

Метеорологический режим Сыгыктинского ледника (хребет Кодар) в период абляции

© 2021 г. Э.Ю. Осипов^{1*}, О.П. Осипова², О.В. Василенко²

¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия; ²Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия
*eduard@lin.irk.ru

Meteorological regime of the Sygyktinsky Glacier (the Kodar Ridge) during the ablation period

E.Y. Osipov^{1*}, O.P. Osipova², O.V. Vasilenko²

¹Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia;
²V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
*eduard@lin.irk.ru

Received May 29, 2020 / Revised November 26, 2020 / Accepted March 19, 2021

Keywords: *automatic weather station, cloud cover, Eastern Siberia, energy balance, glacier, glacier changes, Kodar, meteorological regime, summer melting.*

Summary

Meteorological parameters measured over two months by two automatic weather stations on the Sygyktinsky glacier and its terminal moraine (Kodar ridge, South of Eastern Siberia, 56.9° N, 117.4° E) were used to study the physical processes controlling the summer ablation of the glacier. The meteorological regime of the glacial zone is conditioned by large-scale atmospheric circulation and characterized by steadily positive air temperatures (7.2 ± 4.5 °C), high relative humidity ($76 \pm 23\%$), significant cloud cover (66%), a predominance of low-intensity precipitation, and low wind speeds (1.0 ± 0.8 m/s). It is found that the daily air temperatures on the glacier strongly correlate ($r = 0.97$) with those in the free atmosphere, so the ERA-Interim reanalysis data (at the level of 750 hPa) can be used to make longer the temperature series on the Kodar glaciers. We found significant statistical relationships between the daily ablation (29 mm day^{-1} on average) and relative humidity as well as with incoming shortwave radiation and cloud cover. The short-wave radiation balance (91 W/m^2) is the main source of energy for melting, which depends on the albedo (average value 0.41). On days with summer snowfalls, the increase in albedo reduces the short-wave balance by 2.5 times. Explicit and latent heat fluxes are the secondary sources of melting energy, while heat loss takes place mainly due to effective long-wave radiation (-15 W/m^2). The absorbed short-wave radiation on the glacier was smaller than that on the moraine, but the radiation balance was comparable on both sites owing to smaller effective LW radiation on the glacier. The dominance of the radiation factor demonstrates the important role of the solar radiation regime (cloud cover and atmospheric transparency) in the surface ablation of the Kodar glaciers.

Citation: Osipov E.Y., Osipova O.P., Vasilenko O.V. Meteorological regime of the Sygyktinsky Glacier (the Kodar Ridge) during the ablation period. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021. 61 (2): 179–194. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421020080.

Поступила 8 мая 2020 г. / После доработки 26 ноября 2020 г. / Принята к печати 19 марта 2021 г.

Ключевые слова: *автоматическая метеостанция, Восточная Сибирь, Кодар, ледник, колебания ледников, летняя абляция, метеорологические условия, облачность, радиационный баланс.*

С помощью системы автоматического мониторинга с высоким временным разрешением измерены метеорологические характеристики и радиационный баланс Сыгыктинского ледника в период абляции. Исследованы колебания метеорологических параметров в ледниковой зоне и проведён их спектральный анализ. Установлено влияние радиационных и синоптических факторов на метеорологический режим ледника. Статистически определена связь метеорологических показателей со скоростью таяния, оценён вклад радиационного баланса в таяние ледника.

Введение

Ледники юга Восточной Сибири интенсивно сокращаются с конца малого ледникового периода [1, 2]. Ледники Кодара наиболее сильно деградировали как по площади [3, 4], так и по толщине [5]. В результате анализа космических

снимков установлено, что скорость сокращения площади кодарских ледников существенно возросла в последние десятилетия [3, 4]. Так, в 1995–2001 гг. она была в пять раз больше, чем в 1850–2013 гг., а в 1995–2013 гг. на порядок больше, чем в 1850–1995 гг. [3]. Ускоренное таяние ледников согласуется с ростом летней темпе-

ратуры воздуха [3], уменьшением количества твёрдых осадков [5] и изменением режима атмосферной циркуляции [6]. Эти выводы базируются главным образом на среднемесячных данных низкогорных метеостанций (ГМС), расположенных вдали от ледников в межгорных котловинах, либо реанализов. Однако низкое пространственное и временное разрешение таких данных не позволяет физически обосновать связи между атмосферными процессами и балансом массы ледников, которые критически важны при моделировании ледниковой динамики разного масштаба. Кроме того, неизвестно, насколько точно данные ГМС и реанализов отражают метеорологические условия в высокогорье.

К методам изучения физических процессов, контролирующих массо- и энергообмен между атмосферой и ледниками и определяющих их таяние, относятся измерение метеорологических и балансовых характеристик ледника с высоким разрешением и количественная оценка составляющих теплового баланса ледниковой поверхности. Это делается с помощью автоматических ГМС, которые устанавливают непосредственно на ледниках [7–9]. К сожалению, на российских ледниках такие исследования единичны и ограничены «классическими ледниковыми районами», например Кавказом [10–12]. На ледниках Восточной Сибири автоматизированные метеонаблюдения ранее не проводили или они были обрывочны [5]. Первые непрерывные автоматические измерения метеорологических характеристик были выполнены в летние сезоны 2015–2017 гг. на одном из ледников Восточного Саяна [13].

В настоящей работе представлены результаты предварительного анализа высокоразрешающих метеорологических данных, полученных в июле–августе 2019 г. с помощью автоматической системы мониторинга на Сыгыктинском леднике (хребет Кодар). Были проанализированы временные ряды метеорологических и гляциологических характеристик, включая компоненты радиационного баланса ледниковой и моренной поверхностей, выполнены статистические оценки связей между скоростью таяния и разными метеопараметрами, рассчитаны коэффициенты корреляции между данными по температуре и осадкам на леднике и на низкогорных ГМС и реанализов.

Район и методы исследований

Сыгыктинский ледник. Работы проводили в водораздельной области восточной ветви (ледник № 5 по Каталогу ледников СССР) Сыгыктинского ледника – единственного на Кодаре перемётного ледника, расположенного в бассейнах рек Левая Сыгыкта и Сюльбан [14–16] (рис. 1). Ледник № 5 имеет восточную экспозицию, хотя за счёт асимметрии его поверхность больше наклонена к юго-востоку. На северо-востоке и севере ледник ограничен водораздельным гребнем высотой до 2988 м. Питание ледника – лавинное, со склонов юго-восточной и южной экспозиций. Площадь ледника – 0,291 км², длина – 0,758 км, максимальная высота – 2670 м, средняя – 2543 м, средний уклон – 19°, средняя многолетняя высота фирновой линии – 2535 м [17]. Язык ледника – относительно крутой (уклон до 30°), почти не имеет моренного чехла и оканчивается на высоте 2450 м. Конечная морена малого ледникового периода (высотой до 50 м) хорошо выражена и отстоит от края на 220–350 м [17]. В правой части ледника конечная морена переходит в боковую, которая прослеживается вплоть до водораздельной области.

Система автоматического мониторинга метеорологических характеристик. В начале июля 2019 г. в ледниковой зоне была установлена специально разработанная система автоматического мониторинга (САМ), позволяющая непрерывно измерять ряд метеопараметров. В неё входят две автоматические метеостанции (см. рис. 1), установленные на боковой морене (56°50,84' с.ш.; 117°25,06' в.д., 2529 м над ур. моря; все высоты в статье даны над уровнем моря) и на пологой части ледника (56°51,02' с.ш., 117°25,09' в.д., 2561 м, уклон 10°). Технические характеристики САМ приведены в табл. 1. *На морене измеряли:* температуру, относительную влажность воздуха, скорость/направление ветра (на высоте 2 м), атмосферное давление, интенсивность осадков, приходящую коротковолновую радиацию (датчик Davis), температуру грунта на поверхности (0 см) и глубине (10 см). Здесь же был установлен четырёхкомпонентный радиометр (LPNET14) для отдельного измерения потоков приходящей/исходящей коротко- и длинноволновой радиации. *На леднике измеряли:* температуру, относительную влажность (на высоте 2 м в день установки), приходящую/от-

