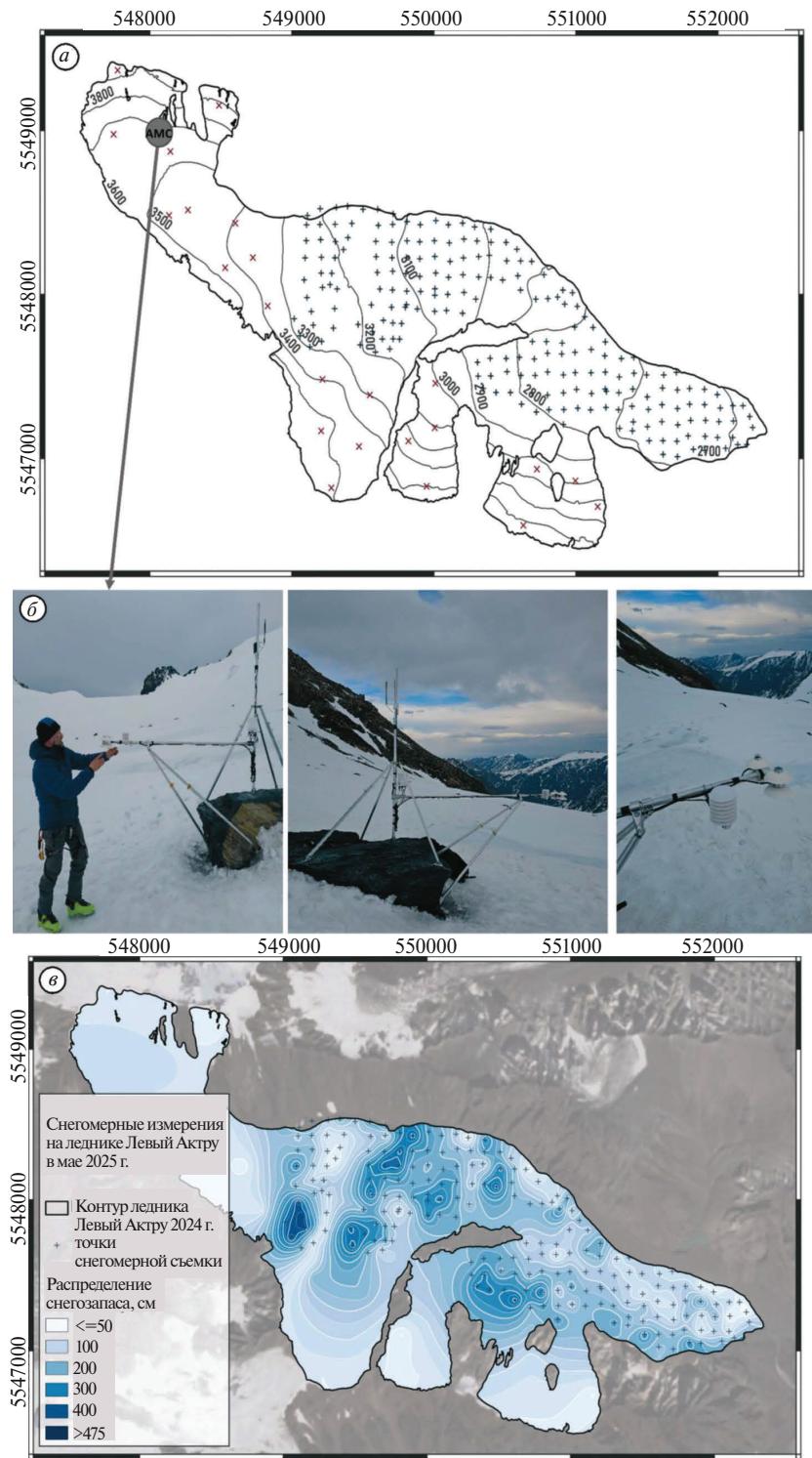


Рис. 1. Полевые работы на леднике Левый Акту в 2025 г. Схема снегомерной сети (красным отмечены точки 2024 г.) (а); AMC в области аккумуляции (на 3600 м над ур. моря) вблизи вершины Акту-Баш с радиометрами Hukseflufs NR01 (б); результаты измерения высоты снежного покрова (см) в период максимального снегонакопления (14–16 мая) (в)

