

ГИДРОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556.1

doi: 10.17223/25421379/25/6

ОЦЕНКА ИСПАРЯЕМОСТИ В ГОРНО-ЛЕДНИКОВОМ БАССЕЙНЕ АКТРУ НА ОСНОВЕ ФАКТИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



Александр Анатольевич Ерофеев¹, Сергей Геннадьевич Копысов²,
Туяна Буянтуевна Гармаева³

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

¹ erofeev@yandex.ru

² wosypok@mail.ru

³ tuyana2000garmaeva@yandex.ru

Аннотация. Организованы наблюдения за испарением с водной поверхности в горно-ледниковом бассейне Актру. С использованием прямых измерений, метеоинформации и геоинформационного моделирования рассчитана испаряемость и построены карты ее распределения за лето 2022 г. Установлена связь испарения из стандартных испаромеров ГГИ-3000 и климатическими факторами в высокогорье Алтая.

Ключевые слова: испаряемость, горно-ледниковый бассейн, испаромер, солнечная радиация, цифровая модель рельефа, изменение климата

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке государственного задания Минобрнауки (проект № 0721-2020-0041).

Для цитирования: 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. doi: 10.17223/25421379/25/6

Original article

doi: 10.17223/25421379/25/6

ESTIMATION OF POTENTIAL EVAPORATION IN THE AKTRU MOUNTAIN-GLACIER BASIN BASED ON ACTUAL DATA AND GIS-BASED MODELING

Alexander A. Erofeev¹, Sergei G. Kopysov², Tuyana B. Garmaeva³

^{1, 2, 3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia,

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems (IMCES) SB RAS, Tomsk, Russia

¹ erofeev@yandex.ru

² wosypok@mail.ru

³ tuyana2000garmaeva@yandex.ru

Abstract. Monitoring and modeling of potential evaporation are necessary to understand completely the factors which influence hydrological regime of the high-mountain basin. Under conditions of the extremely poorly hydrometeorological information to calculate evaporation at the mountain territory, it is advisable to apply the combined method using direct network measurement of standard pan-evaporators, meteorological monitoring, as well as modern software tools of the modeling environment conditions and factors controlling the process.

Aktru mountain-glacier basin was chosen as the territory of the study because it is typical for the Central Altai. The calculation of the actual evaporation from the water surface was carried out on two water-evaporation sites located in different landscape-altitude zones and equipped with standard GGI-3000 pan-evaporators.

Based on the measured temperature gradients and the coefficient of daily anisotropic heating, the spatial distribution of temperatures of the surface air layer was calculated in the form of GRID matrices. Based on the digital elevation model in the SAGA GIS package, the indicators of sunshine time and the coefficients of the spatial distribution of potential incoming solar radiation over the studied basin were calculated. The calculation of evaporation from the water surface was carried out using L. Turk's and N.N.

Ivanov's empirical formulas. Verification of GIS-based modeling was carried out under direct observations in the summer of 2022 in the Aktru mountain-glacial basin. It is important to note that in Aktru, June turned out to be the warmest month of 2022.

A relationship has been established between evaporation from standard evaporators and climatic factors. It has been revealed that evaporation may increase with elevation. Partly, this fact can be explained by the local conditions of the location of the equipment. Thus, on the Goluboye Lake, there is a high wind speed and an increased incoming total solar radiation compared to the Aktru hydrometeorological station, which located in a valley depression.

The results of the study are important for building a regional model of the hydrological cycle of the Altai mountain-glacial basins.

Keywords: potential evaporation, mountain glacial basin, pan evaporation, solar irradiance, digital elevation model, climate change

Source of financing: Ministry of Education and Science (project № 0721- 2020-0041).

For citation: Erofeev A.A., Kopysov S.G., Garmaeva T.B. (2022). Estimation of potential evaporation in the Aktru mountain-glacier basin based on actual data and GIS-based modeling. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. 96–108. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/6

Введение

Испарение является связующим звеном между гидрологическим циклом и энергетическим балансом поверхности Земли [Liu et al., 2022], а также обеспечивает устойчивость природно-климатических условий. В уравнении водного баланса испарение такой же важный элемент, как атмосферные осадки и сток воды. Их точная оценка в масштабе бассейна имеет решающее значение для понимания процессов регионального гидрологического цикла.

Максимально возможное испарение с поверхности принято называть испаряемостью. Для обозначения испаряемости в англоязычной литературе используется термин «потенциальное испарение» (с англ. Potential Evaporation).

Традиционные методы оценки испарения и испаряемости включают метод водного баланса, уравнение Пенмана–Монтейта [Monteith, 1965], Л. Тюрка [Turk, 1961] и метод, предложенный Дальтоном (1802 г.), отражающий взаимосвязь между скоростью поверхностного испарения и взаимодействующих факторов [Liu et al., 2022]. Эти методы имеют ряд преимуществ – простую структуру, высокую точность и относительно хорошую применимость. Однако они хорошо работают лишь для расчетов показателей в точке пространства и в стационарном (едином) масштабе [Liu et al., 2022], не позволяя отразить региональные особенности. В последнее время, с развитием технологий дистанционного зондирования и геоинформационного моделирования с высоким пространственно-временным разрешением, возможность количественно оценить динамику испарения в региональном масштабе значительно выросла.

Фактические данные об испарении и испаряемости на равнинных территориях доступны для многих районов России, однако данные о распределении этих показателей на больших высотах менее многочисленны. Помимо этого наблюдается недостаток

информации о горизонтальной и вертикальной дифференциации испарения и испаряемости в высокогорье. Как отмечено в [Севастьянов, 1998], получение климатических характеристик в горах расчетным путем по данным метеорологических станций затруднено, а подчас и невозможно в связи с большим разнообразием природных условий. Более того, существенными проблемами расчета водного баланса горных водосборов являются крайне редкая сеть наблюдений и ограниченная репрезентативность исходных данных [Мезенцев, 2001]. Другим важным вопросом является необходимость определения взаимосвязей, существующих между испарением из стандартных испарометров и климатическими данными для территории высокогорий.

За последние 40 лет было выявлено, что средняя температура Земли возрастает в среднем за десятилетие на 0,18 °C [NOAA..., 2021]. Исходя из этого ожидалось, что воздух у поверхности станет более сухим, что приведет к увеличению испарения с водной поверхности. Однако данные наблюдений показывают обратное – испарение с водной поверхности снижается [Peterson, Golubev, Groisman, 1995]. Это явление назвали «парадокс в испарометре» (с англ. Pan Evaporation Paradox) [Roderick, Farquhar, 2002]. Возможно, это объясняется увеличением влагосодержания в атмосфере с увеличением ее температуры. Другим фактором, способным оказать влияние на уменьшение испарения в испарометре, может быть уменьшение солнечной радиации в результате увеличения облачности и (или) аэрозолей. Проверить эти гипотезы возможно в результате комплексных гидрометеорологических наблюдений, проведенных на различных территориях и в различных физико-географических условиях, в том числе в высокогорье Алтая.

Цель данной работы – оценка испаряемости в горно-ледниковом бассейне Актру для выявления ведущих факторов его пространственно-временной дифференциации.

История водно-балансовых наблюдений в высокогорье Алтая-Саянского региона начинается с 1960-х гг. с Международного гидрологического десятилетия (МГД), проводимого в 1966–1975 гг. В этот период стало широко использоваться понятие «репрезентативный» речной бассейн. Были организованы специальные наблюдения, результаты которых затем распространялись на другие бассейны, находившиеся в аналогичных физико-географических условиях [Тронов, 1968].