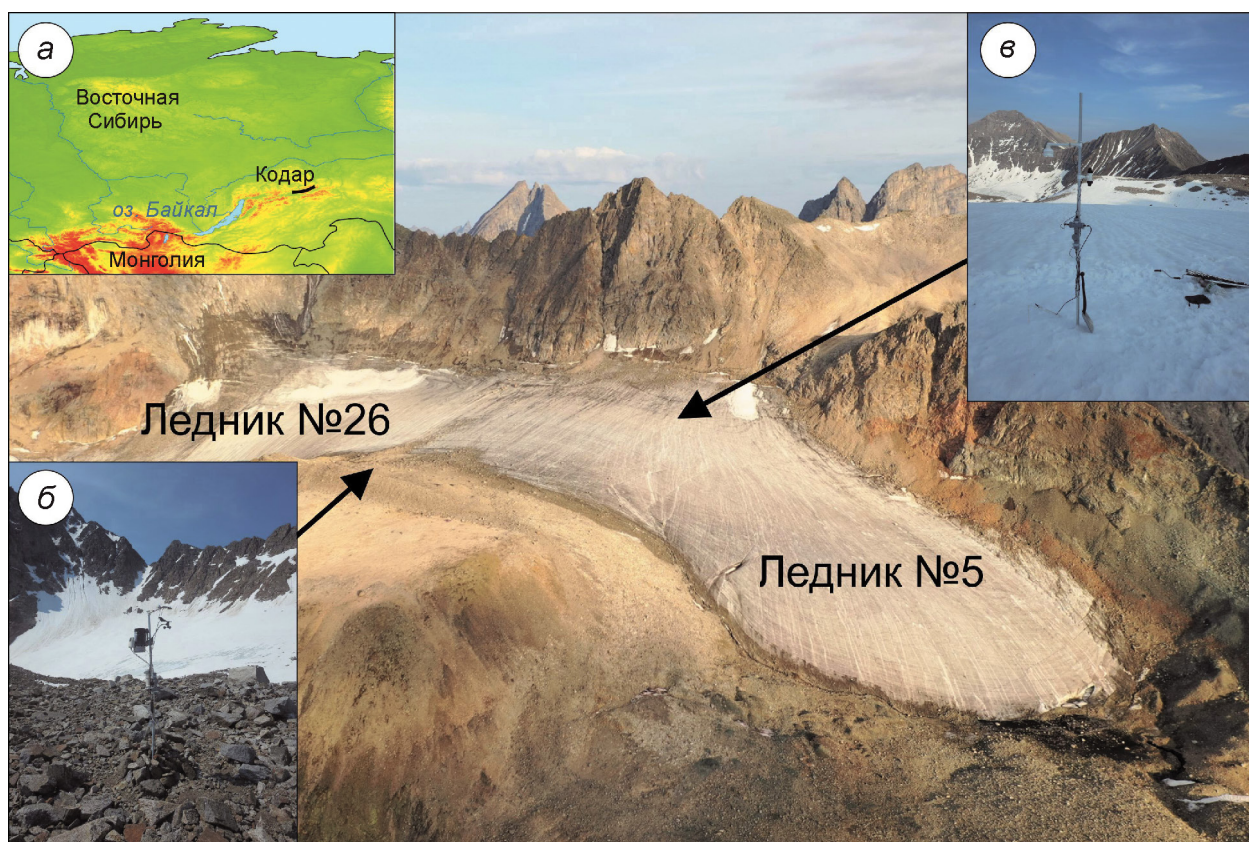


Рис. 1. Перемётный Сыгыктинский ледник (перспективный снимок В. Исаева 25.08.2019 г.).

На врезках: положение района исследования (а), автоматической метеостанции на морене (б) и леднике (в) (фото Э. Осипова 06.07.2019 г.). Стрелками показаны места установки метеостанций

Fig. 1. The Sygyktinsky transection glacier (oblique image by V. Isaev 25.08.2019).

Insets: location of the study area (a), automatic weather station on moraine (b) and glacier (c) (photos by E. Osipov 06.07.2019). The arrows show locations of the weather stations

ражённую коротковолновую радиацию (датчик Davis), а также температуру верхней части ледника в скважине глубиной 2,2 м с шагом 10 см.

Таким образом, коротковолновую радиацию на морене и леднике измеряли тремя независимыми приборами. Учитывая более широкий спектральный диапазон и высокую точность радиометра LPNET14, он использовался для калибровки двух других датчиков коротковолновой радиации (Davis). Из-за понижения поверхности ледника в результате таяния высота датчиков над поверхностью ледника менялась и корректировалась один раз (в конце июля). Отклонение установочной мачты по вертикали за период наблюдений не превышало 3,5°. Все датчики были синхронизированы (часовой пояс +8 GMT) и регистрировали метеопараметры с 30-минутным интервалом.

Снежный покров и измерение таяния. Снегомерные измерения на леднике были проведены

7 июля вдоль одного продольного и трёх поперечных профилей с шагом 50–100 м [18]. Толщина снега составила 50–125 см, в среднем 97 см (в месте установки станции – 107 см). В 25 м от станции был заложен шурф глубиной 1,1 м, в котором исследовали стратиграфию, химический состав снега и его плотность. Разрез представлен переувлажнённым фирнизированным снегом со средней плотностью 0,4 кг/м³. Верхние 5 см толщи загрязнены пылеватым материалом минерального происхождения; на глубине 20 см установлен прослой инфильтрационного льда толщиной 2 см, а в забое шурфа – монолитный инфильтрационно-конжеляционный лёд плотностью 0,8–0,9 кг/м³; отмечался интенсивный талый сток по ледяному основанию. По структурным особенностям и химическому составу снежный покров относится к сезону аккумуляции 2018/19 г. [18]. Снежный покров на леднике

Таблица 1. Технические характеристики метеорологических датчиков, использованных в автоматической системе мониторинга

Измеряемые параметры	Датчик	Пределы измерений	Точность измерений	Место установки
Температура воздуха	Davis 6830	-40 ÷ +65 °C	±0,3 °C	Морена
	DS18B20	-55 ÷ 125 °C	±0,5 °C	Ледник
Относительная влажность	Davis 6830	0 ÷ 100%	±2%	Морена
	НИН-5031	0 ÷ 100%	±3%	Ледник
Скорость ветра	Davis 6410	1 ÷ 89 м/с	±5%	Морена
Направление ветра		1 ÷ 360°	±3°	
Атмосферное давление	Davis	540 ÷ 1100 гПа	±1 гПа	
Атмосферные осадки	Davis 7852	0 ÷ 100 мм/ч	±4%	
Коротковолновая (400–1100 нм) радиация, приходящая и отражённая	Davis 6450	0 ÷ 1800 Вт/м ²	±5%	Морена, ледник
Коротковолновая (300–2800 нм) радиация, приходящая и отражённая	Пиранометры LPNET14 (Delta Ohm), два потока	0 ÷ 2000 Вт/м ²	±2,6%	Морена
Длинноволновая (4,5–45 мкм) радиация, излучаемая небом и земной поверхностью	Пиргеометры LPNET14 (Delta Ohm), два потока	-300 ÷ 300 Вт/м ²	±5%	
Температура грунта	DS18B20	-55 ÷ 125 °C	±0,5 °C	Морена
Температура ледника (термокоса, датчики через 10 см от 0 до 320 см)				Ледник

полностью растаял к 7 августа, т.е. в августе весь ледник оказался в области абляции.

Скорость таяния измерялась в окрестностях ГМС с помощью 11 реек в течение двух суток (6 и 7 июля) для калибровки измерений термокосой. Непрерывные измерения скорости таяния выполнены с помощью термокосы, установленной в скважину глубиной 2,2 м рядом с ГМС, с суточным разрешением в период с 6 июля по 22 августа. Расстояние между температурными датчиками (10 см) позволило измерять понижение поверхности ледника со стандартной ошибкой ±5 см [19]. Кроме того, таяние за весь период наблюдений определялось с помощью несущей мачты (три измерения).

Данные метеостанций и реанализа. В работе использованы восьмисрочные данные ГМС Чара (52 км к восток-северо-востоку от ледника, высота 711 м), а также поля геопотенциала, температуры и относительной влажности воздуха реанализов NCEP/NCAR [20] и ERA Interim [21]. Синоптический анализ выполнялся с использованием следующих карт: приземной, АТ-850, АТ-700, АТ-500 и ОТ-500/1000.

Результаты исследований

Метеорологический режим. В июле–августе 2019 г. в нижней (700 гПа) и средней (500 гПа) тропосфере Восточной Сибири преобладала по-

ложительная аномалия геопотенциала с центром над Таймыром (до 8,5 дам на уровне 500 гПа). Хребет Кодар находился на юго-восточной периферии данной аномалии (до 3,5 дам). Особенности высотного барического поля обусловили аномальные метеорологические условия в районе исследования (700 гПа, реанализ NCEP/NCAR): повышенные температуры воздуха (+1,5 °C от средней многолетней); пониженные относительная влажность воздуха (-7%) и интенсивность осадков (-0,6 мм/сут); ослабленный западно-восточный перенос и увеличение ветров северных направлений. Статистика метеорологических показателей ледниковой зоны приведена в табл. 2, а их средние суточные значения показаны на рис. 2.

Средняя суточная температура воздуха изменялась от -0,2 °C (14 августа на морене) до 12,8 °C (17 июля на леднике). Высокие значения температуры (>10 °C) наблюдались 6–7, 17–18, 25–29 июля и 7–9 августа, а низкие (<5 °C) – 14 и 20 июля, а также 4–5 и 13–23 августа. В сезонном ходе температуры прослеживаются квазициклические колебания (с периодами от 3 до 12 дней), обусловленные крупномасштабными атмосферными процессами в нижней тропосфере: положительные аномалии температуры совпадают с антициклоническими процессами, а отрицательные – с циклоническими, за исключением периода 25–29 июля, когда в перед-

Таблица 2. Статистические характеристики метеопараметров, измеренных на морене и леднике за период с 05.07 по 25.08.2019 г.

