

Modelling of melt using simple and enhanced temperature-index models: testing for the Sygyktinsky Glacier, the Kodar Range (northern Transbaikalia, Russia)

Osipov E.Yu.^{1*}, Osipova O.P.^{1,2}

¹ Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk, 664033, Russia

² V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya Str., 1, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. Modelling snow and ice melt in drainage basins can significantly improve the forecasting of hydrological processes at local and regional scales. Melt rates on the surface of the Sygyktinsky Glacier were measured using an ultrasonic ranger and calculated by the physically based surface energy-balance (SEB) model with a 30-minute resolution for the period from 7 July to 23 August 2021. Two temperature-index models, simple (TM) and enhanced (ETM), were tested to calculate melt rates. All models used 30-minute meteorological data from automatic weather station installed in the central part of the glacier at the mean equilibrium line altitude (2561 m a.s.l.). The performance of the temperature-index models was assessed by comparing 30-minute melt rates with the physically based SEB model. The TM model used air temperature as a predictor, explaining up to 30% of the variability of melt rates. Meanwhile, the ETM model, taking into account incoming shortwave radiation and albedo besides air temperature, demonstrated significantly better performance. The model explained up to 90% of variance in the 30-minute melt rates. The advantages of the enhanced model can be used for future studies of spatial variability of melt rates on the Kodar glaciers.

Keywords: Kodar Range, Sygyktinsky Glacier, melt, surface energy balance, T-index model, shortwave radiation, albedo

For citation: Osipov E.Yu., Osipova O.P. Modelling of melt using simple and enhanced temperature-index models: testing for the Sygyktinsky Glacier, the Kodar Range (northern Transbaikalia, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 5. - P. 1158-1177. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-5-1158](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-5-1158)

1. Introduction

The glaciers of the Kodar Range (northern Transbaikalia) located in a remote area of northern Eurasia are highly sensitive to modern climate change. Remote sensing studies have shown that these glaciers had higher rates of shrinkage than elsewhere in Eastern Siberia (Osipov and Osipova, 2014). Since the end of the Little Ice Age (mid-19th century) to 2011, the Kodar glaciers have shrunk by an average of 62%. Moreover, as has been established by various studies, the highest rates of ice reduction were observed in the late 20th and early 21st centuries (Stokes et al., 2013; Osipov and Osipova, 2015). Accelerated glacier melt is mainly associated with increasing summer temperatures in the region (Stokes et al., 2013) and changes in synoptic conditions (Osipova and Osipov, 2022; Osipova

and Osipov, 2023). To understand the physical processes controlling the melting rates on the Sygyktinsky Glacier, one of the largest Kodar glaciers, the surface energy balance was computed using data collected by the automatic weather station with high temporal resolution (30 min) during the 2019 and 2020 melt seasons (Osipov et al., 2021; Osipov and Osipova, 2021). These studies showed that the largest contribution to ice melt comes from net radiation (86-95%), mainly due to net shortwave radiation (Osipov and Osipova, 2021; Osipov and Osipova, 2024). The energy balance model most accurately describes melt changes with high resolution and can be considered as a reference when performing other model assessments.

However, when extrapolating melt rates from the point to the glacier-wide scale or neighboring glaciers, it is inevitable to use simplified modelling approaches

*Corresponding author.

E-mail address: eduard@lin.irk.ru (E.Yu. Osipov)

Received: August 20, 2025; **Accepted:** October 03, 2025;

Available online: October 31, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



based on parameterization. The simplest models link melt to air temperature based on a linear relationship between these quantities (temperature-index or T-index models). They are widely used for assessment of glacier summer balances in various regions (Braithwaite, 1981; Hock, 2003). Testing of the simple T-index model for the Sygyktinsky Glacier showed that it well reproduce the mean and total seasonal ablation, but daily variability is modelled with a significant error (Osipov and Osipova, 2024). At the same time, the use of empirical melt coefficients calibrated separately for snow and ice improves the model accuracy. This indicates the influence of solar radiation gained by the glacier surface on the accuracy of temperature-index models (via albedo). Solar (shortwave) radiation is the main energy balance component of melting for most glaciers (Osipov and Osipova, 2021) and therefore it is used to improve simple temperature models (Hock, 1999; Pellicciotti et al., 2005).

The main objective of this study was to compare the performance of two temperature-index models for estimating ablation on the Sygyktinsky Glacier (Kodar Range). The first model uses only air temperature as input (simple model), while the second uses temperature and solar radiation as additional parameters (enhanced model). Both models were compared with melt rates computed by the physically based surface energy balance (SEB) model which used direct meteorological measurements on the Sygyktinsky glacier. High-resolution (30-minute) data were collected during the melt season (July-August) of 2021 using the automatic weather station.

2. Study area

Sygyktinsky Glacier is one of the largest glaciers in the Kodar Range (Fig. 1). It is the only transection glacier located in two river basins, Levaya Sygykta and Syulban. Accordingly, the glacier consists of two branches, southern and eastern. The area of the glacier is 0.83 km², the length is 2.1 km. The glacier ranges in elevation from 2300 to 2800 m above sea level (a.s.l.). The long-term average equilibrium line altitude of the glacier is 2510 m a.s.l. (Osipov and Osipova, 2019). Since July 2019, annual glaciological and meteorological observations were carried out on the glacier (Osipov et al., 2021).

3. Measurements on the glacier

3.1. Meteorological measurements

High-resolution meteorological data were used to calculate the surface energy balance and evaluate the T-index model parameters. In early July 2021, two automatic weather stations, WS1 and WS2, were installed 20 meters apart in the middle part of the glacier at an elevation of 2561 m a.s.l. (near the long-term average equilibrium line) (Fig. 1). WS1 measured air temperature and relative humidity, incoming and reflected shortwave radiation, and lowering of the glacier surface with using an ultrasonic ranger). The sensors were mounted on a vertical mast drilled into the

ice. WS2 was installed on a tripod, which was lowered simultaneously with melting glacier surface. It measured the following parameters: air temperature and relative humidity (at levels 0.5 and 2.0 m), wind speed and direction (at levels 1.0 and 2.0 m), and ice temperature in upper part of the glacier (using a thermistor cable with a distance between sensors of 10 cm). The gradient measurements of meteorological parameters at WS2 were used to calculate turbulent fluxes in the boundary air-glacier layer. A permanent automatic weather station (WS0) installed on the terminal moraine near the glacier (2529 m a.s.l.) measured air temperature, relative humidity, incoming and reflected shortwave radiation (using two different sensors), incoming and outgoing longwave radiation, wind speed and direction, atmospheric pressure, and liquid precipitation. The measurement errors for air temperature and shortwave/longwave radiation were ± 0.3 °C and $\pm 5\%$, respectively (Osipov et al., 2021). Measurements at all stations were performed synchronously at a frequency of 30 minutes and archived using autonomous recorders.

To characterize the reflectivity of glacier surface, the accumulative albedo was calculated as the ratio of the sums of reflected and incoming shortwave radiation over a 24-hour time window (van den Broeke et al., 2004). Using accumulative albedo instead of the traditional one makes it possible to neutralize potential errors associated with the incoming shortwave radiation measurements. Cloud cover analysis was performed using data from the Chara meteorological station, the closest to the glacier, located 50 km east of the glacier (8 measurements per day).

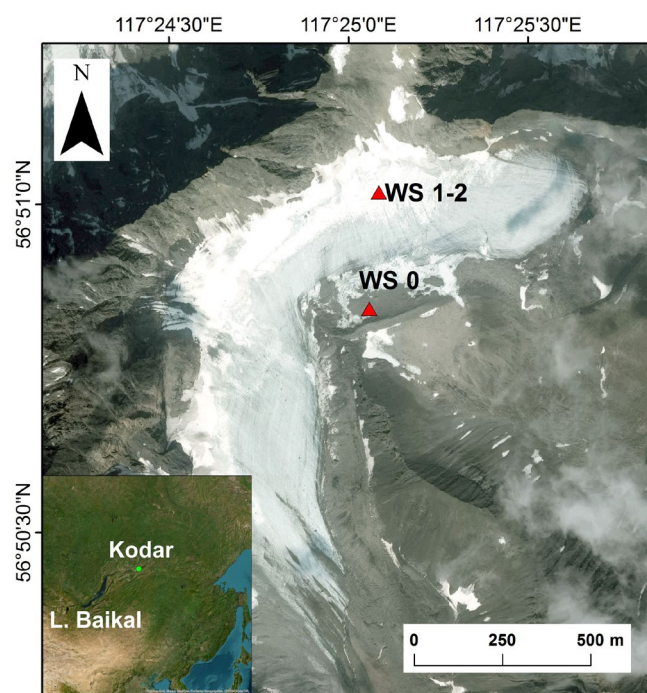


Fig.1. Location of the Sygyktinsky Glacier (Kodar Range, northern Transbaikalia) and three automatic weather stations (WS1, WS2 installed on the glacier itself and base station WS0 on its terminal moraine).

3.2. Measuring of ablation

At WS1, the glacier surface lowering was measured continuously (every 30 minutes) from 6 July to 20 August 2021 using an ultrasonic ranger mounted on a mast. Additionally, several ablation stakes were installed near the weather station. Measurements were taken several times per season. The stakes were periodically reinstalled due to thawing out. Since the weather station was located at the long-term mean equilibrium line the glacier surface was snow cover until 7 August and exposed ice after that date. Melt was calculated in water equivalent (w.e.) using the density measurements. Snow density was measured in early July in the snow pit near the weather station.