В качестве репрезентативных бассейнов были выбраны верховья бассейна р. Мульта и верховья р. Аккем. Томский государственный университет (ТГУ) проводил наблюдения за отдельными составляющими водного и ледового балансов в верховьях р. Актру. После окончания МГД эти наблюдения (в бассейне р. Актру) были продолжены под эгидой Международной гидрологической программы (МГП). Одновременно с МГП слежение за ледниками проводилось в рамках программы наблюдений за колебаниями ледников. Как отмечается в [Руководство..., 2011], для выполнения этих двух программ в Советском Союзе были отобраны семь горно-ледниковых бассейнов в различных регионах. В Алтае-Саянском регионе в качестве опорного (репрезентативного) горно-ледникового бассейна был выбран бассейн верховьев р. Актру. Климатические условия оледенения в бассейне Актру приближены к некоторым средним значениям для Алтая и более

типичны, чем в районе Белухи [Тронов, 1966]. После окончания МГП (1984) материалы за составляющими водного и ледового балансов, а также за колебаниями ледников в бассейне были опубликованы в [Ледники..., 1987].

Площадь горно-ледникового бассейна Актру (до выхода долины в межгорную котловину) составляет около 50 км². Площадь, занятая ледниками, согласно [Narozhniy, Zemtsov, 2011], сократилась в бассейне Актру с 18 км² в 1850 г. до 14,88 км² в 2008 г. Современное оледенение располагается в интервале высот от 2 400 до 4 044 м, но основная часть площади приходится на интервал 3 200–3 600 м (рис. 1).

В последнее время усилиями ТГУ и его партнеров – Института климатических и экологических систем СО РАН и Института географии РАН, были сделаны шаги по восстановлению регулярных исследовательских экспедиций и модернизации научно-исследовательской инфраструктуры в горно-ледниковом бассейне Актру. В частности, начиная с 2019 г. возобновлен регулярный гляциологический мониторинг [Кутузов и др., 2019] и установлена сеть автоматических метеостанций. С июля 2021 г. в нивально-гляциальной зоне Актру стал проводиться автоматический мониторинг за различными параметрами солнечной радиации. В июле 2022 г. были начаты наблюдения за испарением с водной поверхности при помощи сети стандартных испаромеров ГГИ-3000.

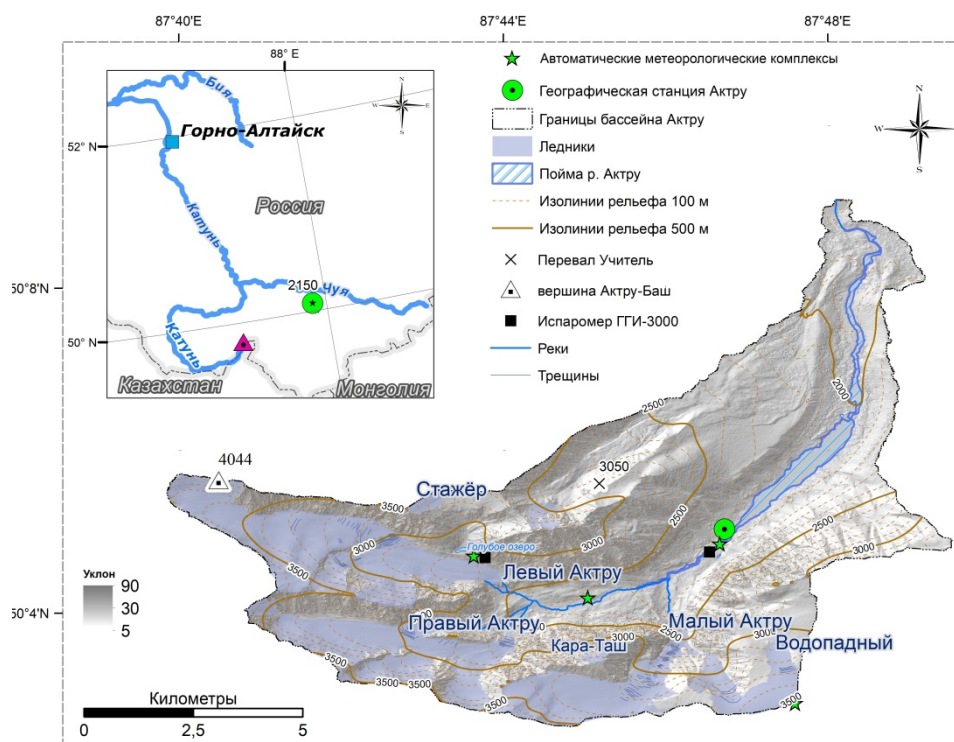


Рис. 1. Географическое положение и особенности района исследований

Fig. 1. Geographical location and main features of the study area

Методы исследования

Оценка испаряемости может быть проведена с использованием целого ряда методов. При этом уже давно признано, что испаряемость каждой природной поверхности обладает уникальными особенностями. Поэтому испарение с водной поверхности, определяемое с помощью водных испарометров, будет лишь условно отражать испаряемость с различных типов поверхности. Однако ввиду своей простоты и надежности, использование водных испарителей в условиях горных бассейнов является целесообразным способом организации наблюдений и может, в том числе, применяться и для характеристики испаряемости.

В данной статье, методология исследования строится на использовании фактических наблюдений, метеорологического мониторинга, уравнения с эмпирическими коэффициентами, а также геоинформационного моделирования. Исследование выполнено на оборудовании уникальной научной установки «Система экспериментальных баз, расположенных вдоль широтного градиента» ТГУ при финансовой поддержке Минобрнауки России (RF-2296.61321X0043, 13.УНУ.21.0005, договор № 075-15-2021-672).

Наиболее точным из разработанных методов считается непосредственное измерение слоя испарившейся воды с помощью водных испарителей. Для изучения и мониторинга водного баланса был выбран испаромер-осадкомер ГГИ-3000. Данный прибор предназначен для измерения и регистрации испарения с почвы и водной поверхности, а также для измерения количества выпавших осадков [Наставление..., 1985]. Испаромер ГГИ-3000 представляет собой два металлических сосуда с испарительной площадью 3 000 см², высотой 60 см, цилиндрической формы с конусообразным дном. Для измерения испарения по высоте испаромеры ГГИ-3000 были установлены в горно-ледниковом бассейне Актру на разных высотах. Первая группа была установлена на метеоплощадке возле бывшей гидрометеостанции Актру (ГМС Актру) на высоте 2 150 м. Вторая группа была установлена на 700 м выше на метеоплощадке у Голубого озера в гляциальной зоне.

Определение испарения с водной поверхности испаромера ГГИ-3000 включает измерение уровня воды в испарителе при помощи объемной бюретки и измерительной трубки, а также измерение атмосферных осадков, принятых дождемером, посредством мерного стакана.

Для определения величины испарения за период между двумя смежными сроками наблюдений использовалась следующая формула (1):

$$Zm = h1 - h2 + P, \quad (1)$$

где Zm – количество воды, испарившейся за период между сроками наблюдений, в 1 мм слоя; P – коли-

чество осадков в 1 мм слоя; $h1$, $h2$ – уровень воды в испарителе, полученный как среднее значение из трех исправленных результатов измерений по измерительной трубке, мм ($h1$ – значение уровня в предыдущий срок наблюдений, $h2$ – текущий срок).

Осадки, собранные дождемером, измеряли в те же сроки, в которые измеряли уровень воды в испарителе. Чтобы определить величину осадков в 1 мм слоя, результат измерения (n), определяемый числом делений мерного стакана, делился на 60. Это является следствием следующего соотношения (2):

$$P = \frac{V}{S} = \frac{n \times 5}{3\,000} \times 10 = \frac{n}{60}, \quad (2)$$

где V – объем осадков в см³; S – площадь дождемера в см²; 5 – цена одного деления мерного стакана в см³; 10 – число миллиметров в 1 см.

Измерения производились через равный промежуток времени. В долине реки Актру – ежедневно в 20.00, а также после каждого сильного ливня. Получив и проанализировав полученные сведения, мы сравнили их с данными метеорологического мониторинга (рис. 2).