Параметры	Место измерений	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение
Температура воздуха на уровне 2 м, °С	Морена	–2,5	15,8	6,9	3,9
	Ледник	–3,2	20,4	7,2	4,5
Температура грунта (глубина 0/10 см), °С	Морена	–2,7/1,1	29,7/10,8	7,9/5,3	5,9/2,1
Относительная влажность воздуха на уровне 2 м, %	Морена	18	100	76	22
	Ледник	16	100	76	23
Скорость ветра (средняя/максимальная), м/с	Морена	0/0	4,9/15,6	1,0/3,4	0,8/2,2
Атмосферное давление, гПа		741	758	749	3
Коротковолновая радиация (приходящая/отражённая), Вт/м ²	Морена	0/0	1114/128	167/20	239/28
	Ледник	0/0	1027/644	156/67	234/111
Длинноволновое излучение (атмосферы/подстилающей поверхности), Вт/м ²	Морена	198/293	385/470	299/357	36/35

ней части циклона наблюдалась адвекция субтропического воздуха с территории Монголии и Китая. Минимальные значения температуры воздуха на леднике колебались от $-3,2$ °С (5 августа) до $9,0$ °С (9 августа), а максимальные – от $2,9$ °С (15 августа) до $20,4$ °С (17 июля). Ночные заморозки наблюдались 4–5 и 13–15 августа. Ряд средней суточной температуры на леднике хорошо коррелирует с таким же рядом, полученным на ГМС Чара (коэффициент корреляции $r = 0,79$), однако наиболее тесная связь получена по результатам сравнения с данными реанализа ERA-Interim на уровне 750 гПа ($r = 0,97$).

Осреднённый суточный ход температуры в ледниковой зоне был относительно сглажен (средняя амплитуда не превышала 5 °С). Несмотря на разность высот (ГМС на леднике находится на 32 м выше, чем на морене), установлены различия в суточном ходе температуры воздуха на морене и леднике: в утренние и дневные часы (между 5 и 16 ч) температура на леднике была выше, чем на морене; температурный максимум на морене (15 ч 30 мин) запаздывал по сравнению с ледником (11 ч 30 мин). В то же время суточные минимумы в обоих пунктах совпадали (около 4 ч). Выявленные различия, вероятно, объясняются как особенностями метеоплощадок (освещённость, отражённая радиация, влияние ледникового ветра), так и соотношением радиационного и адвективного факторов. Суточный ход температуры в ледниковой зоне зависел от облачности: при ясном небе суточная амплитуда увеличивалась до 6–8 °С, а при пасмурном уменьшалась до 0 °С или даже была отрицательной (до $-5,3$ °С 13 августа), т.е. дневные температуры были ниже ночных. Изменения суточной

амплитуды за период наблюдений носили выраженный квазициклический характер (с периодами от 2,4 до 12 сут.) из-за смены синоптических процессов. В целом, суточный ход температуры воздуха в ледниковой зоне определяется как радиационным, так и адвективным (синоптическим) фактором, при этом влияние радиационного фактора на леднике выражено сильнее.

Средняя суточная температура поверхности грунта колебалась от $1,6$ °С (14 августа) до $13,3$ °С (26 июля) и была теснее связана с приходящей коротковолновой радиацией ($r = 0,76$), чем температура воздуха ($r = 0,60$). Абсолютный максимум был зарегистрирован 27 июля ($29,7$ °С), а минимум – 5 августа ($-2,7$ °С). Температура снежного покрова колебалась около 0 °С, а температура подстилающего льда была отрицательной, уменьшаясь с глубиной (в верхнем метровом слое) с градиентом $1,7$ °С/м.

Средняя суточная относительная влажность воздуха была высокой (76%) и изменялась от 41 до 100%, причём различия между мореной и ледником отсутствовали. Наиболее высокая влажность наблюдалась 13.08–22.08 (среднее значение 98%). Максимальная суточная амплитуда относительной влажности (21 июля) достигала 69% на морене и 77% на леднике. Средняя упругость водяного пара в приледниковом слое воздуха составляла 7,6 гПа, что указывает на преобладание конденсации над испарением ($7,6$ гПа > $6,11$ гПа) во влагообмене с ледниковой поверхностью.

Относительная влажность тесно связана с облачностью нижнего яруса ($r = 0,88$). По данным ГМС Чара, в июле–августе среднее значение общей облачности составило 66%, а нижней – 42%, что меньше многолетней нормы.

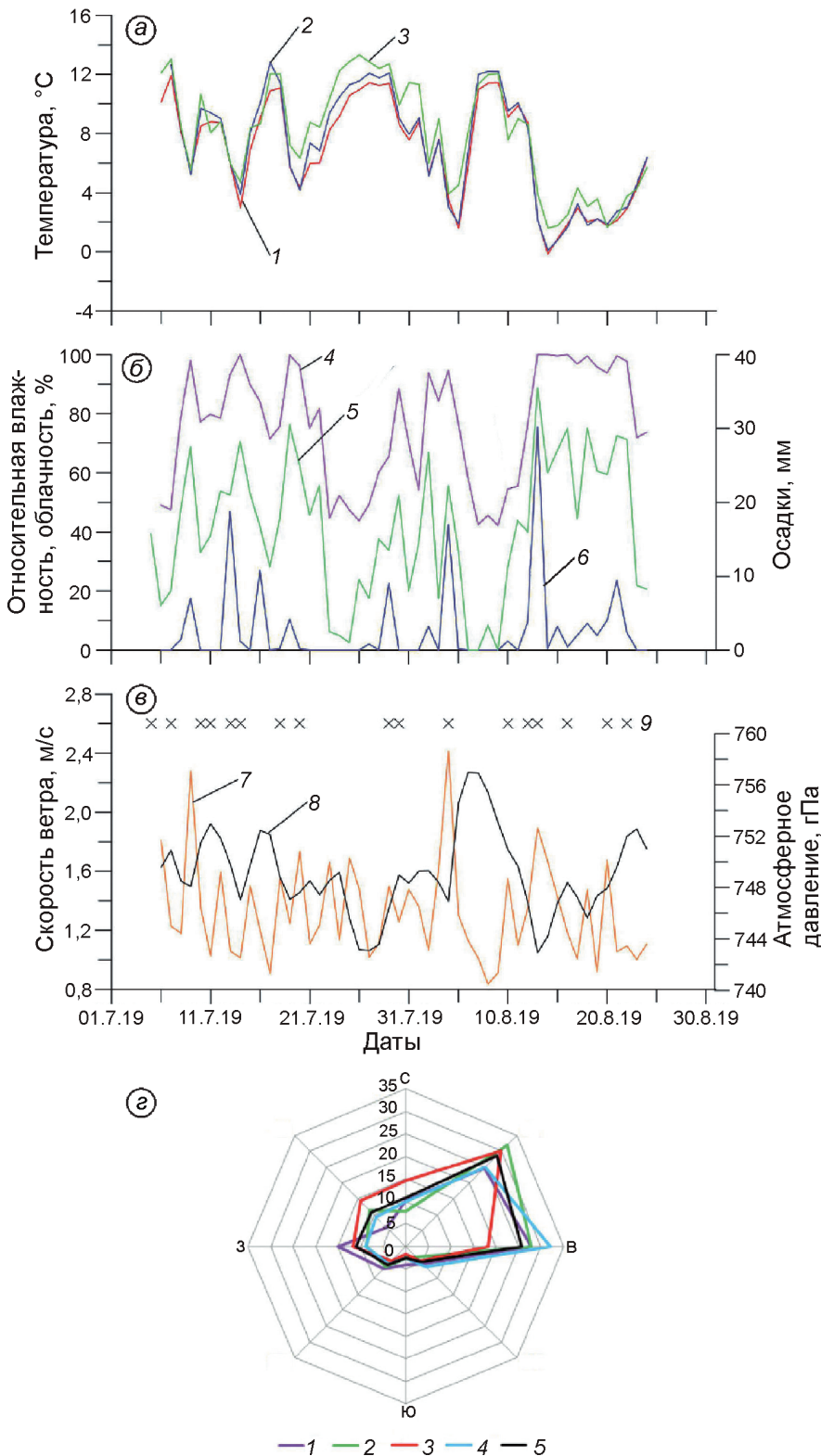


Рис. 2. Средние суточные значения метеорологических параметров в ледниковой зоне в июле–августе 2019 г.:

a – температурный режим (1 – температура воздуха на морене, 2 – температура воздуха на леднике; 3 – температура поверхности грунта); *б* – режим влаги (4 – относительная влажность воздуха на морене, 5 – нижняя облачность в Чаре, 6 – суммы осадков на морене); *в* – барический режим (7 – скорость ветра, 8 – атмосферное давление, 9 – дни с фронтами); *г* – повторяемость (%) основных направлений ветра в различное время суток (1 – ночью, 2 – утром, 3 – днём, 4 – вечером, 5 – в среднем за сутки)

Fig. 2. Mean daily values of the meteorological parameters in glacial zone in July–August 2019:

a – temperature regime (1 – air temperature at moraine and 2 – at glacier, 3 – temperature of ground surface); *б* – moisture regime (4 – relative air humidity at moraine, 5 – low cloudiness at Chara and 6 – precipitation); *в* – baric regime (7 – wind speed, 8 – atmospheric pressure and 9 – days with fronts); *г* – frequency (%) of wind directions at different times of day (1 – at night, 2 – in the morning, 3 – in the afternoon, 4 – in the evening, 5 – on average per day)

Повторяемость ясного (0–2 балла), полуюсного (3–7 баллов) и пасмурного (8–10 баллов) неба по общей облачности составила соответственно 5, 41 и 54%, а по нижней – 20, 55 и 25%. Состо-

яние нижней облачности во многом определяло температурный режим ледниковой зоны: ясные дни (средняя температура 9,8 °C) были гораздо теплее пасмурных (2,8 °C).