Fig. 1. Expeditionary work on the Levyi Aktru Glacier in 2025: snow measurement network (the points 2024 are marked by red (a); AWS in the accumulation zone (at 3600 m.a.s.l.) near the Aktru-Bash peak with Hukseflufs NR01 radiometers (б); results of measuring the snow cover depth (cm) during the period of maximum snow accumulation (14–16 May) (в)

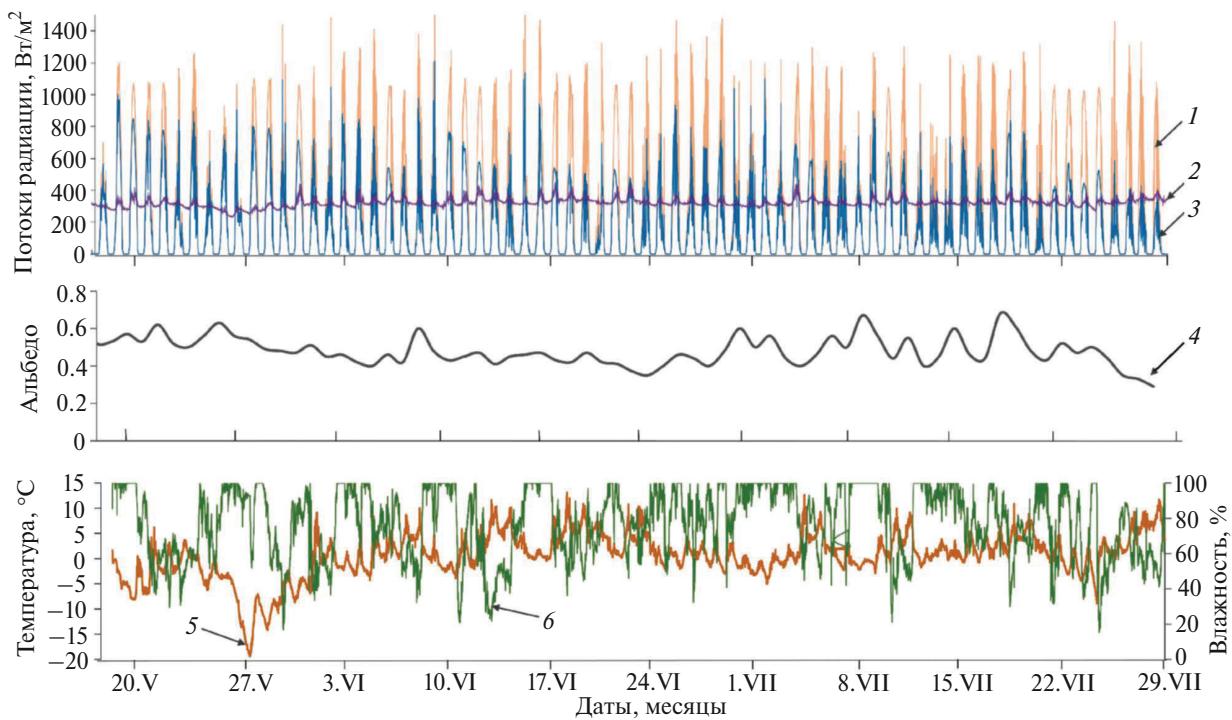


Рис. 2. Ход основных метеорологических величин, измеренных АМС, и определяющих летний баланс массы ледника: 1 – приходящая коротковолновая радиация; 2 – отражённая коротковолновая радиация; 3 – нисходящая длинноволновая радиация; 4 – альбено поверхности; 5 – температура воздуха; 6 – относительная влажность

Fig. 2. Meteorological values measured by the AWS and determining the summer mass balance of the glacier: 1 – downward shortwave radiation; 2 – upward shortwave radiation; 3 – downward longwave radiation; 4 – surface albedo; 5 – air temperature; 6 – relative humidity