4. Surface energy balance model

The energy available for melt (Q_m) was calculated for 30-minute intervals based on meteorological measurements (calculation method was described in detail in (Osipov and Osipova, 2021)) as:

$$Q_m = S_{in} + S_{out} + L_{in} + L_{out} + H + LE + Q_r + Q_g, \quad (1)$$

where S_{in} and S_{out} are incoming and reflected shortwave radiation fluxes, L_{in} and L_{out} are incoming and outgoing longwave radiation fluxes, H and LE are the turbulent fluxes of sensible and latent heat, Q_r is heat supplied by rain, and Q_g is ground heat flux (into the snow cover and ice). All terms of the equation were taken to be positive if the heat fluxes were directed toward the surface and negative if directed away from it. All fluxes are expressed in $W\ m^{-2}$.

The fluxes of incoming and reflected shortwave radiation, as well as incoming longwave radiation, were measured directly at the weather stations. The longwave radiation emitted by the glacier surface was taken as constant and equal to $315.6\ W\ m^{-2}$, based on the assumption that the melting surface has a temperature of $0\ ^\circ C$ and emits as a black body. The fluxes of sensible and latent heat were calculated from gradient measurements in the boundary air-glacier layer at WS2 (air temperature, relative humidity, wind speed, and atmospheric pressure) using the bulk aerodynamic approach based on the Monin-Obukhov similarity the-

ory (Wagnon et al., 2003; Mölg and Hardy, 2004; Sun et al., 2012; Osipov and Osipova, 2021). Heat input with liquid precipitation (Q_r) was calculated according to (Hock and Holmgren, 2005). To calculate heat loss due to heat exchange with the glacier (Q_g), data from temperature measurements in a borehole using the thermistor cable were used.

Melt values calculated by using the energy balance model are in good agreement with the measurements by ultrasonic ranger and ablation stakes (Fig. 2). The exception is a short period from 18 to 25 July, when the melt measured by ultrasonic ranger exceeded that calculated from the energy balance. However, total melt values are similar (discrepancy is 92 mm w.e.). The greatest deviations are observed when the glacier is covered with snow. This suggests the influence of snow metamorphism on the change in rate of the glacier surface lowering. Taking into account the errors associated with measurements of glacier ablation by using stakes and ultrasonic ranger during short periods (Müller and Keeler, 1969; Munro, 1990; Osipov and Osipova, 2024) the surface energy balance (SEB) was used to calibrate the temperature-index models.

5. Temperature-index models

5.1. Simple temperature-index model

In the simple ("classical") temperature-index model (TM) the melt (M_{TM}) is calculated using the equation (Pellicciotti et al., 2005):

$$M_{TM} = \begin{cases} DDF_{snow/ice} \times T & T > T_t \\ 0 & T \leq T_t \end{cases}, \quad (2)$$

where $DDF_{snow/ice}$ is the degree-day factor (coefficient of proportionality between air temperature and melt rate), different for snow and ice surfaces (mm w.e. $^\circ C^{-1}$ per 30 min time-step), T is the air temperature of each time-step at the screen level of 2 m ($^\circ C$), T_t is the threshold temperature above which melt begins (here T_t is $1.0\ ^\circ C$). The DDF values were calibrated separately for snow (7 July – 7 August) and ice (8–20 August) time periods. The optimum DDF value is $0.1042\ mm\ 30\ min^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ for snow and $0.1457\ mm\ 30\ min^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ for ice.

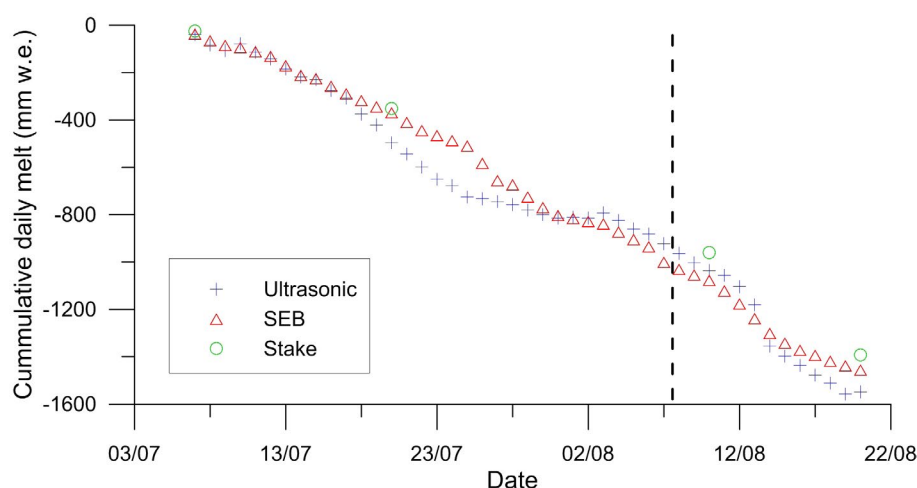


Fig.2. Comparison of cumulative daily ablation (mm w.e.) measured using ultrasonic ranger, ablation stakes, and calculated by the surface energy balance (SEB). The dotted line indicates the boundary between snow and ice surfaces.

5.2. Enhanced temperature-index model

In the enhanced temperature-index model (ETM), the melt (M_{ETM}) was calculated as the sum of two components, temperature and radiation (Pellicciotti et al., 2005):

$$M_{ETM} = \begin{cases} TF \times T + SRF(1 - \alpha) \times G & T > T_i \\ 0 & T \leq T_i \end{cases}, \quad (3)$$

where α is albedo, G is incoming shortwave radiation ($W\ m^{-2}$), TF is temperature coefficient ($mm\ 30\ min^{-1}\ ^\circ C^{-1}$), SRF is shortwave radiation coefficient ($m^2\ mm\ W^{-1}\ 30\ min^{-1}$), T is air temperature at the 2 m screen level ($^\circ C$), T_i is threshold of temperature equal to $1.0\ ^\circ C$.

Since the model uses two variables, all possible combinations of them were tested and the one that shows the greatest efficiency of the model was selected (see below). It was found that the optimum value of the TF is $0.016\ mm\ 30\ min^{-1}\ ^\circ C^{-1}$, and of the SRF is $0.0067\ m^2\ mm\ W^{-1}\ 30\ min^{-1}$.

5.3. Evaluation of temperature-index models

The performance of both temperature-index models was assessed by calculating the efficiency criterion R^2 (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{ri} - M_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n (M_{ri} - \bar{M}_r)^2}, \quad (4)$$

where M_r is the reference melt rate (according to the energy balance), M_m is the modelled melt rate (according to the temperature-index model), $\bar{M}_r$ is the mean value of the reference melt rate, and n is the number of time-steps (here each time-step is 30 minutes).

6. Results

6.1. Melt and its links to albedo, temperature, and energy fluxes

Figure 3 shows 30 min melt rates calculated using the energy balance over the period from 7 July to 23 August, as well as albedo and air temperature. Melt rates range from 0 to 6.6 mm (at 11:00 on 7 August) with mean value of 0.67 mm. In July, the daytime (maximum) melt rates increased from 3.7 mm to 4.7 mm, while in August they decreased from 6.6 mm to 1.7 mm. Periods of lower rates ($< 2\ mm$) lasted 2-3 days were observed in July (23-25) and August (1-3, 8-10, and 19-20). Increased melt rates ($> 4\ mm$) occurred in July (26-27 and 29-30), as well as on 11-15 August.

Over the observation period, albedo varied from 0.03 to 0.97 with mean value of 0.47 ± 0.22 . Two different albedo regimes, associated with the change of physical conditions on the surface at the weather station site (from snow to ice), were observed. From 7 July to 7 August (snow surface) the albedo was high and less variable (mean value is 0.57, coefficient of variation is 0.29), while 8-23 August (ice surface) it was lower and more variable (mean value is 0.21, coefficient of variation is 0.52). Strong variability of albedo is caused by the influence of snow metamorphism and its gradual contamination with detrital material coming from the surrounding slopes during the melt season (see decreasing trend of albedo with slope of -0.13 per 10 days in Fig. 3a), as well as by summer snowfalls (see pronounced peaks of albedo in Fig. 3a).

Air temperature clearly reflects both diurnal and synoptic (5-10 days) variability (Fig. 3b). In general, melt rates increase with decreasing albedo and increas-

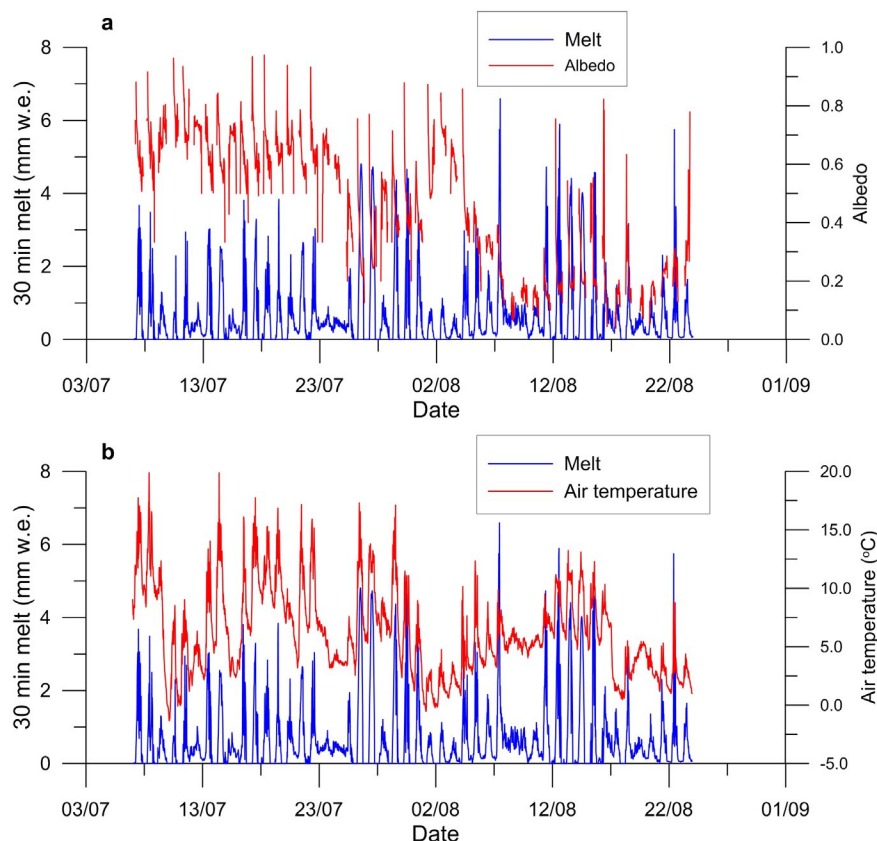


Fig.3. 30-minute melt rates calculated by the energy balance for the period 7 July – 23 August 2021 compared with values of albedo (a) and air temperature (b).

ing air temperature. However, the relationship between 30 min melt values and air temperature is rather weak, but statistically significant ($R^2=0.25$, $n=2304$, $p<0.001$).