Метеорологический мониторинг

Мониторинг основных метеорологических величин выполнялся в горно-ледниковом бассейне Актру в различных высотно-морфологических и ландшафтных комплексах (табл. 1). Оборудование размещалось с учетом опыта многолетних исследований, выполняемых ранее сотрудниками проблемной научно-исследовательской лаборатории гляциоклиматологии ТГУ. В июле 2021 г. на береговой морене Левого Актру была установлена метеостанция профессионального класса Campbell Scientific с 4-компонентным радиометром-балансометром Hukseflux NR01. Полученные с сети метеорологического мониторинга данные регулярно заносятся в базу данных [Ерофеев, Копысов, Локтионова, 2020].

Гидрометеостанция (ГМС) Актру расположена в понижении троговой долины Актру, поэтому приведенные по ней в климатических справочниках данные, из-за большой закрытости горизонта и отсутствия солнца над горизонтом с декабря по январь, не отражают действительные характеристики прямой, суммарной и рассеянной радиации для всего горно-ледникового бассейна [Научно-прикладной справочник..., 1993]. Поэтому данные по автоматической метеорологической станции (АМС) Голубое озеро (рис. 2) являются более репрезентативными для водосбора Актру. С высотой суммарная радиация обычно уменьшается за счет увеличения облачности. Однако высокие вершины (АМС Купол) часто оказываются выше пояса облачности. Потому для них характерен более высокий приход суммарной радиации.

Таблица 1

АМС в бассейне Актру

Table 1

Automatic weather stations for the Aktru basin

Показатель	ГМС Актру	Морена Большого Актру (бывш.)	Голубое озеро	Вершина Купол
Широта (N)	87,4667	87,4503	87,4365	87,4759
Долгота (E)	50,4848	50,418	50,4719	50,2881
Высота (м н. ур. м.)*	2150	2406	2840	3556
Начало наблюдений	Август 2019	Август 2020	Июль 2021	Август 2021
Логгер (производитель)	Davis	Davis	Campbell	Davis
Измеряемые параметры*	ТВ, АО, ОВ, СВ, НВ	ТВ, АО, ОВ, СВ, НВ, ТГ	ТВ, АО, ОВ, СВ, НВ, КР, ДР, ТГ	ТВ, АО, ОВ, СВ, НВ, КР

Примечание. * ТВ – температура воздуха, ОВ – относительная влажность, АО – атмосферные осадки (дождь), СВ – скорость ветра, НВ – направление ветра, КР – входящая и отраженная коротковолновая радиация, ДР – входящая и отраженная длинноволновая радиация, ТГ – температура грунта.

Notes. * ТВ – air temperature, ОВ – relative humidity, АО – precipitation (rain), СВ – wind speed, НВ – wind direction, КР – incoming and reflected shortwave radiation, ДР – incoming and reflected longwave radiation, ТГ – substrate temperature.

Таблица 2

Суммарная среднемесячная солнечная радиация на Голубом озере в 2022 г. (для удобства данные приведены в различных единицах измерения)

Table 2

Total average monthly solar radiation on the Goluboye Lake in 2022 (the data are given in different units of measurement for the convenience)

Месяц	МДж/м ² мес	Дж, с/см ²	кВт/м ²
Июль	550	0,020	0,21
Август	507	0,019	0,19

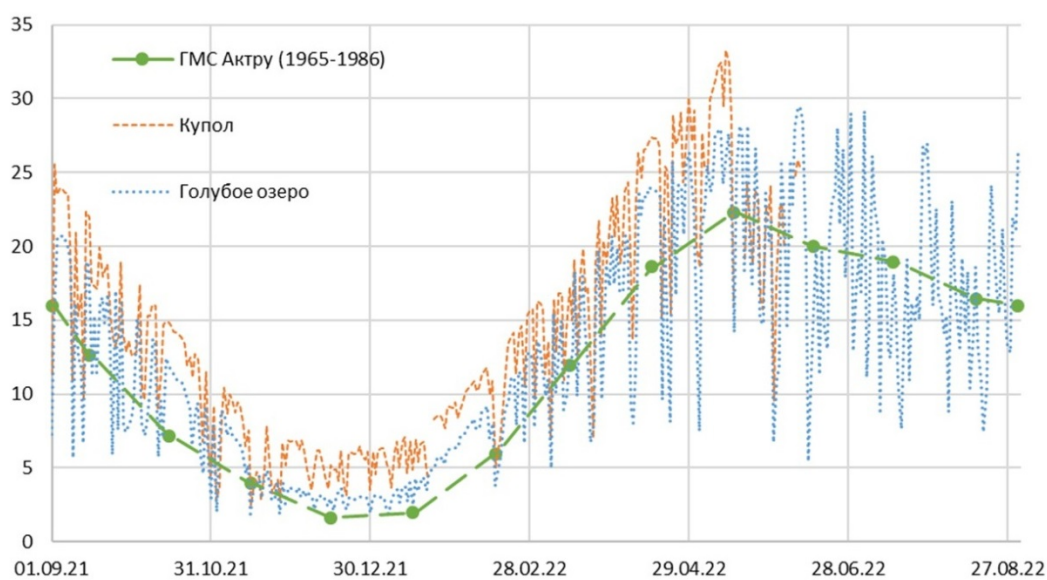


Рис. 2. Изменение средней суточной суммарной солнечной радиации S , мДж/(м²/сут) по данным наблюдений АМС и климатических справочников

Fig. 2. Change in the average daily total solar radiation S , mJ/(m²/day) according to AWS observations and climate handbooks

Величины суммарной радиации хорошо увязываются с типами погоды [Белова, 1965]. Также в

горных районах следует принимать во внимание большую изменчивость суммарной радиации из-за

наличия участков образования локальной облачности [Севастьянов, 1998].

Геоинформационное моделирование морфометрических и соляных показателей проводилось нами на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 2 м, состоящей из 14 650 462 пикселей. Цифровая модель рельефа была получена ТГУ по программе «Наблюдения за ледниками из космоса» Французского космического агентства (CNES). В основе ее создания была стереопара из космических снимков Pleiades.

С использованием модуля Potential Incoming Solar Radiation ГИС-пакета SAGA нами были рассчитаны прямая, рассеянная, суммарная солнечная радиация и продолжительность солнечного сияния. Ранее по схожей методике в этом программном модуле были рассчитаны элементы водного баланса для малого модельного водосбора для территории юга Западной Сибири [Ерофеев, Копысов, Никифоров, 2018; Erofeev, Kopysov, 2020]. Расчет показателей солнечной радиации выполнялся при коэффициенте прозрачности атмосферы 70 %. Из-за большей закрытости горизонта разница между продолжительностью солнечного сияния на Голубом озере в июле составила на один час больше, чем на ГМС Актру (11 и 10 ч соответственно). В августе продолжительность солнечного сияния на Голубом озере составила уже на два часа больше (10 и 8 ч соответственно).

Для заполнения пропусков в распределении испаряемости по двум водоиспарительным площадкам были использованы методы Н.Н. Иванова и Л. Тюрка, основанные на применении формул с эмпирическими коэффициентами.

Изначально формула Н.Н. Иванова [Винников, Викторова, 2009] была предложена для расчета ежемесячных сумм испаряемости:

$$Z_M = 0,0018 (25 + T)^2 (100 - r), \quad (3)$$

где Z_M – слой испарившейся воды, мм/мес; T и r – средние месячные температуры и относительная влажность воздуха.

Данная формула разработана для равнинных территорий. Например, в условиях Мещерской низменности осреднение измерений за декаду [Семенова, 2019] давало лучшее совпадение результатов расчетов по формуле Н.Н. Иванова и измеренных испарителем ГГИ-3000, разница между которыми составляла около 5 % за два года наблюдений.

В данном исследовании формула была адаптирована нами для расчета испаряемости с суточным разрешением с учетом влияния скорости ветра:

$$Z_M = 6 \times 10^{-5} (25 + T)^2 (100 - r) (1 + 0,72 w_2), \quad (4)$$

где Z_M – слой испарившейся воды, мм/сут; T и r – средние суточные температура и относительная влажность воздуха, $(1 + 0,72 w_2)$ – поправка на

скорость ветра по В.Д. Зайкову [Винников, Викторова, 2009], w_2 – скорость ветра на высоте 2 м, м/с.