За период наблюдений выпало 136 мм осадков (в июле 54 мм, в августе 82 мм), большей частью (85%) в жидком виде. Число дней с осадками составило 50% (в июле 10 дней, в августе 15). Повторяемость дней с осадками высокой интенсивности (> 10 мм/сут) – 8%, а низкой (< 5 мм/сут) – 36%. В течение суток максимальная интенсивность осадков не превышала 0,26 мм/мин. Таким образом, преобладали осадки малой интенсивности. Суммарная (за сутки) продолжительность периода выпадения осадков достигала 12 ч (21 августа). В течение наиболее продолжительного непрерывного периода с осадками (с 12 по 22 августа) выпало 45% их суммы. Суточный максимум осадков (30 мм) отмечен 13 августа. Кроме того, значительные осадки наблюдались 13 июля (19 мм), 4 августа (17 мм) и 16 июля (11 мм). Суточный ход осадков почти не выражен, хотя наибольшее их количество приходилось на ночное время. Сумма осадков на леднике была в 1,8 раз больше, чем на ГМС Чара (коэффициент корреляции между рядами осадков равен 0,77). Данные ГМС Чара относительно хорошо воспроизводили число дней без осадков (96% этого показателя в ледниковой зоне), а также осадки разной интенсивности (от 50% для градации менее 5 мм/сут до 100% для градаций 10–30 и более 30 мм/сут).

Среднее суточное атмосферное давление колебалось в диапазоне от 743 гПа (26–27 июля) до 757 гПа (6–7 августа), а его межсуточные изменения – от –3,9 гПа (12–13 августа) до 7,7 гПа (4–5 августа). Сезонный ход атмосферного давления отражает макромасштабные изменения в нижней тропосфере – смену высотных циклонов и антициклонов (коэффициент корреляции с высотой геопотенциала 700 гПа равен 0,97). В суточном ходе давления прослеживался вечерний максимум (около 21 ч) и утренний минимум (5 ч); средняя суточная амплитуда давления составила 2,4 гПа, а максимальная – 6,6 гПа (4.08).

Средние суточные скорости ветра ($\geq 0,5$ м/с) были относительно небольшими: от 0,8 м/с (8 августа) до 2,4 м/с (4 августа) при среднем значении 1,3 м/с. *Максимальные скорости* менялись от 3,5 до 15,6 м/с. Абсолютный максимум (15,6 м/с) зафиксирован 5 июля в 23 ч 30 мин. Повторяемость максимальной скорости >5 м/с составляла 32%, >10 м/с – 2%, а штиля ($<0,5$ м/с) – 33% (с ночным максимумом). Наи-

большее число суточных максимумов скорости (35%) приходилось на дневное время. Усиление ветра в основном было связано с прохождением атмосферных фронтов. Так, 5, 18 июля и 4 августа максимумы скорости наблюдались при прохождении холодного фронта, 13 августа – тёплого фронта, а 29 июля и 10 августа – фронта окклюзии.

Преобладающими ветрами были северо-восточные и восточные (повторяемость 28 и 26% соответственно), дующие из долины р. Левая Сыгыкта. В течение дня данное распределение сохранялось с небольшими отклонениями. Утром наблюдался максимум повторяемости северо-восточного ветра, а вечером – восточного. Днём увеличивалась частота ветров со стороны ледника (северного и северо-западного), а ночью – из долины р. Олений Рог (западный). Из-за влияния рельефа направления ветра на морене отличались от свободной атмосферы, где преобладали северо-западные и северные ветры (с высотой увеличивалась доля западного и южного направлений).

Для выявления периодической составляющей в метеорологических временных рядах выполнен их спектральный анализ. Функции спектральной плотности (в пределах суточного диапазона) для температуры воздуха, относительной влажности и скорости ветра приведены на рис. 3. Отчётливо выделяется 24-часовая периодичность, обусловленная суточным ходом радиационного баланса. Однако внутрисуточная периодичность выражена довольно слабо, особенно для температуры и влажности. Возможно, это объясняется ослаблением горно-долинной циркуляции в районе ГМС (водораздельная область) или нивелированием внутрисуточных колебаний более мощными синоптическими процессами.

Радиационный режим. Изменения компонентов радиационного баланса ледника показаны на рис. 4, а их значения для морены и ледника, осреднённые за период наблюдений, в табл. 3. Величины и размах колебаний приходящей коротковолновой радиации в обоих пунктах мало отличались ($r = 0,99$). Средние суточные значения коротковолновой радиации на леднике характеризовались значительной изменчивостью (коэффициент вариации 0,57) в пределах 28–323 Вт/м². Максимальные величины колебались от 163 до 1027 Вт/м². Наиболее низкие средние значения (<50 Вт/м²) наблюдались 9 и 13 июля,

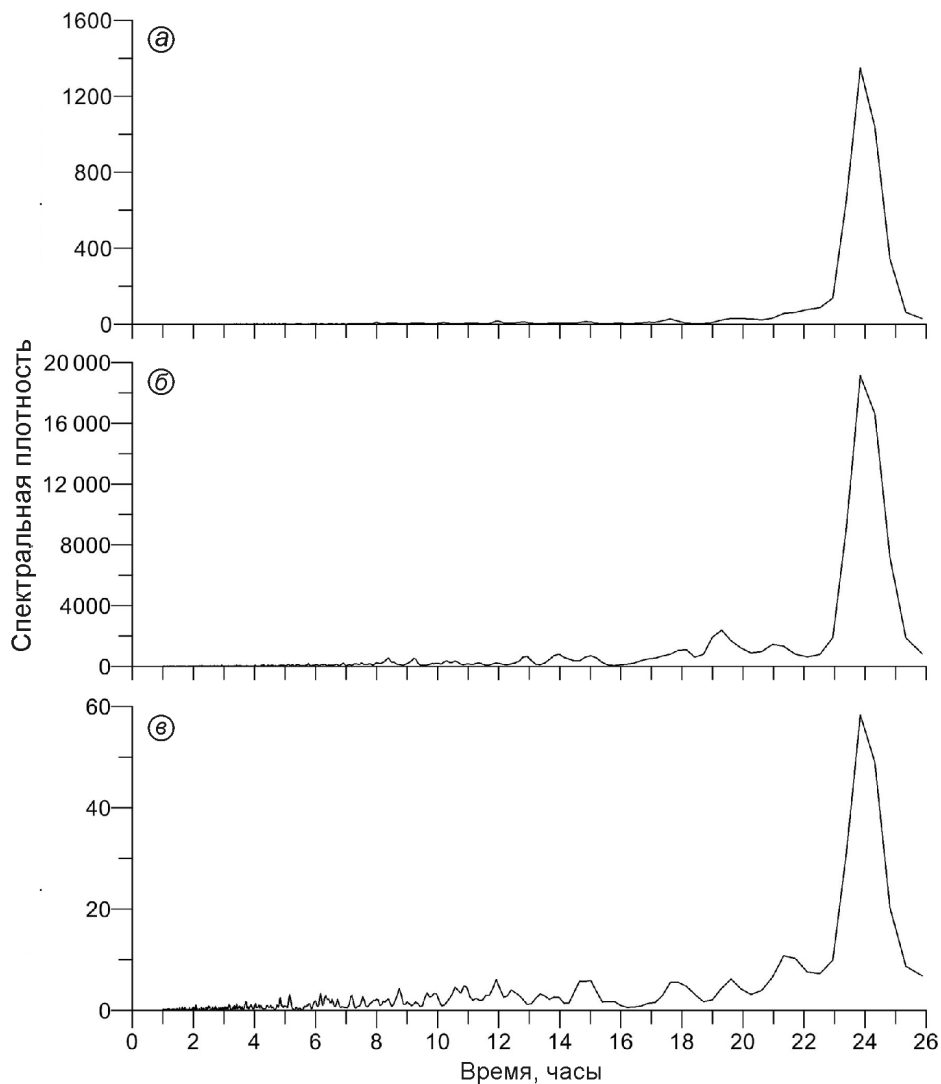


Рис. 3. Функции спектральной плотности для метеорологических показателей, измеренных на морене в июле–августе 2019 г.:

a – температура воздуха; *б* – относительная влажность воздуха; *в* – скорость ветра

Fig. 3. Spectral density functions for meteorological indicators measured on the moraine in July–August 2019:

a – air temperature; *b* – relative air humidity; *v* – wind speed

а также 2, 4 и 16 августа в условиях пасмурной погоды с осадками (см. рис. 2, б). Физическая связь приходящей коротковолновой радиации с облачностью очевидна и подтверждается высокими коэффициентами корреляции: $-0,69$ для общей облачности и $-0,79$ для нижней.