Figure 4 shows the diurnal cycle of melt rates computed from the energy balance and averaged for the observation period, compared with incoming shortwave radiation and air temperature. The melt rate increases sharply from 5 a.m. to 11 a.m. (maximum of daily melt is $1.9 \text{ mm } 30 \text{ min}^{-1}$), and then decreases sharply to 6 p.m. In the evening and at night, melt does not exceed $0.2 \text{ mm } 30 \text{ min}^{-1}$, despite air temperatures above 4°C . It is obvious that the diurnal cycle of melt is more consistent with shortwave (solar) radiation (a more pronounced daytime peak) than with air temperature, the diurnal cycle of which is smoother.

The mean values of energy fluxes, their contribution to snow/ice melt and correlations with air temperature are presented in Table 1. The net shortwave radiation is the primary source of melting energy (93%). The net longwave radiation of the glacier surface is negative, therefore the net radiation, on average, provides up to 87% of energy for melt. Sensible and latent turbulent heat fluxes are minor and together account for 12%. Heat coming from liquid precipitation accounted for less than 2%. The relationships between air temperature and most of energy sources are statistically significant, but not very strong (Table 1). The closest relationship is observed between air temperature and incoming and reflected shortwave radiation ($R^2=0.36\text{--}0.38$). However, the relationship of temperature with longwave radiation and turbulent fluxes is very weak. The relationship between air temperature and melt energy is quite moderate ($R^2=0.22$).

6.2. Evaluation of performance of temperature-index models

The performance characteristics of two temperature-index models compared to the reference melt rates calculated by the physically based surface energy balance (SEB) are listed in Table 2 and shown graphically in Figure 5. The simple model (TM) rather roughly characterizes the glacier ablation. At the same time, the use of shortwave radiation in the enhanced model (ETM) significantly improves the accuracy of melt modelling (the root mean square error is three times smaller). The

TM model slightly overestimates the mean and total melt and poorly reproduces its diurnal variations. At the same time, the ETM model slightly underestimates the mean melt rate and total ablation, but reproduces diurnal variations of melt very well.

Both temperature-index models best simulate the melting of the glacier's ice surface (Table 3). This is especially true for the ETM model, which takes into account the radiation factor more accurately. The TM model using different DDF for snow and ice accounts for shortwave radiation rather roughly (through the different albedo values for snow and ice), while the ETM model directly includes solar radiation factor. Overall, the ETM model explains approximately 90% of the melt rate variations calculated by the energy balance, while the performance of the TM model does not exceed 30%. The high efficiency of the ETM model makes it well suited for use in the ablation zone of Kodar glaciers. The average ice melt rate, compared to snow, was 10% and 6% higher in the TM and ETM models, respectively. However, at the weather station site, the total snow melt exceeded the ice melt by 1.8-1.9 times due to the longer period of snow cover compared to exposed ice (32 and 13 days, respectively).

Figure 6 shows diurnal cycles of melt rates calculated by two T-index models in comparison with the reference melt values. It is clear that the TM model estimates well the daily average melt, but poorly reproduces the diurnal cycle. On average, it underestimates daytime melt (by 48% of the reference values) and significantly overestimates nighttime melt (by 460%). This is due to the temporal variability of melt rates, which is not accounted for by the model. In contrast to the TM, the ETM model reproduces the diurnal cycle of melt very well, although the maximum melt is also slightly underestimated (90% of the reference value).

Melt rates are influenced by the cloudiness. Figure 7 shows the 30-minute melting rates under different cloud cover conditions. For example, 23-24 July occurred overcast conditions (daytime cloud cover was 100%), while July 26-27 were sunny (0-25% cloud cover). It is evident that under cloudy conditions, the ETM model underestimates ablation (30% of the reference value), while the TM model slightly overestimates it (111%). Conversely, under clear-sky conditions, the ETM model slightly overestimates ablation (107%), while the TM greatly underestimates it (64%). In gen-

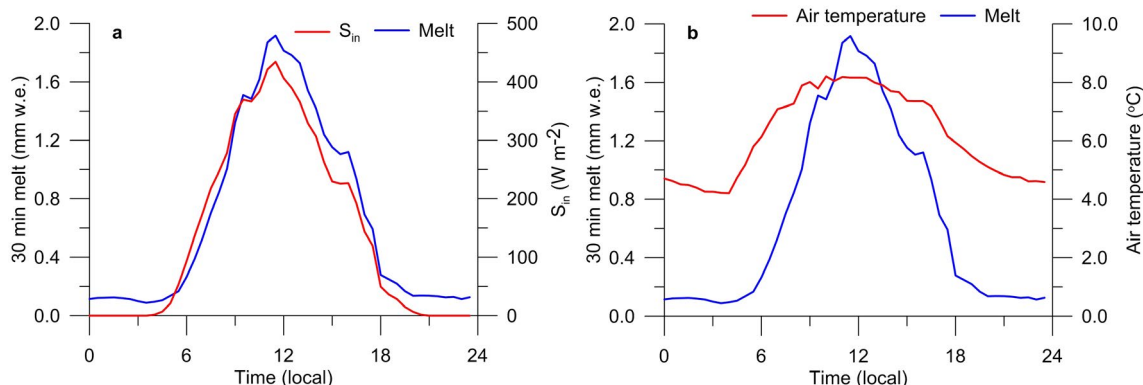


Fig.4. Diurnal cycle of melt rate calculated by the energy balance compared with incoming shortwave radiation S_{in} (a) and air temperature (b). Data averaged for the period 7 July – 23 August 2021.

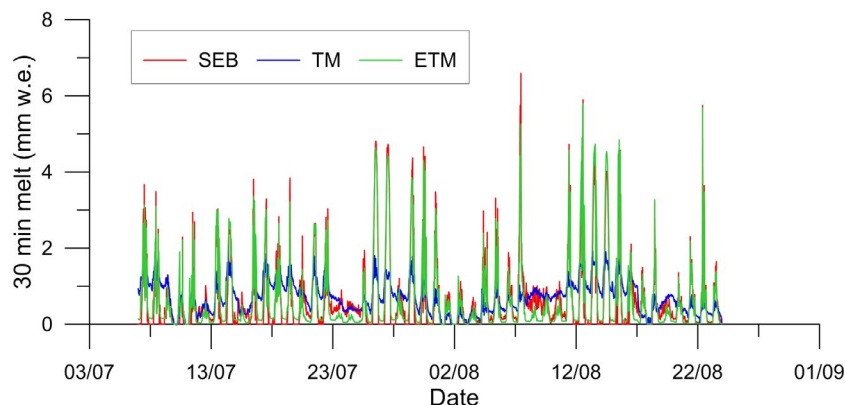


Fig.5. Comparison of 30-min melt rates (mm w.e.) calculated by the energy balance (SEB), simple (TM) and enhanced (ETM) temperature-index models.

eral, with increasing of cloud cover (above 65%) the TM model tends to overestimate ablation, while the ETM, conversely, to underestimate it.

6.3. Sensitivity of model parameters

To assess the sensitivity of parameters, we changed DDF, TF, and SRF relative to the optimum value in 10% increments. One of the parameters was varied (DDF snow or DDF ice, TF or SRF), while the other remained at its optimum value. Figure 8a shows the effect of DDF parameter on the TM model performance. It is evident that the model is approximately equally sensitive to DDF of snow and ice, although the sensitivity is slightly higher for DDF ice. Total seasonal melt is most sensitive to changes in DDF snow (Fig. 8b). This is explained by the longer duration of snow cover compared to exposed ice.

The sensitivity of the ETM model is shown in Figure 9. It can be seen that the radiation parameter SRF is most sensitive.

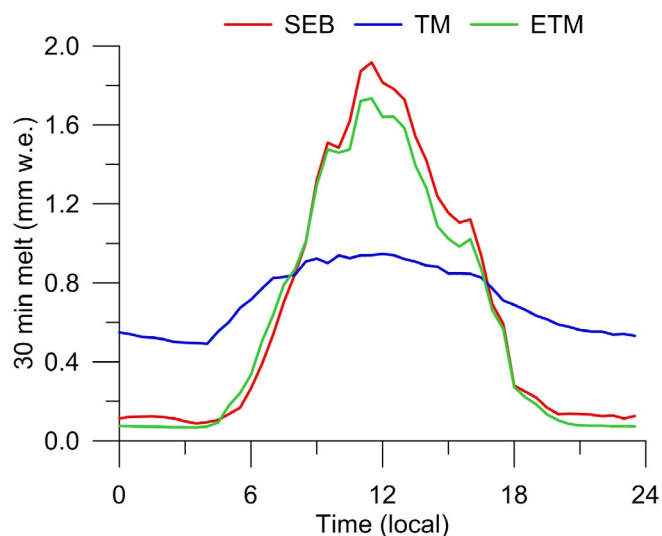


Fig.6. Comparison of averaged diurnal cycles of 30-min melt rate (mm w.e.) calculated by the energy balance (SEB), simple (TM), and enhanced (ETM) temperature-index models.