Формула Л. Тюрка [Turg, 1961] первоначально была разработана для юга Франции и севера Африки. Она основана на общедоступных климатических данных, таких как солнечная радиация, температура и относительная влажность воздуха. Для учета влияния скорости ветра формула Л. Тюрка нами также была модернизирована включением поправки В.Д. Зайкова:

$$Z_M = 0,21 C (S + 2,094) \frac{T}{T+15} (1 + 0,72 w_2), \quad (5)$$

где Z_M – слой испарившейся воды, мм/сут; T – средняя суточная температура воздуха; S – суммарная радиация, мДж/(м² сут); 0,21 – эмпирический коэффициент, уменьшенный нами в виду добавления в формулу поправки на скорость ветра (у Л. Тюрка изначально 0,31); 2,094 – эмпирическая константа, предложенная Тюрком; C – параметр, учитывающий влияние влажности (при $r > 50\%$ $C = 1$).

По данной формуле Z_M линейно увеличивается пропорционально температуре и солнечной радиации с уменьшением относительной влажности ниже 50 %. В горно-ледниковом бассейне относительная влажность почти всегда больше (рис. 3), а поэтому Z_M в основном определяется приходом солнечной радиации. Величина относительной влажности не оказывает существенного влияния.

Согласно теории испарения Дж. Дальтона (1802 г.), усовершенствованной в 1882 г. Э.В. Штелином, скорость выноса испарившихся молекул воды воздушными потоками наряду с дефицитом насыщения воздуха над испаряющей поверхностью являются важнейшими факторами скорости испарения [Винников, Викторова, 2009]. Наши данные с автоматических метеостанций (рис. 4) показывают, что средняя за лето скорость ветра с высотой возрастает, что во многом объясняется уменьшением шероховатости от растительного покрова и увеличением длины разгона воздушных масс. Флуктуации скоростей ветра на метеостанциях наглядно отображают сложность циркуляционных процессов в горах.

Градиенты температуры приземного слоя воздуха в горно-ледниковом бассейне Актру

В силу большого разнообразия ландшафтных условий, создание карты температуры потребовало использования дифференцированного подхода. В основе наших расчетов был градиент температур, рассчитываемый по сети опорных станций в долине Актру, градиент абсолютных высот, описываемый ЦМР, а также коэффициент неравномерного нагревания земной поверхности.

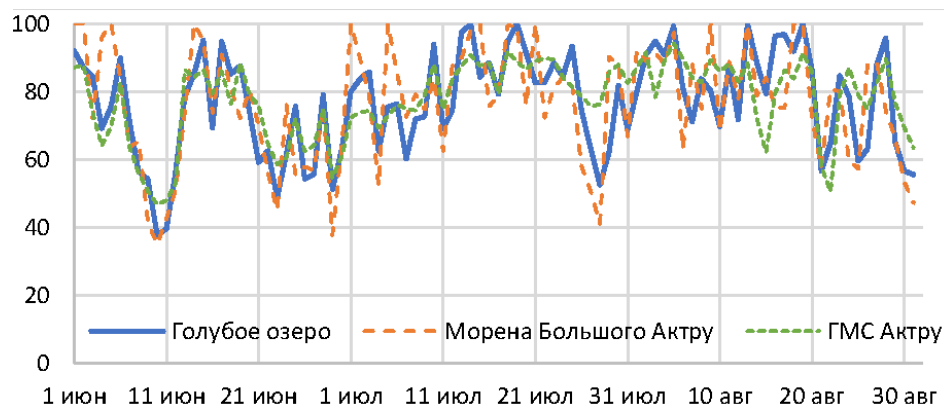


Рис. 3. Распределение средней суточной относительной влажности воздуха r , % за летний период 2022 г.

Fig. 3. Distribution of the average daily relative air humidity r , % for the summer period of 2022

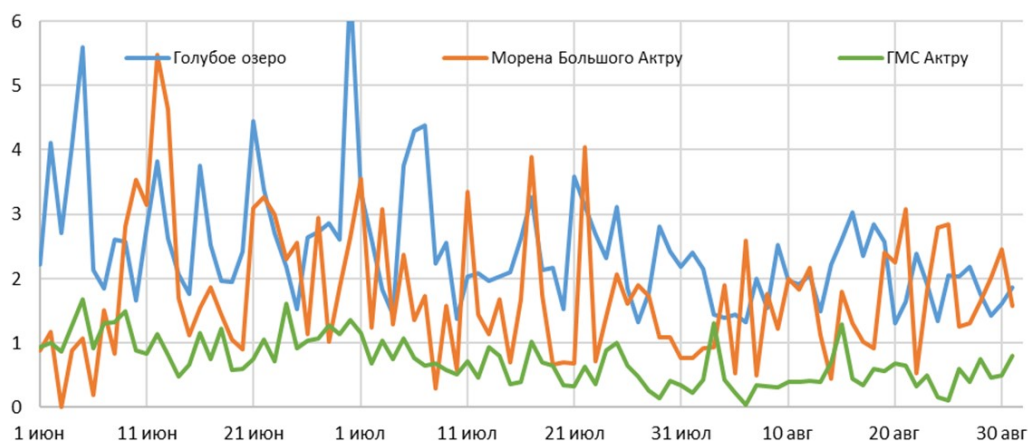


Рис. 4. Распределение средней суточной скорости ветра, м/с за летний период 2022 г.

Fig. 4. Distribution of the average daily wind speed, m/s for the summer period of 2022

При переходе с неледниковой поверхности на ледниковую, так же как и в [Галахов, Мухаметов, 1999], был применен так называемый скачок температуры. Как указано в [Щетинников, 1976], на его величину оказывает влияние не только изменение подстилающей поверхности, но и размеры ледника, а также местная циркуляция воздуха [Ледники..., 1987]. В целом средние суточные значения «скачка температуры» воздуха на ледниках Актру оцениваются в $1,0\text{--}1,5^\circ\text{C}$ [Ледники..., 1987]. Исследование параметров температурного скачка в данной работе не проводилось. В расчетных формулах нами было использовано значение $1,25^\circ\text{C}$.

С учетом высотных температурных градиентов, полученных на опорных метеостанциях, территория бассейна была разделена на три зоны:

Зона 1. Долина Актру. Отметки абсолютных высот в пределах зоны изменяются в пределах от 1 640 до 2 600 м н. ур. м. Нижняя высотная граница распо-

ложена до выхода долины в межгорную котловину. Верхнее соответствует высоте «бараньих лбов» у ледника Левый Актру, которые представляют собой естественный барьер для циркуляции воздушных масс в долине. Измеренный высотный температурный градиент составил $0,2^\circ\text{C} / 100\text{ м}$.

Зона 2. Высокогорные плато и поверхности склонов, примыкающих к ледникам, расположенные в диапазоне абсолютных высот 2 600–3 100 м н.у.м. На данных высотах находятся поверхности плато Учитель и Водопадный. Высотный температурный градиент для них составил $0,5^\circ\text{C} / 100\text{ м}$.

Зона 3. Нивально-гляциальная зона Актру (2 620–4 044 м н. ур. м). В основе выделения данной зоны лежал «скачок температуры», наблюдаемый при переходе с неледниковой на ледниковую поверхность. Высотный температурный градиент в данной зоне составил $0,4^\circ\text{C} / 100\text{ м}$.

Ночью на дне долины (до высоты 2 300 м и более) часто наблюдаются инверсии температуры, чем объясняются отрицательные или уменьшенные вертикальные градиенты температуры между ГМС Актру и пунктами наблюдений на склонах [Ледники..., 1987]. Возможно, поэтому температура воздуха с высотой не всегда понижается, что хорошо видно на рис. 5, где в отдельные дни температура с высотой повышается (например, 11 и 27 июля, 10 августа) или выравнивается.