В отличие от приходящей потоки *отражённой радиации* на морене и леднике различались в среднем в 3,6 раза из-за разницы в альбедо (полуденные значения). Если *альбедо морены* было низким и мало менялось, то *альбедо ледника* варьировало в диапазоне $0,10$ – $0,76$, в результате чего ледниковая поверхность поглощала в среднем в

1,6 раз меньше солнечной радиации. В зависимости от характера поверхности в изменении альбедо и поглощённой радиации на леднике можно выделить два периода: а) с 7 июля по 6 августа (снежная поверхность) альбедо линейно уменьшалось ($0,02$ в сутки) в процессе таяния снега и загрязнения, а поглощённая радиация увеличивалась; б) с 7 по 24 августа (ледяная поверхность) альбедо на фоне низких значений (около $0,15$) имело два выраженных пика ($0,42$ и $0,68$), обусловленных летними снегопадами (14–15 и 21 августа). Таким образом, к 7 августа снежный покров в пункте наблюдения полностью раста-

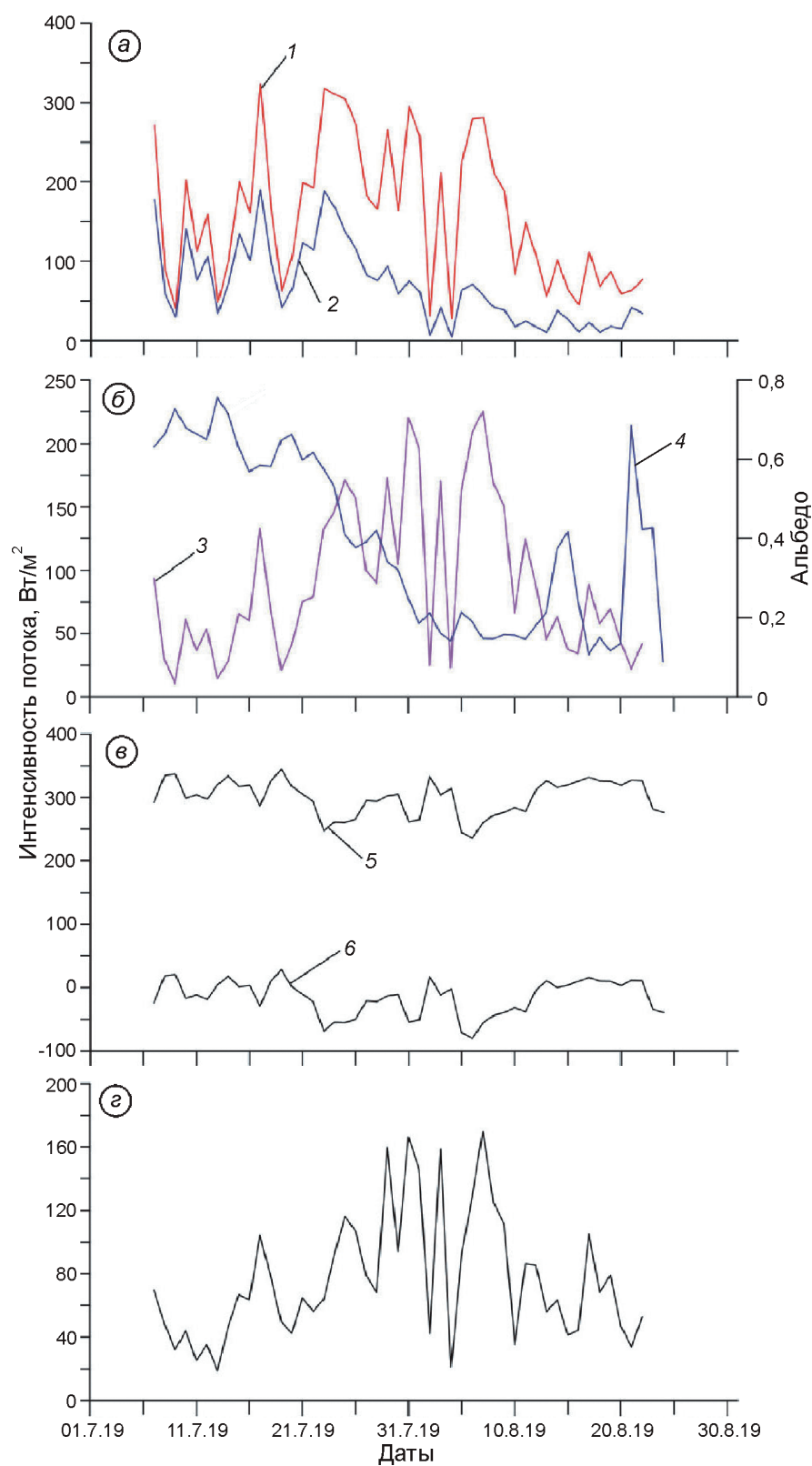


Рис. 4. Средние суточные значения интенсивности потоков радиации на ледниковой поверхности в июле–августе 2019 г.:

a – 1 – входящая и 2 – отражённая коротковолновая радиация; *б* – 3 – поглощённая коротковолновая радиация; 4 – альbedo; *в* – 5 – длинноволновое излучение атмосферы, 6 – баланс длинноволновой радиации; *г* – радиационный баланс

Fig. 4. Daily averaged values of radiation fluxes on the glacial surface in July–August 2019:

a – 1 – incoming and 2 – reflected short-wave radiation; *б* – 3 – absorbed short-wave radiation and 4 – albedo; *в* – 5 – long-wave radiation of the atmosphere, 6 – long-wave radiation balance; *г* – net radiation balance

ял, а выпадавший в августе свежий снег стаял довольно быстро – за 1–2 дня. В дни с летними снегопадами баланс коротковолновой радиации

уменьшался в 2,5 раза: если 15 августа (день со снегопадом) баланс был 41 Вт/м², то 17 августа (после стаявания снега) – 89 Вт/м².

Таблица 3. Средние значения альbedo и составляющих радиационного баланса для поверхностей морены и ледника за период 7.07–22.08.2019 г.

Параметры	Место измерений	
	морена	ледник
Альbedo A , доля ед.	0,11	0,41
Приходящая коротковолновая радиация Q	166/14,3*	160/13,8
Отражённая коротковолновая радиация $Q_{от}$	19/1,6	69/6,0
Баланс коротковолновой радиации B_k	146/12,6	91/7,9
Противоизлучение атмосферы (приходящая длинноволновая радиация) E_a	301/26,0	301/26,0
Собственное длинноволновое излучение подстилающей поверхности E_n	357/30,8	316/27,3
Баланс длинноволновой радиации B_d	–57/–4,9	–15/–1,3
Радиационный баланс B	90/7,8	76/6,6

*В числителе – средняя суточная интенсивность радиации, Вт/м²; в знаменателе – средняя суточная сумма радиации, МДж/м²

Средние суточные значения *приходящей длинноволновой радиации* в отличие от коротковолновой характеризовались незначительными колебаниями (коэффициент вариации 0,09) – в пределах от 236 до 344 Вт/м². В 88% дней они превышали коротковолновую радиацию в среднем в 1,8 раза; наиболее существенные различия наблюдались во второй и третьей декадах августа. Коротковолновая радиация превышала длинноволновую лишь в течение шести ясных (средняя общая облачность 28%, нижняя – 6%) дней: 23–25 июля, 31 июля и 6–7 августа. Осреднённый суточный ход длинноволновой радиации имел выраженный дневной максимум (15–16 ч), среднюю суточную амплитуду 73 Вт/м² и хорошо коррелировал с суточным ходом температуры воздуха ($r = 0,96$), однако в дни с высоким влагосодержанием воздуха (>8 гПа) корреляция была отрицательной. Из-за различий в температуре поверхности длинноволновое излучение морены и ледника кардинально отличались: в среднем излучение морены было на 41 Вт/м² больше. Осреднённый баланс длинноволновой радиации в обоих пунктах был отрицательным, однако на леднике в течение 20 дней (41%) он имел положительные значения (среднее – 11 Вт/м², максимальное – 29 Вт/м²). Прослеживается статистически значимая связь между балансом длинноволновой радиации и нижней облачностью ($r = 0,83$): при облачности более 5 баллов баланс был положительным. В среднем эффективное излучение ледника было в 3,8 раз меньше, чем морены.

Радиационный баланс определялся коротковолновой составляющей ($r = 0,85$). Средние суточные суммы баланса морены и ледника были

положительными и близкими по величине: на морене – 7,8 МДж/м², а на леднике – 6,6 МДж/м². В целом за период с 7 июля по 22 августа радиационный баланс составил ~365 МДж/м² (морена) и ~310 МДж/м² (ледник). Таким образом, несмотря на меньшую величину поглощённой коротковолновой радиации, радиационный баланс ледника и морены был сопоставим (на леднике на 16% меньше) за счёт меньшего эффективного излучения ледниковой поверхности.

Поверхностное таяние и его связь с метеопараметрами. Суточные значения измеренной и рассчитанной скоростей таяния показаны на рис. 5. Средняя скорость составила 29 мм в.э./сут., однако она отличалась сильной изменчивостью в диапазоне от 10 до 67 мм/сут. В июле таяние было более интенсивным, чем в августе (34 и 24 мм/сут. соответственно), однако стратиграфия снежного покрова (см. ранее) показывает, что часть талой воды повторно замерзала (внутреннее питание). Наиболее высокие скорости таяния наблюдались 7 июля (абсолютный максимум), 24–26 июля, а также 6–7 августа. Полное стаивание снежного покрова в пункте измерений датируется 7 августа (кумулятивное таяние к этому времени составило 1050 мм в.э.). После 13 августа абляция находилась на низком уровне (в среднем 13 мм/сут.). Всего за период наблюдений суммарное таяние составило 1381 мм в.э., а средняя величина температурного коэффициента таяния – 4,0 мм/(сут. °С).