Table 1. Mean values of 30-minute energy fluxes* on the glacier surface, their contribution to melt and relationship with air temperature for the period from 7 July to 20 August 2021 (n = 2304)

Parameter	Value (W m ⁻²)	Contribution to melt (%)	Relationship with temperature (R ²)
Incoming shortwave radiation (S _{in})	143.5	177.8	0.38
Reflected shortwave radiation (S _{out})	-68.1	-84.4	0.36
Incoming longwave radiation (L _{in})	310.3	384.5	0.09
Outgoing longwave radiation (L _{out})	-315.6	-391.1	-
Net shortwave radiation (S _{net})	75.4	93.4	0.28
Net longwave radiation (L _{net})	-5.3	-6.6	0.09
Net radiation (R _{net})	70.0	86.7	0.22
Sensible-heat flux (H)	5.1	6.3	0.01
Latent-heat flux (LE)	4.5	5.6	0.00
Turbulent heat fluxes (H + LE)	9.6	11.9	0.00
Energy supplied by rain (Q _r)	1.3	1.6	0.01
Ground heat flux (Q _g)	-0.34	-0.4	-
Energy available for melt (Q _m)	-80.7	-100.0	0.22

Note: * Energy fluxes directed toward the surface have positive values, while those away from the surface negative. Statistically significant relationships ($p < 0.05$) are highlighted in bold.

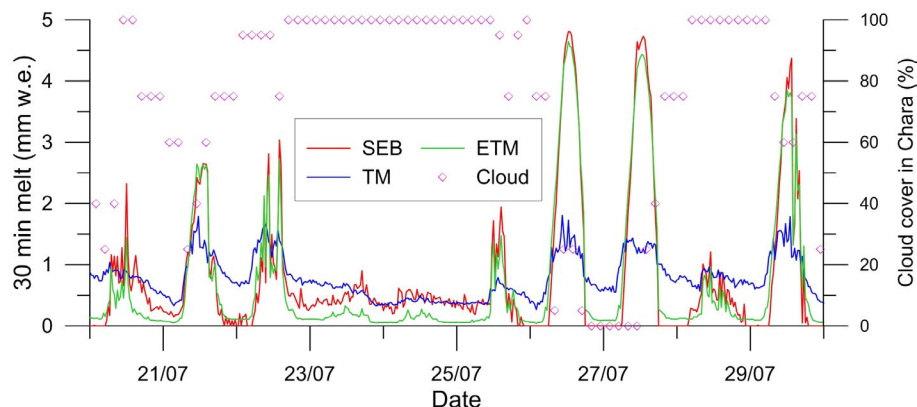


Fig.7. Comparison of 30-min melt rates (mm w.e.) calculated by the energy balance (SEB), simple (TM), and enhanced (ETM) temperature-index models under different cloud conditions for the period 20-30 July 2021. Total cloud cover (%) data are from the nearest meteorological station Chara.

7. Discussion

The study conducted on the Sygyktinsky Glacier found a significant but moderate positive relationship between 30-minute values of air temperature and melt rates ($R^2=0.25$). This is consistent with the previous results obtained from the daily average data (Osipov and Osipova, 2024). This finding significantly limits the use of simple temperature-index models for simulations of melt on the Kodar glaciers. A possible explanation for relatively weak relationship between air temperature and melt is the low contribution of main energy fluxes to air temperature, which is expressed by rather weak correlations between these parameters. Temperature is most closely related to shortwave radiation, however, the radiation factor explains no more than 40% of temperature variability. It is believed that longwave radiation, together with the sensible heat flux ($\frac{3}{4}$ of the total melt energy), strongly depend on the air temperature above the glacier and determine the physical mechanism for the relationship between melt and air temperature (Ohmura, 2001). However, our studies on the Sygyktinsky Glacier shown no relationship between high-resolution air temperature and longwave radiation ($R^2=0.09$) and turbulent fluxes ($R^2=0.01$). The weakening of the link between temperature and longwave radiation may be due to the influence of the moisture content of the glacier-air layer on the relative emissivity of the atmosphere (Ebrahimi and Marshall, 2015). On the other hand, turbulent heat exchange on the glacier is largely controlled not by temperature, but by wind speed (Osipov and Osipova, 2021). The summer period here is characterized by extremely low wind speeds, due to the predominance of low-gradient baric fields (Osipova and Osipov, 2022).

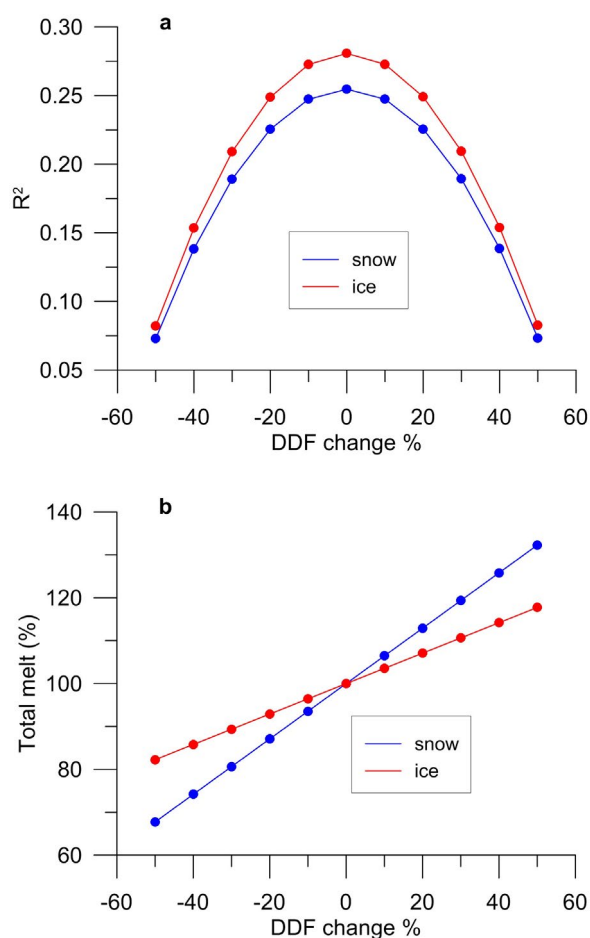


Fig.8. Sensitivity of the TM model to degree-day factors (DDF) for snow and ice expressed as efficiency criterion R^2 (a) and relative change of total seasonal melt (b). The DDF change step is 10%.

Table 2. Performance characteristics of temperature-index models TM and ETM compared to the energy balance model (SEB) calculated for the period 7 July – 23 August 2021.

Model	Total melt (mm w.e.)	Mean melt (mm w.e. 30 min ⁻¹)	Standard deviation (mm w.e. 30 min ⁻¹)	RMSE	R^2
SEB	1533	0.67	0.96	-	-
TM	1646	0.71	0.42	0.82	0.26
ETM	1423	0.62	0.96	0.27	0.92

Table 3. Melt parameters and efficiency criterion (R^2) of two temperature-index models (in comparison with the energy balance model) calculated separately for snow and ice at the weather station site.

Model	Mean melt (mm w.e. 30 min ⁻¹)		Total melt (mm w.e.)		R^2	
	snow	ice	snow	ice	snow	ice
SEB	0.65	0.69	1001	532	-	-
TM	0.69	0.76	1062	584	0.25	0.28
ETM	0.61	0.64	930	494	0.92	0.92

Approximately 90% of the melt energy of the glacier comes from the net radiation, primarily its shortwave component. Therefore, the introduction of radiation parameters into temperature-index models can significantly improve their accuracy. The enhanced model presented in this paper, in addition to temperature, also takes into account incoming shortwave radiation and albedo and explains up to 90% of the melt rate variability, which is three times better than the efficiency of simple (“classical”) T-index model (not more than 30%). The obtained estimates are in good agreement with data from other glaciated regions. For example, on the d’Arolla Glacier (Switzerland), the enhanced temperature-index model with two additional parameters (shortwave radiation and albedo) explained up to 95% of the melt rate variability (Pellicciotti et al., 2005).

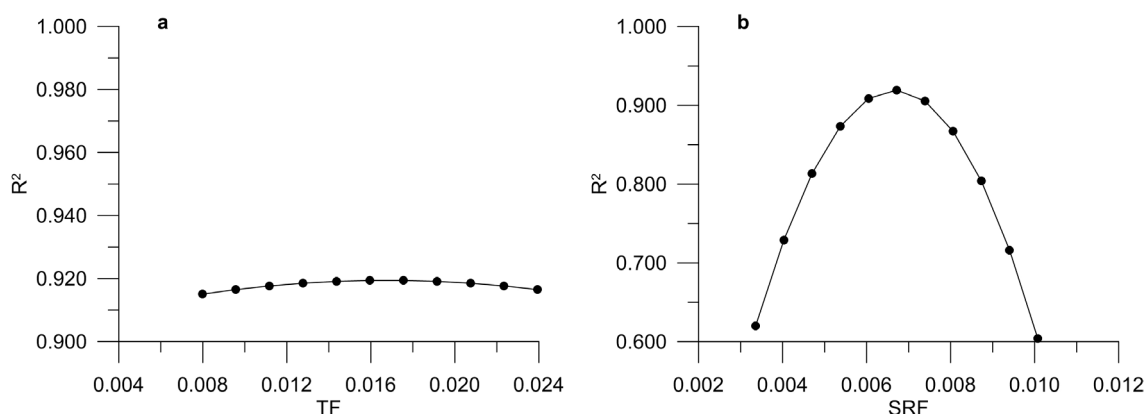
The simple T-index model provides a good estimate of the daily average melt, but it poorly reproduces the diurnal melt cycle. This is because the model does not take into account the temporal variability of the DDF. For example, studies on the Storglaciären glacier (Sweden) shown that these coefficients are subject to distinct diurnal cycles, with values fluctuating between 0 and 15 mm day⁻¹ °C⁻¹ (Hock, 1999). With a constant DDF, the melting rate is overestimated at night and underestimated during the daytime, that is, the diurnal amplitudes of the melt rate are significantly underestimated (Fig. 6). Unlike the simple T-index models (Ohmura, 2001; Hock, 2003), the ETM model allows simulating melt changes with a much better temporal resolution (on the diurnal scale). In addition, this model much more accurately takes into account changes in surface albedo, which is an important melting factor that requires consideration in temperature models (Lang and Braun, 1990). The simple T-index

model accounts for albedo rather crudely using the melting coefficients calculated separately for snow and ice (Osipov and Osipova, 2024). However, the model completely ignores albedo changes associated with snow metamorphism and summer snowfalls, as well as contamination of the glacier surface by material transported from mountain slopes. Our study on the glacier showed that such albedo variability occurs during the summer season.