суточный ход. Колебания синоптического масштаба (5–7 суток) не выявлены, в то время как на масштабах внутрисуточной изменчивости достаточно ярко проявляются колебания периодом 12 часов, что свидетельствует о заметном вкладе горно-долинной циркуляции в изменения температуры и, следовательно, режима таяния. В спектре относительной влажности как раз проявляются колебания периодом около 7 суток. По всей видимости, синоптическая изменчивость в период аблации проявляется прежде всего в изменениях режима облачности, а не температуры. Во времена облачных периодов относительная влажность в высокогорных районах, как правило, больше 90 %, в то время как в малооблачных условиях её значения существенно ниже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные необходимы для оценок компонент теплового баланса ледниковой поверхности, которые позволят выявить механизмы экстремального таяния ледников Алтая,

а также обосновать или опровергнуть предположение о том, что основным механизмом аномального таяния здешних ледников в последние десятилетия является положительный тренд приходящей коротковолновой радиации в совокупности с ростом теплового излучения атмосферы (Торопов и др., 2020). Эта информация нужна также для оценки ледниковой составляющей стока и её аномалий, а также для калибровки и верификации гляциологических моделей, в том числе параметризации горного оледенения IGRICE, которая развивается в отделе гляциологии Института географии РАН (Торопов и др., 2022). Расчёты изменчивости основных гляциологических параметров с использованием минимальной модели Урлеманса (Oerlemans, 2011) с использованием измеренных характеристик баланса массы (1977–2012 гг.) показали, что ледник Левый Актру может быть использован в качестве модельного объекта в рамках параметризации в глобальных климатических моделях и для других исследовательских задач.