Связь скорости таяния с метеорологическими параметрами оценена с помощью корреляционного анализа (табл. 4). Наиболее тесная связь ($|r| = 0,70 \div 0,74$) установлена для относительной влажности, приходящей коротковолновой радиа-

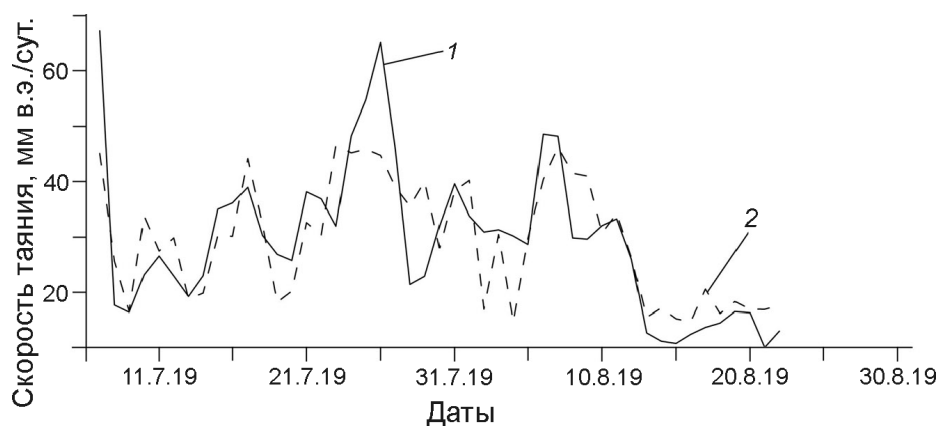


Рис. 5. Суточное таяние M на леднике в месте установки автоматической метеостанции:

1 – измеренное и 2 – рассчитанное с помощью линейной регрессионной модели, включающей в себя среднюю температуру $T_{\text{ср}}$, относительную влажность воздуха R и приходящую коротковолновую радиацию Q ($M = 0,56T_{\text{ср}} - 0,21R + 0,06Q + 31,85$)

Fig. 5. Daily glacier melt M at the location of automatic weather station:

1 – measured and 2 – calculated using a linear regression model that includes mean air temperature $T_{\text{ср}}$, relative humidity R and incoming short-wave radiation Q ($M = 0,56T_{\text{ср}} - 0,21R + 0,06Q + 31,85$)

ции, температуры поверхности грунта, нижней облачности и максимальной температуры воздуха. Коротковолновая радиация, как прямо, так и косвенно через облачность, в значительной степени регулировала интенсивность таяния. Вероятно, влиянием облачности объясняется более сильная корреляция таяния с относительной влажностью, а не с температурой. Сильная положительная связь с температурой поверхности грунта и максимальной температурой воздуха также указывает на ведущую роль солнечной радиации в таянии ледника. Большой вклад солнечной радиации в таяние подтверждается тем, что коэффициент корреляции абляции с балансом коротковолновой радиации выше, чем с радиационным балансом. Характер связи таяния с температурой и поглощённой коротковолновой радиацией существенно меняется в зависимости от взаимного сочетания этих двух факторов: наиболее сильная связь с солнечной радиацией фиксировалась в диапазоне температур 5–10 °C ($r = 0,72$); наиболее сильная связь с температурой наблюдалась при радиации менее 75 Вт/м² ($r = 0,72$). На характер связи таяния с температурой сильно влияет нижняя облачность: с увеличением облачности коэффициент корреляции увеличивается (в ясные дни $r = 0,29$, в пасмурные $r = 0,99$). Отметим, что использование температуры воздуха в качестве единственного предиктора таяния объясняет лишь 46% его дисперсии (со стандартной ошибкой 34% средней суточной абляции).

Для статистической оценки связи скорости таяния с комбинацией нескольких метеорологических параметров мы использовали метод множественной линейной регрессии. Связи с двумя или тремя параметрами характеризуются более высокими коэффициентами корреляции ($> 0,7$), чем с одним. Наиболее сильная трёхфакторная связь ($r = 0,78$) установлена для комбинации температуры, относительной влажности и приходящей коротковолновой радиации (см. табл. 4 и рис. 5). При этом анализ частных корреляций показал, что коротковолновая радиация сильнее двух других параметров влияет на изменения абляции. Данная модель объясняет 62% общей дисперсии абляции (стандартная ошибка 30% суточного таяния), хорошо воспроизводит среднее значение, но гораздо хуже – положительные аномалии (> 60 мм/сут.) и значения в диапазоне 20–30 мм/сут.

Обсуждение результатов

Анализ метеорологических данных позволил установить ведущую роль радиационного баланса в формировании суточного хода температуры и относительной влажности воздуха, а также скорости ветра в ледниковой зоне. Однако синоптические процессы часто нарушали естественный суточный ход и были причиной непериодических (или квазипериодических) колебаний метеопараметров в сезонном ходе. Частая

Таблица 4. Коэффициенты корреляции r ледниковой абляции с метеорологическими параметрами (средние суточные данные)

Параметры	r	Сочетание параметров	r
Относительная влажность R	-0,74	$Q + R + T_{\text{cp}}$	0,78
Приходящая коротковолновая радиация Q , температура поверхности грунта $T_{\text{гр0}}$	0,73	$R + Q$	0,78
Нижняя облачность (по данным ГМС Чара) $C_{\text{ниж}}$	-0,70	$Q + T_{\text{cp}}$	0,77
Максимальная суточная температура воздуха $T_{\text{макс}}$	0,70	$R + T_{\text{cp}}$	0,75
Средняя суточная температура воздуха T_{cp}	0,68	$Q + E_a$	0,74
Противоизлучение атмосферы (приходящая длинноволновая радиация E_a , баланс длинноволновой радиации B_d)	-0,64	$C_{\text{общ}} + T_{\text{cp}}$	0,74
Баланс коротковолновой радиации B_k	0,59	$T_{\text{cp}} + B_k$	0,73
Общая облачность (по данным ГМС Чара) $C_{\text{общ}}$	-0,52	$T_{\text{cp}} + B$	0,70
Радиационный баланс B	0,44	$T_{\text{cp}} + P$	0,69
Осадки P	-0,33	$B_d + B_k$	0,65

*Все коэффициенты корреляции значимые на уровне 95%. Параметры множественной линейной регрессии указаны в порядке уменьшения их относительного вклада в абляцию, который был рассчитан на основе частных коэффициентов корреляции.

смена воздушных масс объясняется сложным сочетанием циркуляционных процессов в нижней тропосфере над Кодаром, расположенным на границе Атлантического и Тихоокеанского влагораздела. В работе [22] показано, что на фоне ослабленного западного переноса летний период на Кодаре характеризуется как ультраполярными вторжениями, так и адвекциями тропического воздуха в тёплых секторах циклонов, приходящих из Монголии и Дальнего Востока. Так, выявленные квазициклические колебания температуры воздуха (с периодом в несколько суток) отражают последовательную смену высотных циклонических и антициклонических процессов.

Полученные данные о составляющих радиационного баланса кодарского ледника проясняют природу его таяния. В приходной части радиационного баланса ледника доля коротковолновой радиации составляла 35%, а длинноволновой – 65% (см. табл. 3). В абсолютных цифрах средняя интенсивность приходящей на ледник коротковолновой радиации в июле–августе 2019 г. равна 165 Вт/м^2 (в пиковых значениях достигала 1114 Вт/м^2). Эта величина хорошо согласуется с данными из субарктических районов Евразии ($< 200 \text{ Вт/м}^2$), которые характеризуются преобладанием пасмурной погоды летом: Ян-Майен [23], Южная Норвегия [24], Полярный Урал [25], Сунтар-Хаята [25]. Однако она несколько ниже, чем на ледниках умеренного пояса и южного горного обрамления ($200\text{--}300 \text{ Вт/м}^2$): Альпы [26], Монгольский Алтай [27]), Кавказ [12, 28]. Отметим, что даже в южных регионах средние значения

коротковолновой радиации в отдельные месяцы могут быть меньше 150 Вт/м^2 , как это наблюдалось на леднике Джанкуат в июле–августе 2017 г. [28]. На наш взгляд, относительно низкие значения солнечной радиации на Кодаре объясняются значительной облачностью, что подтверждается сильной отрицательной корреляцией коротковолновой радиации с облачностью и относительной влажностью ($|r| > 0,7$).

Районирование режима облачности над Сибирью [29] показало, что Забайкалье летом характеризуется повышенным средним баллом облачности (7,0), что, очевидно, связано с сезонной активизацией циклогенеза [22]. Повышенные значения относительной влажности (70%) над северным Забайкальем хорошо видны на климатических картах. Кроме того, уменьшение потока солнечной радиации может быть следствием снижения прозрачности атмосферы из-за лесных пожаров. Лето 2019 г. в районе исследования отличалось большим числом таких пожаров: по данным ГМС Чара в июле–августе дымка от лесных пожаров наблюдалась в течение 25 дней (40%). Количественная оценка отмеченных факторов должна стать предметом дополнительного изучения на основе анализа более длинных временных рядов. Ледниковая поверхность получала тепло в виде поглощённой коротковолновой радиации (91 Вт/м^2), которая регулировалась альбедо. В свою очередь альбедо изменялось в двух режимах в зависимости от наличия или отсутствия снежного покрова на леднике, что, возможно, специфично для

кодарских ледников с невысокой долей ($< 0,55$) области аккумуляции [17]. Летние снегопады в области абляции кодарских ледников могут уменьшать поглощённую радиацию в 2,5 раза.

В отличие от коротковолнового, длинноволновый баланс относился к расходной части радиационного баланса (-15 Вт/м^2). Поток приходящей длинноволновой радиации был больше коротковолнового в среднем в 1,9 раза, но её влияние нивелировалось постоянно высоким излучением ледниковой поверхности. Близкие соотношения между коротко- и длинноволновыми потоками получены на ледниках в районах с высоким баллом облачности, например в Южной Норвегии [24]. В пасмурную погоду длинноволновый баланс Сыгыктинского ледника был слабopоложительным (до 29 Вт/м^2). Уменьшение потерь тепла ледниковой поверхностью в пасмурные дни согласуется с выводами, полученными ранее на других ледниках, например на леднике Марух на Кавказе [25]. Однако, учитывая невысокие положительные значения длинноволнового баланса, его влияние на таяние было незначительным (17% средней абляции).