In addition to the shortwave radiation component, air temperature variability also has an advective origin. For example, this study confirmed the previous finding that the air temperature changes on the Sygktinsky Glacier show a periodicity of 3 to 12 days (Osipov et al., 2021). These changes are obviously caused by multi-scale atmospheric (mainly synoptic) variability in the lower troposphere. Accordingly, changes in weather types should influence the relative contribution of different energy sources to snow/ice melt and the variability of DDF (Lang and Braun, 1990). Therefore, the use of additional synoptic parameters in temperature-index models should contribute to improving the efficiency of melt modelling of Kodar glaciers.

8. Conclusion

A comparative analysis of two temperature-index models was conducted for the 2021 melt season on the Sygktinsky Glacier (Kodar Range, northern Transbaikalia). The models were calibrated and tested using the 30-minute melt rates calculated for a single glacier point by using the physically based energy balance from meteorological data. The measurements were conducted using three automatic weather stations installed on the glacier (2561 m a.s.l.) and terminal

**Fig.9.** Sensitivity of the ETM model (efficiency criterion R^2) to TF (a) and SRF (b) values. The change step of both parameters is 10%.

moraine (2529 a.s.l.). In addition, ablation was measured at the weather station site by using the ultrasonic ranger with a 30-minute resolution and ablation stakes. A comparison of the measured melt values with those calculated using the energy balance showed good agreement. An assessment of the energy balance components during the ablation period revealed that the net shortwave radiation makes the largest energy contribution to melt (93%). Correlation analysis revealed a statistically significant but weak relationship between air temperature and melt rates ($R^2 = 0.25$), which is explained by the insignificant contribution of energy fluxes to air temperature variability (up to 40%). The simple ("classical") temperature-index model (TM), using air temperature as a parameter, explains no more than 30% of the 30 min melt variability. Moreover, the model tends to overestimate nighttime and underestimate daytime melt. The enhanced temperature-index model (ETM), which takes into account air temperature, incoming shortwave radiation, and albedo, demonstrated the best performance in calculating the melt rates and explained approximately 90% of their variability. Unlike the TM, the ETM model reproduces the diurnal cycle of melting well. Inclusion of additional temperature-independent parameters (shortwave radiation and albedo) in the model significantly improves its efficiency and temporal resolution. The enhanced model can be used for spatial modelling of melt on the Kodar glaciers, as well as on other inland glaciers with a significant contribution of shortwave radiation to melt.

Acknowledgements

This study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-27-00165, <https://rscf.ru/project/24-27-00165/>). The authors thank V. Ryzhy, S. Logvinenko, I. Enushchenko, and V. Isaev for their assistance in conducting the field campaign.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Braithwaite R.J. 1981. On glacier energy balance, ablation, and air temperature. *Journal of Glaciology* 27 (97): 381–391. DOI: [10.3189/S0022143000011424](https://doi.org/10.3189/S0022143000011424)
- Ebrahimi S., Marshall S.J. 2015. Parameterization of incoming longwave radiation at glacier sites in the Canadian Rocky Mountains. *Journal of geophysical research: Atmospheres* 120 (24): 12536–12556. DOI: [10.1002/2015JD023324](https://doi.org/10.1002/2015JD023324)
- Hock R. 1999. A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology* 45 (149): 101–111. DOI: [10.3189/S0022143000003087](https://doi.org/10.3189/S0022143000003087)
- Hock R. 2003. Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of hydrology* 282 (1–4): 104–115. DOI: [10.1016/S0022-1694\(03\)00257-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9)
- Hock R., Holmgren B. 2005. A distributed surface energy-balance model for complex topography and its application to Storglaciären, Sweden. *Journal of Glaciology* 51 (172): 25–36. DOI: [10.3189/172756505781829566](https://doi.org/10.3189/172756505781829566)
- Lang H., Braun L. 1990. On the information content of air temperature in the context of snow melt estimation. *IAHS Publ.* 190: 347–354.
- Mölg T., Hardy D.R. 2004. Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109 (D16): 1–13. DOI: [10.1029/2003JD004338](https://doi.org/10.1029/2003JD004338)
- Müller F., Keeler C.M. 1969. Errors in short-term ablation measurements on melting ice surfaces. *Journal of Glaciology* 8 (52): 91–105. DOI: [10.3189/S0022143000020785](https://doi.org/10.3189/S0022143000020785)
- Munro D.S. 1990. Comparison of melt energy computations and ablatometer measurements on melting ice and snow. *Arctic and Alpine Research* 22 (2): 153–162. DOI: [10.1080/00040851.1990.12002777](https://doi.org/10.1080/00040851.1990.12002777)
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10 (3): 282–290. DOI: [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Ohmura A. 2001. Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 40 (4): 753–761. DOI: [10.1175/1520-0450\(2001\)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2)
- Osipov E.Y., Osipova O.P. 2014. Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age. *Annals of Glaciology* 55 (66): 167–176. DOI: [10.3189/2014AoG66A135](https://doi.org/10.3189/2014AoG66A135)
- Osipov E.Y., Osipova O.P. 2015. Glaciers of the Levaya Sygykta River watershed, Kodar Ridge, southeastern Siberia, Russia: modern morphology, climate conditions and changes over the past decades. *Environmental Earth Sciences* 74 (3): 1969–1984. DOI: [10.1007/s12665-015-4352-4](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4352-4)
- Osipov E.Y., Osipova O.P. 2019. Reconstruction of the Little Ice Age glaciers and equilibrium line altitudes in the Kodar Range, southeast Siberia. *Quaternary International* 524: 102–114. DOI: [10.1016/j.quaint.2018.11.033](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.033)
- Osipov E.Y., Osipova O.P. 2021. Surface energy balance of the Sygktsky Glacier, south Eastern Siberia, during the ablation period and its sensitivity to meteorological fluctuations. *Scientific Reports* 11 (1): 21260. DOI: [10.1038/s41598-021-00749-x](https://doi.org/10.1038/s41598-021-00749-x)
- Osipov E.Y., Osipova O.P. 2024. Measuring and modeling of ablation on the Sygktsky glacier (Kodar Ridge). *Led i sneg [Ice and Snow]* 64 (3): 358–372. DOI: [10.31857/S2076673424030045](https://doi.org/10.31857/S2076673424030045) (In Russian)
- Osipov E.Y., Osipova O.P., Vasilenko O.V. 2021. Meteorological regime of the Sygktsky Glacier (the Kodar Ridge) during the ablation period. *Led i sneg [Ice and Snow]* 61 (2): 179–194. DOI: [10.31857/S2076673421020080](https://doi.org/10.31857/S2076673421020080) (In Russian)
- Osipova O.P., Osipov E.Y. 2022. Objective classification of weather types for the Eastern Siberia over the 1970–2020 period using the Jenkinson and Collinson method. *Atmospheric Research* 277: 106291. DOI: [10.1016/j.atmosres.2022.106291](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106291)
- Osipova O.P., Osipov E.Y. 2023. Influence of atmospheric processes on the dynamics of Kodar Glaciers. *Geography and Natural Resources* 44 (4): 99–107. DOI: [10.15372/GIPR20230410](https://doi.org/10.15372/GIPR20230410) (In Russian)
- Pellicciotti F., Brock B., Strasser U. et al. 2005. An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology* 51 (175): 573–587. DOI: [10.3189/172756505781829124](https://doi.org/10.3189/172756505781829124)
- Stokes C., Shahgedanova M., Evans I. et al. 2013. Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia. *Global and Planetary Change* 101: 82–96. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2012.12.010](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.12.010)
- Sun W., Qin X., Ren J. et al. 2012. The Surface Energy Budget in the Accumulation Zone of the Laohugou Glacier No. 12 in the Western Qilian Mountains, China, in Summer

2009. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 44 (3): 296–305.

DOI: [10.1657/1938-4246-44.3.296](https://doi.org/10.1657/1938-4246-44.3.296)

van den Broeke M., van As D., Reijmer C., van de Wal R. 2004. Assessing and improving the quality of untended radiation observations in Antarctica. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 21 (9): 1417–1431.