Другой элемент методики для расчета карты температур горно-ледникового бассейна Актру – использование коэффициента суточного неравномерного нагревания (Diurnal Anisotropic Heat). Данный коэффициент изначально был предложен в работе [Boehner, Antonic, 2009] и представляет собой аппроксимацию суточного неравномерного распределения тепла по поверхности рельефа, задаваемого ЦМР (6):

$$k_i = \cos(amax - a) \arctan(b), \quad (6)$$

где $amax$ – экспозиция с максимальным общим избыточным теплом; a – экспозиция склона; b – угол наклона.

Итоговая формула для расчета градиентов температуры приземного слоя воздуха в горно-ледниковом бассейне Актру имела следующий вид (7):

$$T_{x,y,z} = [T_{2840} - (z_{x,y} - 2840)\Delta t_i] (1 + k_i), \quad (7)$$

где $T_{x,y,z}$ – температура в расчетной ячейке раstra; T_{2840} – температура воздуха на базовой метеостан-

ции; $z_{x,y}$ – абсолютные высоты поверхности рельефа, расположенные выше базовой метеостанции; Δt_i – градиент температуры по двум соседним метеостанциям; k_i – коэффициент суточного неравномерного нагревания поверхности.

Пример расчета градиента температуры приземного слоя воздуха в августе 2022 г. для гляциальной зоны Актру (Зона 3) в программном модуле GRID-калькулятор ГИС-пакета SAGA (8):

$$(4,2 - 1,25) \times (g_1 - 2840) \times 0,004 \times (1 + g_2), \quad (8)$$

где 4,2 – среднемесячная температура базовой станции, расположенной на Голубом озере (°C); 1,25 – температурный скачок, принятый для ледниковых поверхностей (°C); g_1 – ЦМР бассейна Актру (метр н.у.м.); 2 840 – высота базовой метеостанции над уровнем моря (метр н. ур. м.); 0,004 – высотный температурный градиент (°C/м); g_2 – матрица с коэффициентом суточного неравномерного нагревания земной поверхности.

Расчет карт температур приземного слоя воздуха дал возможность перехода от измерений в «точке» к расчету изменения градиентов по всей площади бассейна. Как и по метеоданным (рис. 5), июнь 2022 г. оказался самым теплым месяцем 2022 г. в бассейне Актру. Пространственно-временная динамика среднемесячных показателей приведена в табл. 3 и на рис. 6.

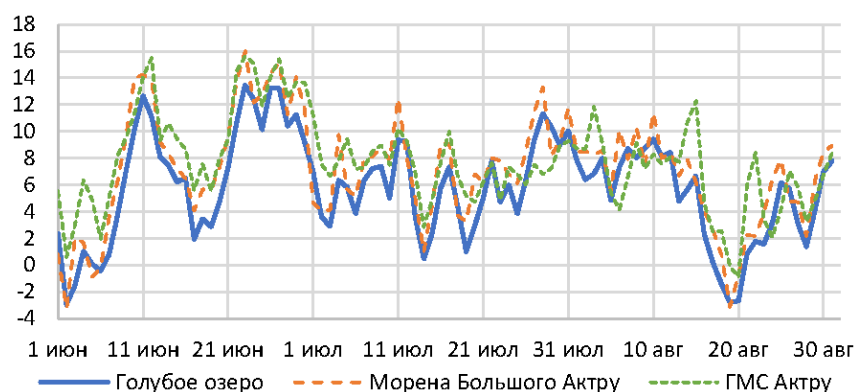


Рис. 5. Распределение средних суточных температур воздуха в летний период 2022 г. по данным метеонаблюдений, T (°C)

Fig. 5. Distribution of average daily air temperatures in the summer period of 2022 according to registered data, T (°C)

Таблица 3

Показатели среднемесячной температуры воздуха лето 2022 г. по данным геоинформационного моделирования ($\bar{T}$ зон – среднее в выделенной зоне, $\bar{T}$ летнее – суммарные показатели по бассейну)

Table 3

Indicators of the average monthly temperature of the surface air layer in the summer of 2022 according to GIS-based modeling ($\bar{T}$ зон – average in the target zone, $\bar{T}$ летнее – summer total temperature for the whole basin)

№ зоны	1				2				3				Всего
Месяц	VI	VII	VIII	$\bar{T}$ зон	VI	VII	VIII	$\bar{T}$ зон	VI	VII	VIII	$\bar{T}$ зон	$\bar{T}$ летнее
Минимальная температура, °C	8,8	6,6	5,5	7	-2,3	-2,7	-4	-3	-1,8	-2,2	-2,5	-2,16	-2,7
Максимальная температура, °C	12,2	10	8,9	10,4	7,5	7	5,8	6,7	6,9	6,5	6,2	6,5	12,2
Среднее, °C	10	7,6	6,6	8	5	4,6	3,3	4,3	3,6	3,2	2,9	3,2	5,5

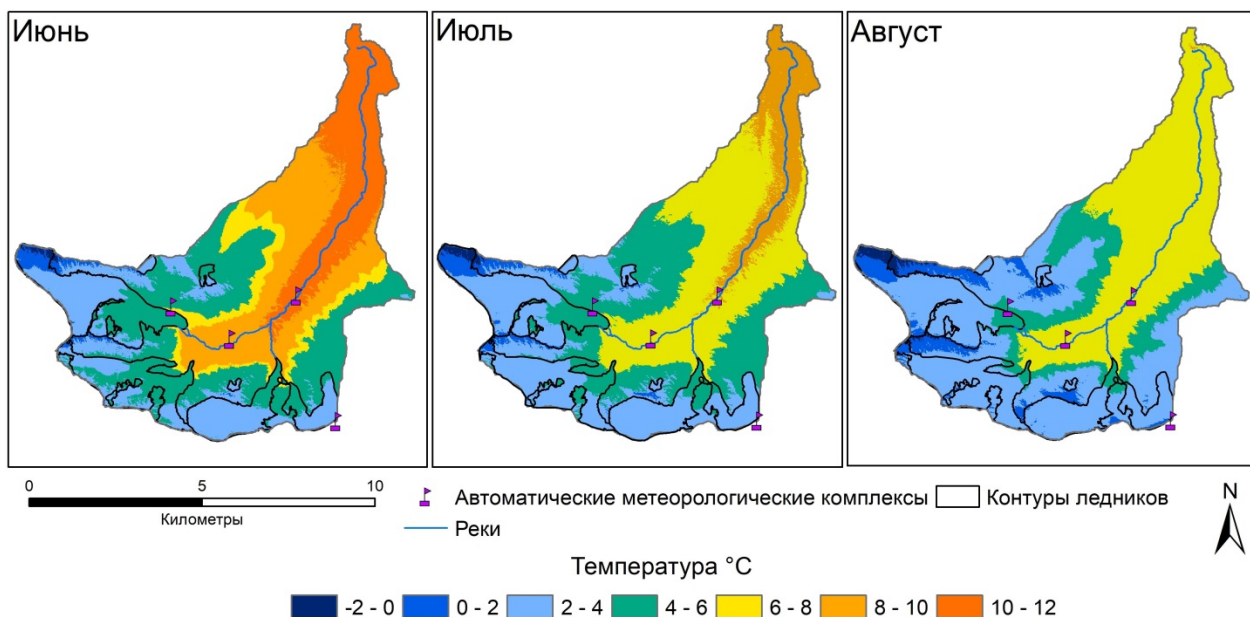
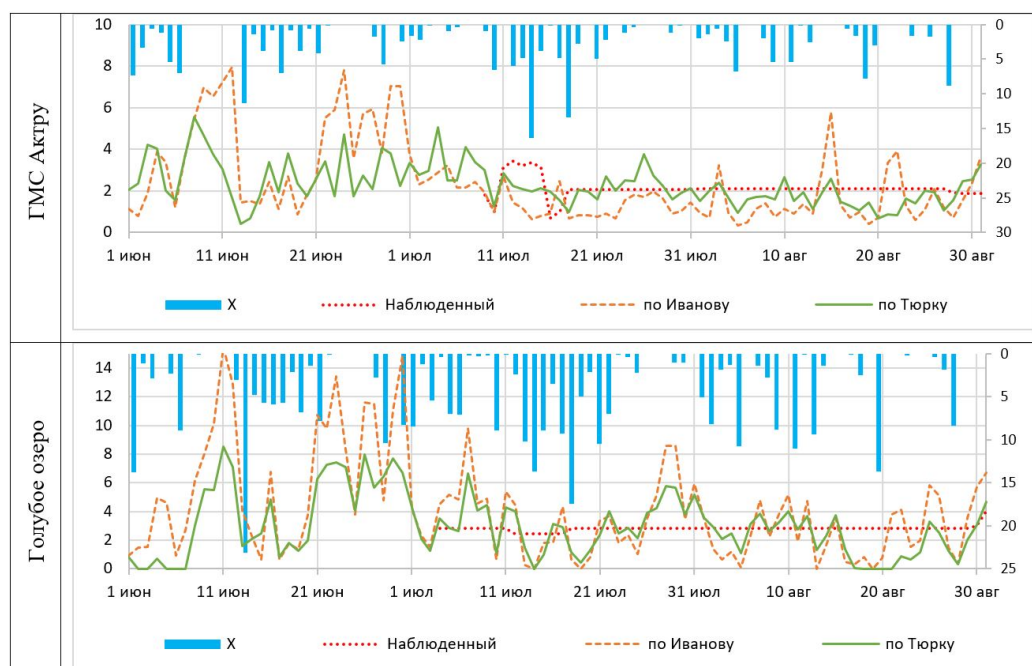