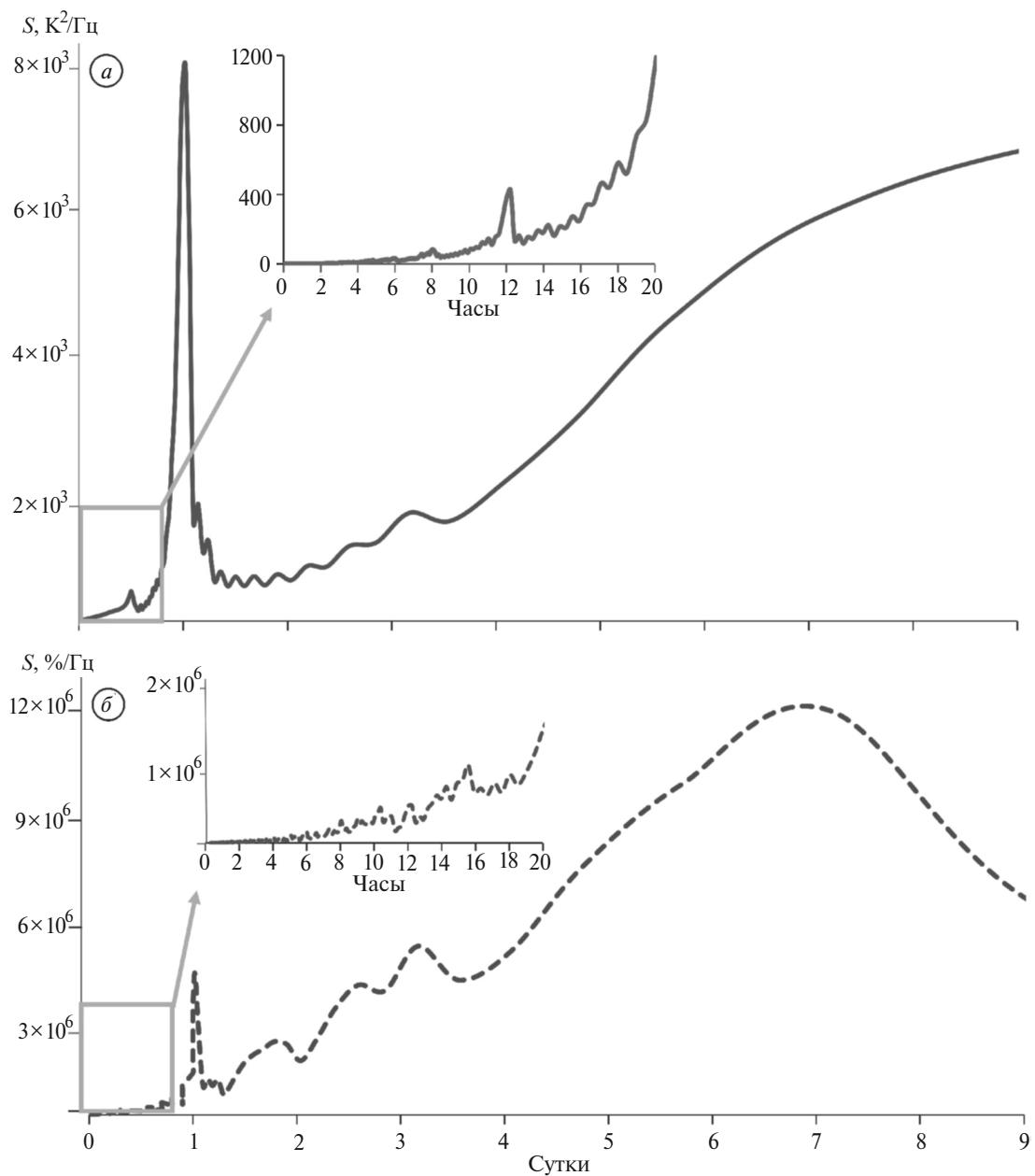


Рис. 3. Функции спектральной плотности (дисперсия, делённая на частоту колебаний) для температуры воздуха (а) и относительной влажности (б); на врезках показаны изменения на суточном временном масштабе

Fig. 3. Spectral density functions (variance divided by the frequency of oscillation) for: Air temperature (a) and relative humidity (b), with insets showing changes on a daily time scale

Благодарности. Авторы благодарят коллектив ИП С.А. Куракова и коллектив ИМКЭС СО РАН за изготовление АМС, студентов геологогеографического факультета ТГУ и кафедры гляциологии географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова за участие в полевых работах. Установка АМС и аблационных реек, а также первичный анализ метеорологических данных

выполнен при поддержке проекта РНФ (№ 25-27-00409); анализ результатов снегомерной съёмки, спектральный анализ метеорологических данных, а также настройка модели IGRICE на моделирование ледника Левый Актру выполнены при поддержке проекта РНФ (№ 23-17-00247).

Acknowledgments. The authors are grateful to S.A. Kurakov and the team of IMCES SB RAS for

producing the AWS, students of the Geological and Geographical Faculty of the Tomsk University, as well as students of the Glaciology Department of the Geographic Faculty of Lomonosov Moscow State University for the help in expeditionary work. The installation of the AMS and ablation rods, as well as the primary analysis of meteorological data, was carried out with the support of the Russian Science Foundation project (No. 25-27-00409); the analysis of the results of snow surveys, spectral analysis of meteorological data, and the adjustment of the IGRICE model to model the Left Aktru Glacier were carried out with the support of the Russian Science Foundation project (No. 23-17-00247).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белова Н.И. Расчёт потоков солнечной радиации по метеорологическим характеристикам. // Гляциология Алтая. 1972. Вып. 7. С. 175–183.
- Волошина А.П. Метеорология горных ледников // Материалы гляциол. исследований. 2001. Вып. 92. С. 3–138.
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Вершинин Д.А. Водно-ледниковые и климатические ресурсы бассейна Акту (Горный Алтай) / Свидетельство о регистрации базы данных № 2022623624 от 22.12.2022.
- 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 Акту на Алтае // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 306–318.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-469>
- Ледники и климат Эльбруса / Под ред. В.Н. Михаленко. Санкт-Петербург: Нестор-История. 2020. 372 с.
- Ледники Акту (Алтай) / Под ред. Д.А. Буракова. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 118 с.
- Торопов П.А., Алешина М.А., Носенко Г.А. Современная деградация горного оледенения Алтая, её последствия и возможные причины // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 118–130.
- Торопов П.А., Дроздов Е.Д., Авилов В.К. Метеорологический режим высокогорной зоны Эльбруса в период аккумуляции // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 1. С. 25–40.
- Торопов П.А., Дебольский А.В., Поляхов А.А., Шестакова А.А., Поповин В.В., Дроздов Е.Д. Минимальная модель Урлеманса как возможный инструмент описания горного оледенения в Моделях Земной Системы // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 5. С. 3.
- Ходаков В.Г. Процессы перераспределения снега и снежного покрова в горах. // Материалы гляциол. исследований. Вып. 9. М., 1964. С. 216–218.
- Barry R.G. Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press, 2008. 505 p.
- Oerlemans J. Minimal Glacier Models. Utrecht: Igitur, 2008. 91 p.