DOI: [10.1175/1520-0426\(2004\)021<1417:AAITQO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<1417:AAITQO>2.0.CO;2)

Wagnon P., Sicart J.-E., Berthier E. et al. 2003. Wintertime high-altitude surface energy balance of a Bolivian glacier, Illimani, 6340 m above sea level. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 108 (D6): 1–14. DOI:

[10.1029/2002JD002088](https://doi.org/10.1029/2002JD002088)

Моделирование таяния с использованием простой и улучшенной температурно-индексных моделей: тестирование для Сыгыктинского ледника, хребет Кодар (Забайкалье, Россия)

Осипов Э.Ю.^{1*}, Осипова О.П.^{1,2}

¹ Лимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

² Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, ул. Улан-Баторская, 1, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. Моделирование таяния снега и льда в речных бассейнах позволяет существенно улучшить прогнозирование гидрологических процессов в локальном и региональном масштабах. Скорость таяния на поверхности Сыгыктинского ледника (хребет Кодар, северное Забайкалье) была измерена ультразвуковым датчиком, а также рассчитана на основе физически обоснованной модели поверхностного энергетического баланса (SEB) с 30-минутным разрешением за период с 7 июля по 23 августа 2021 г. Для расчета таяния были протестированы две Т-индексные модели, простая (ТМ) и усовершенствованная (ЕТМ). Все модели использовали данные 30-минутных метеорологических измерений с помощью автоматической метеостанции, установленной в средней части ледника на высоте многолетней границы питания (2561 м). Эффективность Т-индексных моделей была оценена с помощью сравнения 30-минутных скоростей таяния с физически обоснованной моделью SEB. Модель ТМ использует в качестве предиктора температуру воздуха объясняет до 30% изменчивости таяния. В то же время модель ЕТМ, учитывающая кроме температуры также приходящую коротковолновую радиацию и альбедо, показала намного лучшую эффективность и объяснила до 90% изменчивости в эталонной скорости таяния ледника. Преимущества усовершенствованной модели позволяют использовать ее в дальнейшем при пространственном моделировании таяния ледников Кодара.

Ключевые слова: хребет Кодар, Сыгыктинский ледник, таяние, поверхностный энергетический баланс, Т-индексная модель, коротковолновая радиация, альбедо

Для цитирования: Осипов Э.Ю., Осипова О.П. Моделирование таяния с использованием простой и улучшенной температурно-индексных моделей: тестирование для Сыгыктинского ледника, хребет Кодар (Забайкалье, Россия) // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 5. - С. 1158-1177. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-5-1158](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-5-1158)

1. Введение

Ледники хребта Кодар (северное Забайкалье) расположенные в труднодоступном районе северной Евразии являются очень чувствительными к современным климатическим изменениям. Дистанционные исследования показали, что эти ледники имели более высокие скорости сокращения по сравнению с другими ледниками в Восточной Сибири (Osipov and Osipova, 2014). С конца малого ледникового периода (середина XIX века) до 2011 г. ледники Кодара сократились в среднем на 62%. При этом, как было установлено разными исследовани-

ями наибольшие скорости сокращения оледенения наблюдались в конце XX и начале XXI в. (Stokes et al., 2013; Osipov and Osipova, 2015). Ускорение таяния ледников, в основном, связывается с повышением летней температуры в регионе (Stokes et al., 2013), изменением синоптических условий (Osipova and Osipov, 2022; Осипова и Осипов, 2023). Для понимания физических процессов, контролирующих скорость таяния на одном из крупнейших ледников Кодара (Сыгыктинском) в течение двух летних сезонов 2019-2020 гг. с помощью автоматической метеостанции были проведены исследования поверхностного теплового баланса ледника с высоким

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: eduard@lin.irk.ru (Э.Ю. Осипов)

Поступила: 20 августа 2025; **Принята:** 03 октября 2025;

Опубликована online: 31 октября 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



(30 минут) временным разрешением (Осипов и др., 2021; Osipov and Osipova, 2021). Эти исследования показали, что наибольший вклад в таяние ледника (86-95%) вносит радиационный баланс, главным образом за счет коротковолновой радиации (Osipov and Osipova, 2021; Осипов и Осипова, 2024). Модель теплового баланса ледниковой поверхности наиболее точно описывает изменения таяния с высоким разрешением и может рассматриваться в качестве эталонной при выполнении других модельных оценок.

Однако при экстраполяции таяния из одной точки ледника на всю его поверхность или соседние ледники неизбежно приходится использовать упрощенные модельные подходы на основе параметризации. Наиболее простые модели связывают таяние с температурой воздуха на основе линейной зависимости между этими величинами (температурно-индексные или Т-индексные модели). Они широко используются при оценке летнего баланса ледников в различных регионах (Braithwaite, 1981; Hock, 2003). Тестирование простых Т-индексных моделей на Сыгыттинском леднике показало, что эти модели хорошо воспроизводят среднюю и суммарную абляцию, однако межсезонные колебания воспроизводятся со значительной ошибкой (Осипов и Осипова, 2024). При этом использование коэффициентов таяния различных для снега и льда улучшает точность модели. Это говорит о влиянии изменчивости поглощения/отражения солнечной радиации на поверхности ледника (через альбедо) на точность температурных моделей. Коротковолновая (солнечная) радиация является главной энергетической составляющей таяния большинства ледников (Osipov and Osipova, 2021) и поэтому используется для улучшения простых температурных моделей (Hock, 1999; Pellicciotti et al., 2005).

Основной целью данной работы был сравнительный анализ эффективности двух типов температурных моделей для оценки абляции Сыгыттинского ледника (хребет Кодар). Первый тип моделей использует в качестве исходных данных только температуру воздуха (простая модель), а второй – температуру и солнечную радиацию как дополнительный параметр (улучшенная модель). Обе модели сравнивались с таянием, рассчитанным с помощью физически обоснованной модели поверхностного энергетического баланса, использующей непосредственные метеорологические измерения на леднике. Фактические данные высокого (30-минутного) разрешения были получены на Сыгыттинском леднике в сезон абляции (июль–август) 2021 г. с помощью автоматической метеостанции.

2. Район исследований

Сыгыттинский ледник – один из крупнейших ледников хребта Кодар (Рис. 1). Это единственный ледник перемётного типа, расположенный сразу в двух речных бассейнах – Левого Сыгыты и Сюльбана. Соответственно, ледник состоит из двух ветвей, южной и восточной. Площадь ледника 0.83 км²,

длина 2,1 км. Ледник расположен на высоте 2300-2800 м над уровнем моря. Средняя многолетняя высота границы питания ледника составляет 2510 м над уровнем моря (Osipov and Osipova, 2019). С июля 2019 г. на леднике проводятся регулярные гляциологические и метеорологические наблюдения (Осипов и др., 2021).

3. Измерения на леднике

3.1. Метеорологические измерения

Для оценки параметров температурной модели, а также для моделирования энергетического баланса ледника использовались метеорологические данные высокого разрешения. В начале июля 2021 г. в средней части ледника на высоте 2560 м (средняя многолетняя высота границы питания) на расстоянии 20 м друг от друга были установлены две автоматические метеостанции – WS1 и WS2 (Рис. 1). WS1 измеряла: температуру и относительную влажность воздуха, приходящую и отраженную коротковолновую радиацию, а также высоту ледниковой поверхности (ультразвуковым датчиком). Датчики были установлены на вертикальной мачте, забуренной в лед. WS2 была установлена на треноге, которая опускалась синхронно с понижением поверхности ледника в процессе таяния. Она измеряла следующие параметры: температуру и относительную влажность воздуха (на уровнях 0.5 и 2.0 м), скорость и направление ветра (на уровнях 1.0 и 2.0 м), температуру верхней части ледника (термокосой с расстояниями между датчиками 10 см). Данные градиентных измерений метеопараметров на WS2 использовались для расчета турбулентных потоков в приледниковом слое. На конечной морене вблизи

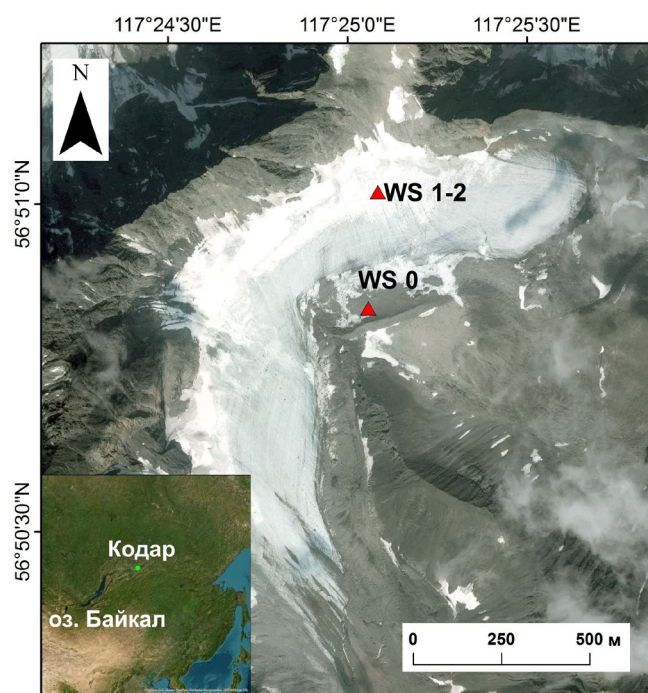


Рис. 1. Расположение Сыгыттинского ледника (хребет Кодар, северное Забайкалье) и трех автоматических метеостанций (WS1, WS2 на леднике и базовой станции WS0 на конечной морене).

края ледника работала постоянная (базовая) автоматическая метеостанция (WS0), которая измеряла: температуру и относительную влажность воздуха, приходящую и отраженную коротковолновую радиацию (двумя разными датчиками), приходящую и излучаемую длинноволновую радиацию, скорость и направление ветра, атмосферное давление и жидкие осадки. Погрешности измерения температуры воздуха, коротковолновой/длинноволновой радиации составили, соответственно, $\pm 0,3^\circ\text{C}$ и $\pm 5\%$ (Осипов и др., 2021). Измерения на всех станциях выполнялись синхронно с частотой 30 минут и архивировались с помощью автономных регистраторов.