Рис. 6. Распределение приземной температуры воздуха в бассейне Актру в летние месяцы 2022 г.

Fig. 6. Distribution of surface air temperature in the Aktru basin in the summer months of 2022

Рис. 7. Средний суточный слой испаряемости Z_M , мм/сут и атмосферные осадки (X) (правая ось) летом 2022 г.Fig. 7. Average daily potential evaporation depth from Z_M mm/day and precipitation (X) (right axis) in the summer of 2022

Результаты и обсуждение

Наблюдения за испарением с водной поверхности велись периодически, поэтому на рис. 7 они представлены прямыми линиями, отражающими средние за период между измерениями суточных значений

испарения с водной поверхности. На рис. 7 хорошо видно, что в период выпадения осадков испаряемость минимальна, а при отсутствии осадков, как правило, наблюдается ясная солнечная погода и максимальная испаряемость. Суточные значения слоя испаряемости, вычисленные по формуле

Н.Н. Иванова с учетом поправки на ветер, сильно превышают суточные максимумы. Однако осредненные за более длительные периоды (декады) результаты расчетов близки к наблюдаемым. Разница между наблюдаемыми и вычисленными для ГМС Актру 31 %, а для АМС Голубое озеро 9 %. В целом с использованием этой формулы за период июнь–август 2022 г. испаряемость с для ГМС Актру составила 219 мм, что на 161 мм меньше вычисленного по данным АМС Голубое озеро.

Данные, полученные с использованием формулы Л. Тюрка, показывают меньшую амплитуду колебаний испаряемости и более приближены к фактическим. Средняя разница между наблюдаемыми и вычисленными для ГМС Актру значениями составляет 9 %, а для АМС Голубое озеро 11 %. При этом за период июнь–август 2022 г. испаряемость для ГМС Актру составила 269 мм, что на 54 мм меньше вычисленного по данным АМС Голубое озеро.

Ранее за период 1972–1986 гг. водный эквивалент годовых затрат тепла на испарение для ГМС Актру оценивался в 276 мм [Копысов, 2011]. По формуле из работы А.В. Мезенцева [2001] эта величина тесно контролируется значениями радиационного баланса и с высотой уменьшается, во многом за счет роста затрат тепла на таяние снега и мерзлоты. Вообще в абляционный период испарение в горно-ледниковом бассейне Актру с тающей поверхности снега и льда ничтожно мало и при расчетах водного баланса эту составляющую можно не учитывать [Ледники..., 1987]. Во многом это связано с особенностями сочетания влажности и температуры над ледниками, при которых с тающей снежно-ледниковой поверхности испарение почти отсутствует, а то и вовсе преобладает конденсация.

Верификация модели с фактическими (измеренными) данными и их калибровка выполнялись в GRID-калькуляторе ГИС-пакета SAGA с использованием следующего выражения (9):

$$Z_m = Z_m^T \left(1 + \left(\frac{k_i}{n} \right) \right), \quad (9)$$

где Z_m^T – испарение, полученное по формуле Л. Тюрка; k_i – коэффициент суточного неравномерного нагревания поверхности; n – калибровочный коэффициент.

Результаты подбора калибровочного коэффициента n представлены в табл. 4. Итоговые результаты расчета испаряемости за летние месяцы 2022 г. приведены на рис. 8.

Наиболее близкие к реальным значениям испарения для ГМС Актру получились с использованием коэффициента 0,8. Однако для метеостанции, расположенной на Голубом озере, наиболее близким оказался коэффициент 1. В расчете карт среднемесячной испаряемости было использовано среднее значение 0,9.

Теплоэнергетические ресурсы испарения (испаряемость) с высотой понижаются за счет понижения температуры воздуха и роста затрат на таяние снега и мерзлоты [Мезенцев, 2001]. Однако в частных случаях, как показали наши данные с испаромеров ГТИ-3000, испаряемость с высотой может увеличиваться. Отчасти это можно объяснить местными условиями расположения приборов.

Так, на Голубом озере наблюдается большая скорость ветра и увеличенный приход суммарной солнечной радиации по сравнению с расположенной в понижении рельефа троговой долины водоиспарительной площадки на ГМС Актру.

Учет солнечной радиации в формуле Л. Тюрка позволяет эффективно использовать ее для геоинформационного моделирования испаряемости в высокогорных бассейнах. Важным элементом методики стал учет коэффициента неравномерного нагревания поверхности. Его использование, при расчетах температуры приземного воздуха, а также среднемесячной испаряемости, позволило верифицировать расчетные показатели с измеренными данными и выполнить их калибровку.

Таблица 4

Изменение среднемесячной испаряемости в зависимости от разных значений n . Значения фактического (измеренного) испарения приведены в виде суммарных показателей для июля и августа 2022 г.

Table 4

Conversion of monthly average potential evaporation depending on different values of n . The values of actual (measured) evaporation are given as total figures for July and August 2022

Метеоплощадка	Испаряемость, мм	Калибровочный коэффициент n										Факт. (измер.)
		Месяц	1,3	1,2	1,1	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	
ГМС Актру 2150	VII	72,8	72,5	72,3	72	71,7	71,4	71,1	70,8	70,5	–	–
	VIII	63,2	62,5	62,2	61,7	61,2	60,7	60,2	59,7	59,2	–	–
	Σ	136	135	134,5	133,7	133	132	131,3	130,5	129,7	132	132
Голубое озеро 2840	VII	84	87	89	91	93	95	97	99	101	–	–
	VIII	66	67	69	71,5	74	76,5	79	81,5	84	–	–
	Σ	150	154	158	162,5	167	171,5	176	180,5	185	163	163