Citation: Erofeev A.A., Toropov P.A., Smirnov A.M., Drozdov E.D., Kopysov S.G. Glaciological research on the Central Altai glaciers in 2025. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2025, 65 (4): 718–724. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040142.

Glaciological research on the Central Altai glaciers in 2025

© 2025 A. A. Erofeev^a, P. A. Toropov^{b, #}, A. M. Smirnov^b, E. D. Drozdov^b, S. G. Kopysov^a

^aLaboratory of Glacioclimatology, Tomsk State University, Tomsk, Russia

^bDepartment of Glaciology, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]e-mail: tormet@inbox.ru

Received August 19, 2025; revised September 9, 2025; accepted September 25, 2025

During the summer expedition 2025, glacio-climatic observations were carried out on the Levyi Aktru glacier, which marked the beginning of permanent monitoring. Assessments of the glaciological parameters of the Levyi Aktru and Vodopadny glaciers were also carried out using geodetic methods. Interesting features of the altitude distribution of snow accumulation were revealed, and the contribution of summer snowfalls to the variation of the glacier radiation regime during ablation period was noted. Spectral analysis of data series revealed a significant role of mountain-valley circulation in the formation of the thermal regime over the glacier surface, as well as the influence of synoptic variability on the cloudiness regime and the course of relative humidity over the glacier. The obtained data are necessary to identify the mechanisms of Altai deglaciation, assess the glacial component of runoff, and verify models

of glacial systems. In particular, calculations of the variability of the main glaciological parameters using the Oerlemans minimal model using measured mass balance characteristics (1977–2012) showed that the Levyi Aktru glacier can be used as a model object.

Keywords: Altai, glacier mass balance, mountain meteorology, glacioclimatology

REFERENCES

- Belova N.I.* Calculation of solar radiation flows based on meteorological characteristics. *Glyaciologiya Altaya. Glaciology of Altai.* 1972, 7: 175–183. [In Russian].
- Voloshina A.P.* Meteorology of mountain glaciers. Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies. 2001, 92: 3–138. [In Russian].
- Erofeev A.A., Kopysov S.G., Vershinin D.A.* Vodno-lednikovye i klimaticheskie resursy bassejna Aktru (Gornyj Altaj). Water-glacial and climatic resources of the Akhtru basin (Gorny Altai). Database registration certificate No. 2022623624 dated 22.12.2022. [In Russian].
- Kutuzov S.S., Erofeev A.A., Lavrentiev I.I., Smirnov A.M., Kopysov S.G., Abbasov Z.R., Nikitin K.A.* Observations were re-established on Aktru glaciers in Altai. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2019, 59 (3): 306. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-469> [In Russian].
- Ledniki i klimat El'brusa. Glaciers and climate of Elbrus.* Saint Petersburg: OOO Nestor-History. 2020: 372 p. [In Russian].
- Ledniki Aktru (Altaj).* Aktru Glaciers (Altai). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 118 p. [In Russian].
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A.* Modern degradation of Altai Mountain glaciation, its consequences and possible causes. *Meteorologiya i gidrologiya. Meteorology and Hydrology.* 2020, 5: 118–130. [In Russian].
- Toropov P.A., Drozdov E.D., Avilov V.K.* Meteorological regime of the high-mountain zone of Elbrus during the accumulation period. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2024, 64 (1): 25–40. [In Russian].
- Toropov P.A., Debolsky A.V., Polyukhov A.A., Shestakova A.A., Popovnin V.V., Drozdov E.D.* The Minimum Urelmans Model as a Possible Tool for Describing Mountain Glaciation in Earth System Models. *Vodnye resursy. Water Resources.* 2023, 50 (5): 3. [In Russian].
- Khodakov V.G.* Processes of redistribution of snow and snow cover in the mountains. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies.* Moscow, 1964, 9: 216–218. [In Russian].
- Barry R.G.* Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press. 2008: 505 p.
- Oerlemans J.* Minimal Glacier Models. Utrecht: Igitur, 2008: 91 p.