Для характеристики отражающей способности ледниковой поверхности использовалось аккумулятивное альbedo, рассчитанное как отношение сумм отраженной и поступающей коротковолновой радиации в 24-часовом временном окне (van den Broeke et al., 2004). Использование аккумулятивного альbedo вместо традиционного позволяет нейтрализовать возможные ошибки, связанные с измерением коротковолновой радиации. При анализе облачности были использованы данные ближайшей к леднику метеостанции Чара, расположенной в 50 км к востоку от ледника (8 измерений в сутки).

3.2. Измерение абляции

На станции WS1 понижение поверхности ледника измерялось непрерывно (частота 30 минут) с помощью ультразвукового датчика, установленного на мачте с 6 июля по 20 августа 2021 г. Дополнительно рядом с метеостанцией устанавливались абляционные рейки. Измерения по рейкам проводились несколько раз за сезон. Из-за вытаивания рейки периодически переустанавливались. Метеостанция находилась на уровне средней многолетней границы питания, поэтому поверхность ледника была снежной до 7 августа и ледяной после этой даты. Абляция рассчитывалась как водный эквивалент (в.э.) таяния снега и льда с помощью данных измерения плотности. Плотность снега измерялась в шурфе рядом с метеостанцией в начале июля.

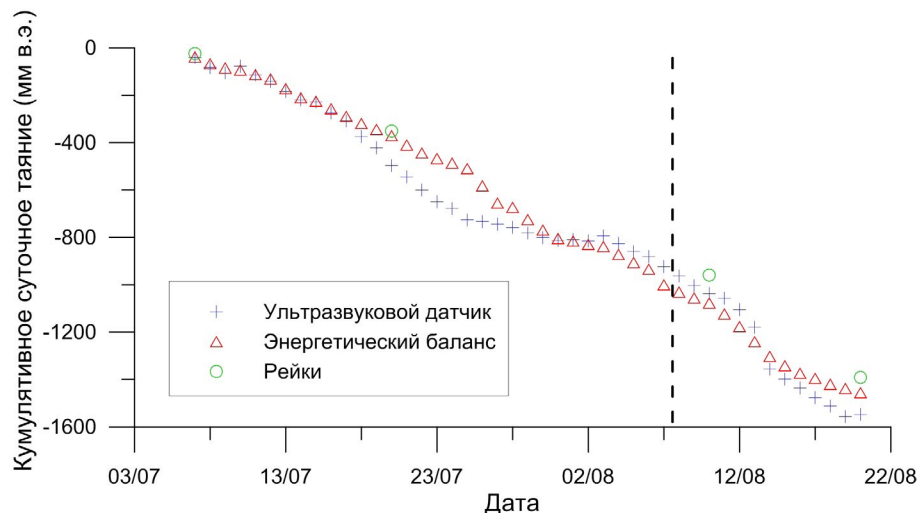


Рис.2. Сравнение кумулятивной суточной абляции (мм в.э.), измеренной с помощью ультразвукового датчика, абляционных реек и рассчитанного по модели энергетического баланса (SEB). Пунктирной линией показана граница между снежной и ледяной поверхностями.

4. Модель энергетического баланса поверхности

Энергетический эквивалент таяния (Q_m) рассчитывался для 30-минутных интервалов по данным метеорологических измерений (подробная методика расчёта приведена в работе (Osipov and Osipova, 2021) как:

$$Q_m = S_{in} + S_{out} + L_{in} + L_{out} + H + LE + Q_r + Q_g, \quad (1)$$

где S_{in} и S_{out} – потоки приходящей и отраженной коротковолновой радиации, L_{in} и L_{out} – потоки приходящей и излучаемой поверхностью длинноволновой радиации, H и LE – турбулентные потоки явного и скрытого тепла, Q_r – тепло, поступающее с жидкими осадками, Q_g – подповерхностный поток тепла. Все члены уравнения принимались положительными, если тепловые потоки были направлены к поверхности и отрицательными если направлены от нее. Все потоки выражены в $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Потоки приходящей и отраженной коротковолновой радиации, а также приходящей длинноволновой радиации измерялись непосредственно на метеостанциях. Излучаемая ледниковой поверхностью длинноволновая радиация была принята постоянной и равной $315,6 \text{ Вт}/\text{м}^2$, исходя из предположения о том, что тающая поверхность имеет температуру 0°C и излучает как абсолютно черное тело. Потоки явного и скрытого тепла были рассчитаны по данным градиентных измерений в приледниковом слое воздуха на WS2 (температура и относительная влажность воздуха, скорость ветра, атмосферное давление) с использованием аэродинамического подхода, основанного на теории подобия Мони́на–Обухова (Wagnon et al., 2003; Mölg and Hardy, 2004; Sun et al., 2012; Osipov and Osipova, 2021). Поступление тепла с жидкими осадками (Q_r) рассчитывалось согласно (Hock and Holmgren, 2005). Для расчета потери тепла на теплообмен с ледником (Q_g) были использованы данные температурных измерений в скважине (с помощью термокосы).

Значения таяния, рассчитанные по модели энергетического баланса хорошо согласуются с данными ультразвукового датчика и абляционных реек (Рис. 2). Исключение составляет короткий период

18-25 июля, когда таяние измеренное ультразвуковым датчиком превышало таяние рассчитанное по энергетическому балансу. Однако суммарные значения таяния близки между собой (расхождение 92 мм в.э.). Наибольшие отклонения наблюдаются в то время когда ледник покрыт снегом. Это предполагает влияние метаморфизма снежного покрова на изменение скорости понижения поверхности ледника. Учитывая погрешности связанные с измерением абляции ледника с использованием реек и ультразвукового дальномера в течение коротких периодов (Müller and Keeler, 1969; Munro, 1990; Осипов и Осипова, 2024) для калибровки температурных моделей была использована модель поверхностного энергетического баланса (SEB).

5. Температурные модели

5.1. Простая температурная модель

В простой («классической») Т-индексной модели (TM) таяние (M_{TM}) вычисляется с помощью уравнения (Pellicciotti et al., 2005):

$$M_{TM} = \begin{cases} DDF_{snow/ice} \times T & T > T_t \\ 0 & T \leq T_t \end{cases}, \quad (2)$$

где $DDF_{snow/ice}$ – температурный коэффициент таяния снега и льда (мм/°C 30 мин), T – температура воздуха на уровне 2 м (°C), T_t – пороговая температура воздуха, при которой начинается таяние (в данной работе T_t равно 1,0 °C). Коэффициенты DDF были откалиброваны отдельно для снега (7 июля – 7 августа) и льда (8-20 августа). Наиболее оптимальные значения DDF для снега 0.1042 мм/°C 30 мин, для льда 0.1457 мм/°C 30 мин.

5.2. Улучшенная температурная модель

В улучшенной температурной модели (ETM) таяние (M_{ETM}) рассчитывалось как сумма двух компонентов – температурного и радиационного (Pellicciotti et al., 2005):

$$M_{ETM} = \begin{cases} TF \times T + SRF(1 - \alpha) \times G & T > T_t \\ 0 & T \leq T_t \end{cases}, \quad (3)$$

где α – альbedo, G – приходящая коротковолновая радиация (Вт/м²), TF – температурный коэффициент (мм/°C 30 мин), SRF – коэффициент коротковолнового излучения (м² мм /Вт 30 мин), T – температура воздуха на уровне 2 м (°C), T_t – пороговое значение температуры равное 1,0 °C.

Поскольку модель использует две переменные, были проверены все возможные их комбинации и выбрана такая, которая дает наибольшую эффективность модели (см. ниже). Было найдено, что оптимальное значение параметра TF равно 0.016 мм/°C 30 мин, а параметра SRF 0.0067 м² мм /Вт 30 мин.

5.3. Оценка температурных моделей

Производительность обеих температурных моделей оценивалась путем расчета критерия эффективности R^2 (Nash and Sutcliffe, 1970):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{ri} - M_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n (M_{ri} - \bar{M}_{ri})^2}, \quad (4)$$

где M_r – эталонное таяние (по энергетическому балансу), M_m – моделируемое таяние (по Т-индексной модели), $\bar{M}_{ri}$ – среднее значение эталонного таяния, n – число временных шагов (здесь каждый временной шаг равен 30 минутам).

6. Результаты

6.1. Таяние и его связи с альbedo, температурой и потоками энергии

На Рисунке 3 показаны значения скорости таяния, рассчитанные с помощью энергетического баланса за 30-минутные интервалы за период с 7.07 по 23.08, а также альbedo и температура воздуха. Таяние варьировало от 0 до 6.6 мм (в 11:00 7 августа) со средним значением 0.67 мм. В июле скорости дневного (максимального) таяния увеличивались с 3.7 мм до 4.7 мм, а в августе уменьшались с 6.6 мм до 1.7 мм. Периоды низкой скорости таяния (<2 мм) продолжительностью 2-3 дня наблюдались 23-25 июля, 1-3, 8-10 и 19-20 августа. Периоды высокой скорости таяния (>4 мм) были 26-27 и 29-30 июля, а также 11-15 августа.

За период наблюдений альbedo варьировало от 0.03 до 0.97 (среднее значение 0.47 ± 0.22). Наблюдалось два режима альbedo связанных со сменой снежной поверхности на ледяную в районе метеостанции. С 7 июля по 7 августа (снег) альbedo было выше и менее изменчивым (среднее значение 0.57, коэффициент вариации 0.29), а с 8 по 23 августа (лед) альbedo было ниже и более вариabельным (среднее значение 0.21, коэффициент вариации 0.52). Сильная изменчивость альbedo на леднике обусловлена влиянием метаморфизма снега и его постепенным загрязнением обломочным материалом поступающим с окружающих горных склонов в течение лета (см. тренд уменьшения альbedo с градиентом $-0.13/10$ дней на Рис. 3а), а также летними снегопадами (см. выраженные пики альbedo на Рис. 3а).