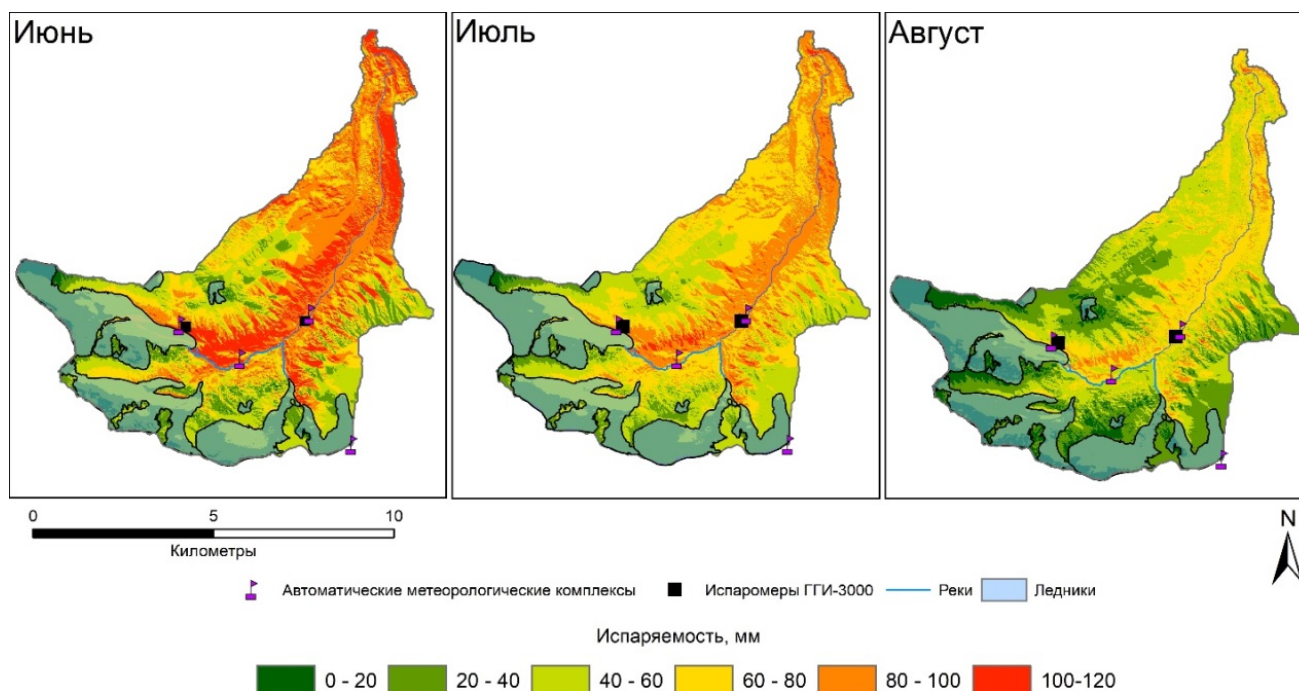


Рис. 8. Испаряемость в горно-ледниковом бассейне Актру в 2022 г.

Fig. 8. Potential Evaporation from the Aktru mountain-glacial basin in 2022

Исследование взаимосвязей между значениями, полученными в стандартных испаромерах, и климатическими факторами, может быть использовано для разработки коэффициентов, приводящих рассчитанные значения к значениям испаряемости в высокогорье. Теплоэнергетические ресурсы испарения (испаряемость) с высотой понижаются за счет понижения температуры воздуха и роста затрат на таяние снега и мерзлоты [Мезенцев, 2001]. Однако в частных случаях, как показали наши данные с испаромеров ГГИ-3000, испаряемость с высотой может увеличиваться.

Отчасти это можно объяснить местными условиями расположения приборов. Так, на Голубом озере наблюдается большая скорость ветра и увеличенный приход суммарной солнечной радиации по сравнению с расположенной в понижении рельефа троги-

вой долины водоиспарительной площадки на ГМС Актру.

Учет солнечной радиации в формуле Л. Тюрка позволяет эффективно использовать ее для геоинформационного моделирования испаряемости в высокогорных бассейнах. Важным элементом методики стал учет коэффициента неравномерного нагревания поверхности. Его использование при расчетах температуры приземного воздуха, а также среднемесячной испаряемости позволило верифицировать расчетные показатели с измеренными данными и выполнить их калибровку.

Исследование взаимосвязей между значениями, полученными в стандартных испаромерах, и климатическими факторами может быть использовано для разработки коэффициентов, приводящих рассчитанные значения к значениям испаряемости в высокогорье.

Список источников

- Белова Н.И. Солнечная радиация в долине р. Актру // Гляциология Алтая. 1965. Вып. 4. С. 172–189.
- Винников С.Д., Викторова Н.В. Физика вод суши. СПб. : РГМУ, 2009. 430 с.
- Галахов В.П., Мухаметов Р.М. Ледники Алтая. Новосибирск : Наука, 1999. 136 с.
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Никифоров А.Н. Ландшафтно-геофизический подход к зонированию структуры землепользования на малом водосборе // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 6. С. 39–47.
- Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Локтионова Т.А. Пространственно-временная динамика элементов гидрологического цикла репрезентативных водосборов рек равнинной и высокогорной Арктики // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622173 от 06.11.2020.
- Ледники Актру (Алтай) / под ред. Д.А. Буракова. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 118 с.
- Копысов С.Г. Ландшафтная гидрология геосистем лесного пояса Центрального Алтая. Deutschland: LAMBERT Academic Publishing, 2011, 150 с.
- Кузцов 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 // Лед и Снег. 2019. № 59 (3). Р. 306. doi: 10.15356/2076-6734-2019-3-469

Мезенцев А.В. Методика расчета водного баланса горных водосборов // Вопросы географии Сибири. Вып. 24. Томск : Изд-во ТГУ, 2001. С. 489–491.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 7, ч. II: Наблюдения за испарением с водной поверхности. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 104 с.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Вып. 20. СПб. : Гидрометеорологическое издательство, 1993. 716 с.

Руководство по мониторингу составляющих водного баланса высокогорных водосборных бассейнов Алтае-Саянского экорегиона в условиях изменения климата / В.П. Галахов, С.Ю. Самойлова; Всемирный фонд дикой природы (WWF России). Проект ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона». М., 2011. 36 с.

Семенова К.С. Оценка формулы определения испаряемости для создания осушительно-увлажнительных земель на осушенных торфяниках Мещерской низменности // Природообустройство. 2019. № 4. С. 23–28. doi: 10.34677/1997-6011/2019-4-23-29

Севастьянов В.В. Климат высокогорных районов Алтая и Саян. Томск : Изд-во ТГУ, 1998. 201 с.

Тронов М.В. Ледники и климат. Л. : ГИМИЗ, 1966. 408 с.

Тронов М.В. Репрезентативный горно-ледниковый бассейн Актру на Алтае. МГИ, № 14. М., 1968. С. 197–201.

Щетинников А.С. Ледники бассейна реки Пскем. Л. : Гидрометеиздат, 1976. 120 с.

Boehner J., Antonic O. Land-surface parameters specific to topo-climatology // Geomorphometry – Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science. 2009. V. 33. P. 195–226. doi: 10.1016/S0166-2481(08)00008-1

Erofeev A.A., Kopysov S.G. Modeling of Hydrological and Climatic Resources of the Landscape for Sustainable Land Use at Small Watersheds // Landscape Patterns in a Range of Spatio-Temporal Scales, Landscape Series 26, Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 163–175.

Liu Y., Qiu G., Zhang H. et al. Shifting from homogeneous to heterogeneous surfaces in estimating terrestrial evapotranspiration: Review and perspectives // Sci. China Earth Sci. 2022. V. 65. P. 197–214. doi: 10.1007/s11430-020-9834-y

Lu Y., Wang Y., Liu Q., Chen X., Zhang Y., Gao L., Chen Y., Liu M., Deng H. Evapotranspiration Variations of the Minjiang River Basin in Southeastern China from 2000 to 2019 // Atmosphere. 2022. V. 13. P. 562. doi: 10.3390/atmos13040562

Narozhniy Yu., Zemtsov V. Current State of the Altai Glaciers (Russia) and Trends over the Period of Instrumental Observations 1952–2008 // AMBIO. 2011. V. 40. P. 575–588.