Отношение величины измеренного радиационного баланса к тепловому эквиваленту таяния ($29 \text{ мм} \sim 72 \text{ Вт/м}^2$ при средней плотности фирна 650 кг/м^3), близкое к единице, предполагает, что почти всё радиационное тепло затрачивалось на таяние. Радиационный баланс Сыгыктинского ледника (как и большинства других ледников Земли) был основным источником энергии для таяния и определялся, прежде всего, балансом коротковолновой радиации. Этот вывод согласуется с количественными оценками составляющих теплового баланса на ледниках Внутренней Азии – Монгольском Алтае [27], Наньшане [9] и Восточном Саяне [13], где на таяние уходит 92–94% радиационного тепла. При этом в приходной части их теплового баланса на долю поглощённой коротковолновой радиации приходится 83–96%, а на поток явного тепла – 4–10%. Наличие круглосуточной температурной инверсии в приледниковом слое воздуха [25, 30] подразумевает положительный вклад турбулентного тепла в тепловой баланс, особенно при высоких скоростях ветра. Основываясь на результатах данного исследования, можно предположить, что скрытое тепло конденсации также является положительным членом теплового баланса.

Доминирующий вклад радиационной составляющей в абляцию объясняет важную роль таких факторов, как облачность, относительная влажность, орография, содержание аэрозолей и водяного пара в атмосфере, которые прямо или косвенно контролируют поступление солнечной радиации, хотя ранее они почти не учитывались при исследовании сибирских ледников. Вероятно, более интенсивное сокращение кодарских ледников южной экспозиции с конца малого ледникового периода [17] объясняется различиями в балансе коротковолновой радиации. Кроме того, основываясь на полученных результатах, можно предположить, что ускоренное таяние ледников Кодара в конце XX в. [1–4] было обусловлено не столько ростом летней температуры, сколько увеличением приходящей солнечной радиации, например, в результате уменьшения облачности при изменении режима атмосферной циркуляции.

Заключение

В июле–августе 2019 г. в ледниковой зоне хр. Кодар (Сыгыктинский ледник) с помощью автоматической системы мониторинга впервые были проведены непрерывные измерения метеорологических и радиационных характеристик с высоким разрешением. В рядах температуры, относительной влажности и скорости ветра выявлены 24-часовая периодичность и непериодические колебания, обусловленные синоптическими процессами. В сезонном ходе температуры обнаружены квазициклические колебания, связанные с крупномасштабными атмосферными процессами в нижней тропосфере. Приходящая коротковолновая радиация характеризовалась значительной изменчивостью, тесной отрицательной связью с облачностью и была близка по величине к субарктическим ледниковым районам. Коротковолновый баланс ледника в значительной степени регулировался альбедо и в дни с летними снегопадами уменьшался в 2,5 раза. Потеря тепла происходила за счёт эффективного излучения, однако при пасмурной погоде длинноволновый баланс был положительным. Баланс коротковолновой радиации вносил основной энергетический вклад в таяние, что согласуется с оценками, полученными на ледниках Внутренней Азии (Наньшань, Монгольский Алтай, Восточный

Саян). Статистический анализ позволил установить тесные связи абляции с относительной влажностью, приходящей коротковолновой радиацией и нижней облачностью. Эти факторы необходимо учитывать при построении гляциоклиматических моделей. Влияние радиационного фактора на скорость таяния объясняет более интенсивное сокращение кодарских ледников южной экспозиции с конца малого ледникового периода и их ускоренное таяние в конце XX – начале XXI в.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-05-00668), а

также проектов НИР № 0345-2019-0006 (AAAA-A16-116122110063-0) и № 0347-2019-0003 (AAAA-A17-117041910172-4). Авторы выражают искреннюю благодарность двум анонимным рецензентам за их ценные замечания к первоначальному варианту рукописи.

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant № 19-05-00668) and by the research projects № 0345-2019-0006 (AAAA-A16-116122110063-0) and № 0347-2019-0003 (AAAA-A17-117041910172-4). Authors thank two anonymous reviewers for valuable comments on the original manuscript.

Литература

1. Osipov E.Y., Osipova O.P. Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age // *Annals of Glaciology*. 2014. V. 55. P. 167–176. doi: 10.3189/2014AoG66A135.
2. Осипов Э.Ю., Осипова О.П. Динамика оледенения в горах юга Восточной Сибири за последние 160 лет // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 2. С. 33–41. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-33-41.
3. Stokes C., Shahgedanova M., Evans I., Popovnin V. Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia // *Global and Planetary Change*. 2013. V. 101. P. 82–96. doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.12.010.
4. Osipov E.Y., Osipova O.P. Glaciers of the Levaya Sygykta River watershed, Kodar Ridge, southeastern Siberia, Russia: modern morphology, climate conditions and changes over the past decades // *Environment Earth Sciences*. 2015. V. 74. № 3. P. 1969–1984. doi: 10.1007/s12665-015-4352-4.
5. Shahgedanova M., Popovnin V., Aleynikov A., Stokes C. Geodetic mass balance of Azarova glacier, Kodar mountains, eastern Siberia, and its links to observed and projected climatic change // *Annals of Glaciology*. 2011. V. 52. P. 129–137. doi: 10.3189/172756411797252275.
6. Осипова О.П., Осипов Э.Ю. Особенности циркуляционного режима над хребтом Кодар в период абляции ледников // *География и прир. ресурсы*. 2014. № 1. С. 118–123.
7. Mölg T., Hardy D.R. Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro // *Journ. of Geophys. Research*. 2004. V. 109. P. D16104. doi: 10.1029/2003JD004338.
8. Giesen R.H., van den Broeke M.R., Oerlemans J., Andreasen L.M. Surface energy balance in the ablation zone of Midtdalsbreen, a glacier in southern Norway: Interannual variability and the effect of clouds // *Journ. of Geophys. Research*. 2008. V. 113. P. D21111. doi: 10.1029/2008JD010390.

References

1. Osipov E.Y., Osipova O.P. Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age. *Annals of Glaciology*. 2014, 55 (66): 167–176. doi: 10.3189/2014AoG66A135.
2. Osipov E.Y., Osipova O.P. Dynamics of glaciation in the South East Siberia mountains over the past 160 years. *Led i Sneg*. Ice and snow. 2015, 55 (2): 33–41. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-33-41. [In Russian].
3. Stokes C., Shahgedanova M., Evans I., Popovnin V. Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia. *Global and Planetary Change*. 2013, 101: 82–96. doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.12.010.
4. Osipov E.Y., Osipova O.P. Glaciers of the Levaya Sygykta River watershed, Kodar Ridge, southeastern Siberia, Russia: modern morphology, climate conditions and changes over the past decades. *Environment Earth Sciences*. 2015, 74 (3): 1969–1984. doi: 10.1007/s12665-015-4352-4.
5. Shahgedanova M., Popovnin V., Aleynikov A., Stokes C. Geodetic mass balance of Azarova glacier, Kodar mountains, eastern Siberia, and its links to observed and projected climatic change. *Annals of Glaciology*. 2011, 52: 129–137. doi: 10.3189/172756411797252275.
6. Osipova O.P., Osipov E.Yu. Characteristics of the circulation regime over Kodar range during the glacier ablation period. *Geography and Natural Resources*. 2014, 35: 77–81. doi: 10.1134/S1875372814010119.
7. Mölg T., Hardy D.R. Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. *Journ. of Geophys. Research*. 2004, 109: D16104. doi: 10.1029/2003JD004338.
8. Giesen R.H., van den Broeke M.R., Oerlemans J., Andreasen L.M. Surface energy balance in the ablation zone of Midtdalsbreen, a glacier in southern Norway: Interannual variability and the effect of clouds. *Journ. of Geophys. Research*. 2008, 113: D21111. doi: 10.1029/2008JD010390.