Monteith J.L. Evaporation and environment // Symp Soc Exp Biol. 1965. V. 19. P. 205–234.

NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for 2021. Online January 2021. Retrieved on June 28, 2022. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202113>

Peterson T., Golubev V., Groisman P. Evaporation losing its strength // Nature. 1995. V. 377. P. 687–688. doi: 10.1038/377687b0

Roderick M.L., Farquhar G.D. The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years // Science. 2002. V. 298. P. 1410–1411.

Turc L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date // Annals of Agronomy. 1961. V. 12. P. 13–49.

References

Belova N.I. *Solnechnaya radiatsiya v doline reki Aktru* [Solar radiation in the Aktru river valley] // Glaciology of Altai. 1965. Iss. 4. C. 172–189. In Russian

Vinnikov S.D., Viktorova N.V. *Fizika vod sushi* [Physics of land waters]. St. Petersburg: RGGMU, 2009, 430 p. In Russian

Galakhov V.P., Mukhametov R.M. *Ledniki Altaya* [Glaciers of Altai]. Novosibirsk: Science. Sib. enterprise of the Russian Academy of Sciences. 1999. 136 p. In Russian

Erofeev A.A., Kopysov S.G., Nikifonov A. *Landshaftno-geofizicheskiy podkhod k zonirovaniyu struktury zemlepol'zovaniya na malom vodosbore* [Landscape geophysical approach to zoning of land use structure at small catchment] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2018. V. 329. No. 6. pp. 39–47. In Russian

Erofeev A.A., Kopysov S.G., Loktionova T.A. *Prostranstvenno-vremennaya dinamika elementov gidrologicheskogo tsikla reprezentativnykh vodosborov rek ravninnoy i vysokogornoy Arkiki* [Spatial and temporal dynamics of elements of the hydrological cycle of representative river catchments in the lowland and high-mountain Arctic] // Certificate of state registration of the database № 2020622173. 06.11.2020. In Russian

Ledniki Aktru (Altay) [Glaciers Aktru (Altai)]. Ed. D.A. Burakov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 118 p. In Russian

Kopysov S.G. *Landshaftnaya gidrologiya geosistem lesnogo poyasa Tsentral'nogo Altaya* [Landscape hydrology of the geosystems of the forest belt of the Central Altai]. Deutschland: LAMBERT Academic Publishing, 2011, 150 p. 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. Ice and Snow. 2019; 59(3) : 306. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-469> In Russian

Mezentsev A.V. *Metodika rascheta vodnogo balansa gornyx vodosborov* // *Voprosy geografii Sibiri* [Methodology for calculating the water balance of mountain watersheds // Problems of Geography of Siberia. Issue. 24]. Tomsk: Publishing House of TGU, 2001, pp. 489–491. In Russian

Nastavleniye gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vyp. 7, Chast' II – Nablyudeniya za ispareniyem s vodnoy poverkhnosti [Instructions for hydrometeorological stations and posts. Issue. 7, Part II – Observations of Evaporation from the Water Surface]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 104 p. In Russian

Nauchno-prikladnyy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletniye dannyye. Vyp. 20. [Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Issue. 20.] St. Petersburg: Hydrometeorological Publishing House. 1993. 716 p. In Russian

Rukovodstvo po monitoringu sostavlyayushchikh vodnogo balansa vysokogornyx vodosbornykh basseynov Altaye-Sayanskogo ekoregiona v usloviyakh izmeneniya klimata [Guidance on monitoring the components of the water balance in the high-mountain drainage basins of the Altai-Sayan Ecoregion under climate change] Galakhov V.P., Samoylova S.Yu.; World Wildlife Fund (WWF Russia). UNDP/GEF/ICI Project "Biodiversity Conservation in the Russian Part of the Altai-Sayan Ecoregion". Moscow, 2011. 36 p. In Russian

Seменова K.S. *Otsenka formuly opredeleniya isparayayemosti dlya sozdaniya osushitel'no-uvlazhnitel'nykh zemel' na osushennykh torfyanikakh Meshcherskoy nizmennosti* [Estimation of the formula for determining evaporation for the creation of drainage and mois-

tening lands on drained peatlands of the Meshcherskaya lowland] // Prirodobustroystvo. 2019, No. 4, pp. 23–28. doi: 10.34677/1997-6011/2019-4-23-29. In Russian

Sevastyanov V.V. *Klimat vysokogornyykh rayonov Altaya i Sayan* [The climate of the high-mountain regions of Altai and Sayan]. Tomsk: Publishing House of TGU, 1998. 201 p. In Russian

Tronov M.V. *Ledniki i klimat* [Glaciers and climate]. Leningrad: GIMIZ, 1966. 408 p. In Russian

Tronov M.V. *Reprezentativnyy gorno-lednikovyy basseyn Aktru na Altaye* [Representative mountain-glacial basin Aktru in Altai] MGI, No. 14. Moscow. 1968. pp. 197–201. In Russian

Shchetinnikov A.S. *Ledniki basseyna reki Pskem* [Glaciers of the Pskem river basin]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. 120 p. In Russian

Boehner J., Antonic O. Land-surface parameters specific to topo-climatology. In: Hengl, T., Reuter, H. (Eds.): *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science*, 2009. V. 33, pp. 195–226, Elsevier. doi: 10.1016/S0166-2481(08)00008-1

Erofeev A.A., Kopysov S.G. Modeling of Hydrological and Climatic Resources of the Landscape for Sustainable Land Use at Small Watersheds // *Landscape Patterns in a Range of Spatio-Temporal Scales*, Landscape Series 26, Springer Nature Switzerland AG 2020. pp. 163–175.

Liu Y., Qiu G., Zhang H. et al. Shifting from homogeneous to heterogeneous surfaces in estimating terrestrial evapotranspiration: Review and perspectives // *Sci. China Earth Sci.* 2022. 65, pp. 197–214. doi: 10.1007/s11430-020-9834-y

Lu Y., Wang Y., Liu Q., Chen X., Zhang Y., Gao L., Chen Y., Liu M., Deng H. Evapotranspiration Variations of the Minjiang River Basin in Southeastern China from 2000 to 2019. *Atmosphere* 2022, 13, 562. doi: 10.3390/atmos13040562

Narozhniy Yu., Zemstov V. Current State of the Altai Glaciers (Russia) and Trends Over the Period of Instrumental Observations 1952–2008. // *AMBIO*. 2011. V. 40. pp. 575–588.

Monteith J.L. Evaporation and environment. *Symp Soc Exp Biol*, 1965. V. 19. pp. 205–234.

NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for 2021, online January 2021, retrieved on June 28, 2022, from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202113>.

Peterson T., Golubev V., Groisman P. Evaporation losing its strength. *Nature*. 1965. 377, pp. 687–688 doi: 10.1038/377687b0

Roderick M.L., Farquhar G.D. The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years // *Science*. 2002. V. 298. pp. 1410–1411.

Turc L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date // *Annals of Agronomy*. 1961. 12. pp. 13–49.

Информация об авторах:

Ерофеев А.А., кандидат географических наук, заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией гляциоклиматологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: erofeew@yandex.ru

Копысов С.Г., кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией мониторинга лесных экосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия; доцент, кафедра гидрологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: wosypok@mail.ru

Гармаева Т.Б., студент, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: tu yana2000garmaeva@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Erofeev A.A., Cand. Sci. (Geography), Head of the Problem Research Laboratory of Glacioclimatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: erofeew@yandex.ru

Kopysov S.G., Cand. Sci. (Geography), Leading Researcher, Head of the Forest Ecosystems Monitoring Laboratory, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia; Associate Professor, Department of Hydrology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: wosypok@mail.ru

Garmaeva T.B., student, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: tu yana2000garmaeva@yandex.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.10.2022; одобрена после рецензирования 06.11.2022; принята к публикации 06.11.2022

The article was submitted 10.10.2022; approved after reviewing 06.11.2022; accepted for publication 06.11.2022