9. Sun W., Qin X., Du W., Liu W., Liu Y., Zhang T., Xu Y., Zhao Q., Wu J., Ren J. Ablation modeling and surface energy budget in the ablation zone of Laohugou glacier No. 12, western Qilian mountains, China // *Annals of Glaciology*. 2014. V. 55. P. 111–120. doi: 10.3189/2014AoG66A902.
10. Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 1. С. 5–19. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-5-19.
11. Торопов П.А., Шестакова А.А., Смирнов А.М., Поповнин В.В. Оценка компонентов теплового баланса ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) в период абляции в 2007–2015 годах // *Криосфера Земли*. 2018. Т. 22. № 4. С. 42–54. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(42-54).
12. Торопов П.А., Шестакова А.А., Полиухов А.А., Семенова А.А., Михаленко В.Н. Особенности летнего метеорологического режима Западного плато Эльбруса // *Лёд и Снег*. 2020. Т. 60. № 1. С. 58–76. doi: 10.31857/S2076673420010023.
13. Osipova O.P., Osipov E.Y. Meteorological regime of the glacier No. 18 (the Peak Topografov massiv, East Sayan range) // *IOP Conf. Ser. Earth Environment Sciences*. 2019. V. 381. P. 12071. doi: 10.1088/1755-1315/381/1/012071.
14. Преображенский В.С. Кодарский ледниковый район (Забайкалье). М.: Изд-во АН СССР, 1960. 73 с.
15. Каталог ледников СССР. Т. 17. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 43 с.
16. Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Голобокова Л.П. Оценка современного состояния южного Сыгыктинского ледника – одного из крупнейших ледников хр. Кодар // *Лёд и Снег*. 2012. № 2 (118). С. 51–58. doi: 10.15356/2076-6734-2012-2-51-58.
17. Osipov E.Y., Osipova O.P. Reconstruction of the Little Ice Age glaciers and equilibrium line altitudes in the Kodar Range, southeast Siberia // *Quaternary International*. 2019. V. 524. P. 102–114. doi: 10.1016/j.quaint.2018.11.033.
18. Osipov E.Y. Distribution and chemical composition of snow cover of the Sygyktinsky glacier (Kodar Ridge, south eastern Siberia) // *Limnology and Freshwater Biology*. 2020. V. 4. № 1. P. 562–563. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-562.
19. Carturan L., Cazorzi F., Dalla Fontana G., Zanoner T. Automatic measurement of glacier ice ablation using thermistor strings // *Journ. of Glaciology*. 2019. V. 65. (250). P. 188–194. doi: 10.1017/jog.2018.103.
20. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 1996. V. 77. P. 437–471. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
9. Sun W., Qin X., Du W., Liu W., Liu Y., Zhang T., Xu Y., Zhao Q., Wu J., Ren J. Ablation modeling and surface energy budget in the ablation zone of Laohugou glacier No. 12, western Qilian mountains, China. *Annals of Glaciology*. 2014, 55: 111–120. doi: 10.3189/2014AoG66A902.
10. Toropov P.A., Mikhailenko V.N., Kutuzov S.S., Morozova P.A., Shestakova A.A. Temperature and radiation regime of glaciers on slopes of the Mount Elbrus in the ablation period over last 65 years. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (1): 5–19. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-5-19. [In Russian].
11. Toropov P.A., Shestakova A.A., Smirnov A.M., Popovnin V.V. Evaluation of the components of the heat balance of the Djankuat glacier (Central Caucasus) during the period of ablation in 2007–2015. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2018, 22 (4): 42–54. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(42-54). [In Russian].
12. Toropov P.A., Shestakova A.A., Poliukhov A.A., Semenova A.A., Mikhailenko V.N. Character of the summer meteorological regime on the Western plateau of Elbrus (the Caucasus). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (1): 58–76. doi: 10.31857/S2076673420010023. [In Russian].
13. Osipova O.P., Osipov E.Y. Meteorological regime of the glacier No. 18 (the Peak Topografov massiv, East Sayan range). *IOP Conf. Ser. Earth Environment Sciences*. 2019, 381: 12071. doi: 10.1088/1755-1315/381/1/012071.
14. Preobrazhenskiy V.S. Kodarskiy lednikovyj rajon (Zabajkal'e). Kodar glacial area (Transbaykalia). Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1960: 73 p. [In Russian].
15. Katalog lednikov SSSR. USSR Glacier Inventory. V. 17. Is. 2. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1972: 43 p. [In Russian].
16. Osipov E.Y., Osipova O.P., Golobokova L.P. Assessment of the current state of South Sygyktinsky Glacier – one of the largest glaciers of Kodar Range. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 2 (118): 51–58. doi: 10.15356/2076-6734-2012-2-51-58. [In Russian].
17. Osipov E.Y., Osipova O.P. Reconstruction of the Little Ice Age glaciers and equilibrium line altitudes in the Kodar Range, southeast Siberia. *Quaternary International*. 2019, 524: 102–114. doi: 10.1016/j.quaint.2018.11.033.
18. Osipov E.Y. Distribution and chemical composition of snow cover of the Sygyktinsky glacier (Kodar Ridge, south eastern Siberia). *Limnology and Freshwater Biology*. 2020, 4 (1): 562–563. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-562.
19. Carturan L., Cazorzi F., Dalla Fontana G., Zanoner T. Automatic measurement of glacier ice ablation using thermistor strings. *Journ. of Glaciology*. 2019, 65 (250): 188–194. doi: 10.1017/jog.2018.103.
20. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteorol. Society*. 1996, 77: 437–471. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
21. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G.,

21. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q.J.R. Meteorol. Society*. 2011. V. 137. P. 553–597. doi: 10.1002/qj.828.
22. *Осипова О.П., Осипов Э.Ю.* Циркуляционные процессы в атмосфере и режим осадков в северной части Байкальской горной области // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 10. С. 87–98.
23. *Hulth J., Rolstad C., Trondsen K., Rødby R.W.* Surface mass and energy balance of Sørbreen, Jan Mayen, 2008 // *Annals of Glaciology*. 2010. V. 51 (55). P. 110–119. doi: 10.3189/172756410791392754.
24. *Andreassen L., Van Den Broeke M., Giesen R., Oerlemans J.* A 5 year record of surface energy and mass balance from the ablation zone of Storbreen, Norway // *Journ. of Glaciology*. 2008. V. 54 (185). P. 245–258. doi: 10.3189/002214308784886199.
25. *Волошина А.П.* Метеорология горных ледников // *МГИ*. 2002. № 92. С. 3–148.
26. *Six D., Wagnon P., Sicart J., Vincent C.* Meteorological controls on snow and ice ablation for two contrasting months on Glacier de Saint-Sorlin, France // *Annals of Glaciology*. 2009. V. 50 (50). P. 66–72. doi: 10.3189/172756409787769537.
27. *Konya K., Kadota T., Davaa G., Yabuki H., Ohata T.* Meteorological and ablation features of Potanin Glacier, Mongolian Altai // *Bull. of Glaciol. Research*. 2010. V. 28. P. 7–16. doi: 10.5331/bgr.28.7.
28. *Rets E.P., Popovnin V.V., Toropov P.A., Smirnov A.M., Tokarev I.V., Chizhova J.N., Budantseva N.A., Vasil'chuk Y.K., Kireeva M.B., Ekaykin A.A., Veres A.N., Aleynikov A.A., Frolova N.L., Tsyplenkov A.S., Poliukhov A.A., Chalov S.R., Aleshina M.A., Kornilova E.D.* Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: a database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2019. V. 11. P. 1463–1481. doi: 10.5194/essd-11-1463-2019.
29. *Комаров В.С., Нахтигалова Д.П., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я.* Климатическое районирование территории Сибири по режиму общей и нижней облачности как основа для построения локальных облачных моделей атмосферы. Ч. 2. Результаты климатического районирования // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27 (10). С. 899–905.
30. *Дроздов О.А., Мосолова Г.И.* Интенсивность таяния снега, фирна и льда в горах в зависимости от температуры и солнечной радиации // *Тр. ГГО*. 1970. Вып. 263. С. 58–71.
- Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Society*. 2011, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828.
22. *Osipova O.P., Osipov E.Y.* Atmospheric Circulation Processes and Precipitation Regime in the Northern Part of the Baikal Mountain Region. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019, 44 (10): 695–703. doi: 10.3103/S106837391910008X.
23. *Hulth J., Rolstad C., Trondsen K., Rødby R.W.* Surface mass and energy balance of Sørbreen, Jan Mayen, 2008. *Annals of Glaciology*. 2010, 51 (55): 110–119. doi: 10.3189/172756410791392754.
24. *Andreassen L., Van Den Broeke M., Giesen R., Oerlemans J.* A 5 year record of surface energy and mass balance from the ablation zone of Storbreen, Norway. *Journ. of Glaciology*. 2008, 54 (185): 245–258. doi: 10.3189/002214308784886199.
25. *Voloshina A.P.* Meteorology of mountain glaciers. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2002, 92: 3–148. [In Russian].
26. *Six D., Wagnon P., Sicart J., Vincent C.* Meteorological controls on snow and ice ablation for two contrasting months on Glacier de Saint-Sorlin, France. *Annals of Glaciology*. 2009, 50 (50): 66–72. doi: 10.3189/172756409787769537.
27. *Konya K., Kadota T., Davaa G., Yabuki H., Ohata T.* Meteorological and ablation features of Potanin Glacier, Mongolian Altai. *Bull. of Glaciol. Research*. 2010, 28: 7–16. doi: 10.5331/bgr.28.7.
28. *Rets E.P., Popovnin V.V., Toropov P.A., Smirnov A.M., Tokarev I.V., Chizhova J.N., Budantseva N.A., Vasil'chuk Y.K., Kireeva M.B., Ekaykin A.A., Veres A.N., Aleynikov A.A., Frolova N.L., Tsyplenkov A.S., Poliukhov A.A., Chalov S.R., Aleshina M.A., Kornilova E.D.* Djankuat glacier station in the North Caucasus, Russia: a database of glaciological, hydrological, and meteorological observations and stable isotope sampling results during 2007–2017. *Earth Syst. Sci. Data*. 2019, 11: 1463–1481. doi: 10.5194/essd-11-1463-2019.
29. *Komarov V.S., Nakhtigalova D.P., Ilin S.N., Lavrinenko A.V., Lomakina N.Ya.* Climatic zoning of the Siberia territory according to the total and lower cloudiness conditions as a basis for construction of local cloud atmosphere models. Part 2. The results of climatic zoning. *Optika Atmosfery i Okeana*. Atmospheric and Oceanic Optics Journal. 2014, 27 (10): 899–905. [In Russian].
30. *Drozhdov O.A., Mosolova G.I.* The intensity of melting of snow, firn and ice in the mountains depending on temperature and solar radiation. *Trudy Glavnoy Geofizicheskoy Observatorii*. Proc. of the Main Geophysical Observatory. 1970, 263: 58–71. [In Russian].