Температура воздуха отчетливо отражает как суточную, так и синоптическую (5-10 дней) изменчивость (Рис. 3б). В целом, с уменьшением альbedo и повышением температуры воздуха наблюдается увеличение скорости таяния. При этом связь между 30-минутными значениями таяния и температуры воздуха довольно слабая, но статистически значимая ($R^2 = 0.25$, $n = 2304$, $p < 0.001$).

На Рисунке 4 показан осредненный суточный цикл таяния по энергобалансовой модели за период наблюдений в сравнении с приходящей коротковолновой радиацией и температурой воздуха. В суточном цикле скорость таяния резко увеличивается с 5 до 11 часов (максимум среднего суточного таяния 1,9 мм), а затем резко снижается до 18 часов. В вечернее и ночное время таяние не превышает 0.2 мм/30мин, хотя температура воздуха выше 4°C. Суточный цикл таяния в большей степени согласуется с солнечной радиацией (более выраженный

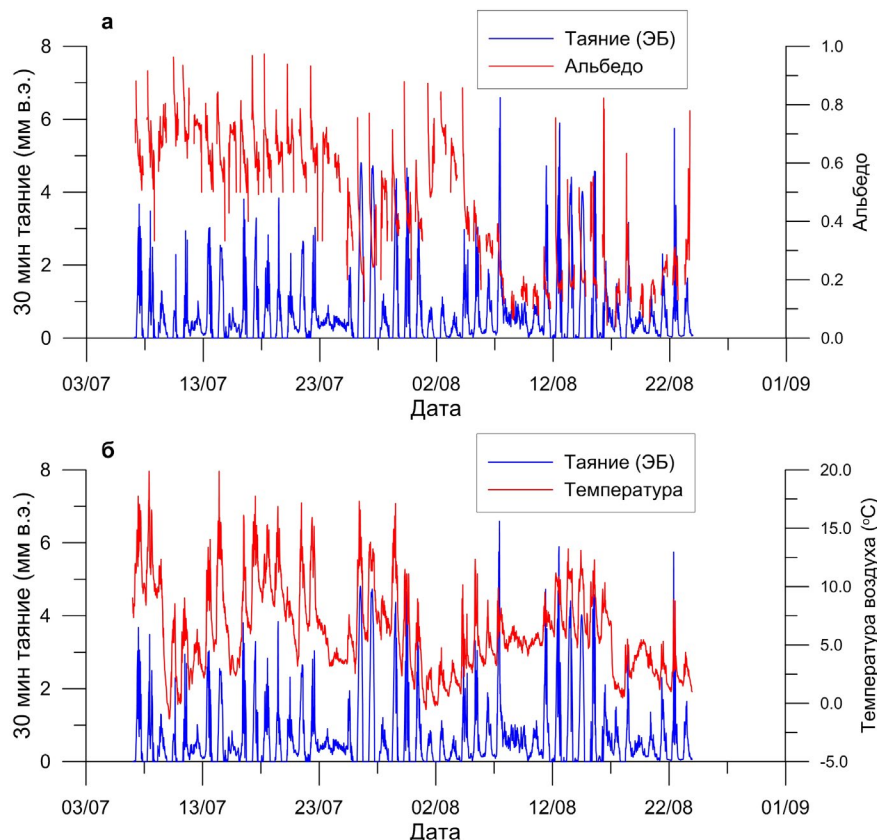


Рис.3. 30-минутные значения скорости таяния рассчитанные с помощью энергетического баланса (ЭБ) за период 7 июля – 23 августа 2021 г. в сравнении со значениями альбедо (а) и температуры воздуха (б).

дневной пик), чем с температурой, суточный ход которой более сглажен.

Средние значения потоков энергии, вклад разных источников тепла в таяние и связь с температурой воздуха приведены в Таблице 1. Коротковолновый баланс является основным источником энергии таяния (93%). Длинноволновый баланс ледниковой поверхности был отрицательным, поэтому радиационный баланс, в среднем, энергетически обеспечивал 87% таяния. Явное и

скрытое турбулентное тепло являются второстепенными источниками энергии таяния и вместе составляют 12%. На тепло, поступающее с жидкими атмосферными осадками, приходилось менее 2%. Связи температуры воздуха с большинством энергетических источников таяния статистически значимые, но не очень сильные (Таблица 1). Наиболее тесная связь наблюдается между температурой и потоками приходящей и отраженной коротковолновой радиации ($R^2=0.36-0.38$). Однако связь температуры с

Таблица 1. Средние значения 30-минутных значений потоков энергии* на ледниковой поверхности, их вклад в таяние и связь с температурой воздуха за период 7.07–20.08.2021 г. (n = 2304)

Параметр	Значение (Вт/м ²)	Вклад в таяние (%)	Связь с температурой (R^2)
Приходящая коротковолновая радиация (S_{in})	143.5	177.8	0.38
Отраженная коротковолновая радиация (S_{out})	−68.1	−84.4	0.36
Приходящая длинноволновая радиация (L_{in})	310.3	384.5	0.09
Исходящая длинноволновая радиация (L_{out})	−315.6	−391.1	–
Коротковолновый баланс (S_{net})	75.4	93.4	0.28
Длинноволновый баланс (L_{net})	−5.3	−6.6	0.09
Радиационный баланс (R_{net})	70.0	86.7	0.22
Явное тепло (H)	5.1	6.3	0.01
Скрытое тепло (LE)	4.5	5.6	0.00
Турбулентные потоки тепла (H + LE)	9.6	11.9	0.00
Тепло, приносимое жидкими осадками (Q_r)	1.3	1.6	0.01
Теплообмен с ледником (Q_g)	−0.34	−0.4	–
Тепловой эквивалент таяния (Q_m)	−80.7	−100.0	0.22

Примечание: * Потоки, приносящие тепло к ледниковой поверхности, имеют положительные значения, а отводящие тепло от нее – отрицательные. Статистически значимые связи ($p < 0.05$) выделены жирным.

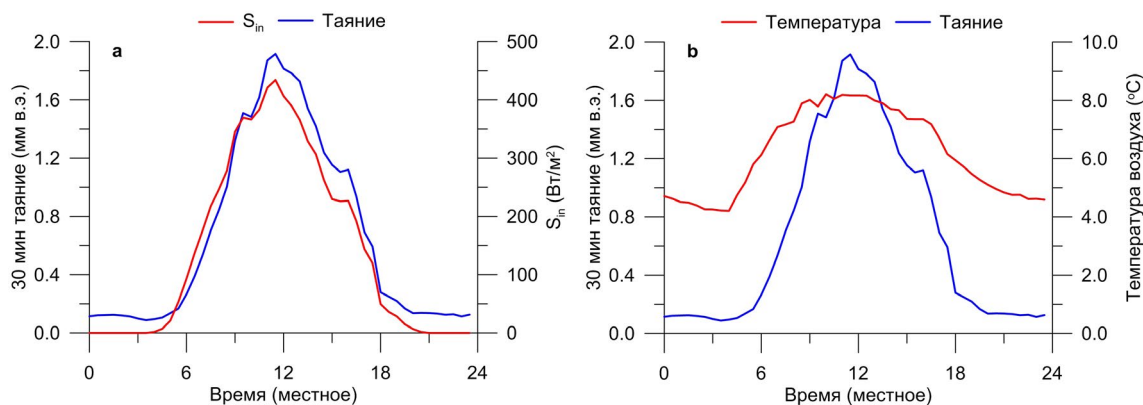


Рис.4. Суточный цикл скорости таяния рассчитанного с помощью энергетического баланса в сравнении с приходящей коротковолновой радиацией S_{in} (а) и температурой воздуха (б). Данные осредненные за период 7 июля – 23 августа 2021 г.

длинноволновой радиацией и турбулентными потоками очень слабо выражена. Связь температуры с энергетическим балансом поверхности ледника также довольно умеренная ($R^2 = 0.22$).

6.2. Оценка производительности Т-индексных моделей

В Таблице 2 показаны характеристики эффективности двух Т-индексных моделей в сравнении с эталонной энергетической моделью таяния (SEB). Графически это показано на Рисунке 5. Простая Т-индексная модель (ТМ) довольно грубо характеризует скорость абляции ледника. В то же время использование коротковолновой радиации в улучшенной Т-индексной модели (ЕТМ) существенно повышает точность моделирования таяния (средняя квадратическая ошибка меньше в 3 раза). Модель ТМ немного завышает среднюю и суммарную абляцию и плохо воспроизводит суточные колебания скорости таяния. В то же время модель ЕТМ немного занижает среднюю скорость таяния и суммарную абляцию, однако очень хорошо воспроизводит суточные колебания таяния.

Наилучшим образом обе температурные модели воспроизводят таяние ледяной поверхности ледника (Таблица 3). Особенно это характерно для модели ЕТМ, учитывающей радиационный фактор более точно. Использование коэффициентов таяния различных для снега и льда в модели ТМ учиты-

вает радиационный фактор (через альbedo снега и льда) довольно грубо, а в модели ЕТМ солнечная радиация непосредственно включена в модель. В целом модель ЕТМ объясняет около 90% изменений скорости таяния, рассчитанного по 30-минутным интервалам с помощью модели энергетического баланса, в то время как модель ТМ объясняет лишь около 30%. Столь высокая эффективность модели ЕТМ делает ее практически идеальной для использования в зоне абляции ледников Кодара. Средняя скорость таяния льда по сравнению со снегом в модели ТМ была на 10% больше, а в модели ЕТМ на 6% больше. Однако в точке измерения суммарное таяние снега превышало таяние льда в 1.8–1.9 раз за счет более продолжительного периода залегания снежного покрова по сравнению с открытым льдом (32 и 13 дней, соответственно).

На Рисунке 6 показано сравнение суточных циклов температурных моделей с эталонным таянием. Видно, что модель ТМ хорошо оценивает среднее суточное таяние, но плохо воспроизводит суточный цикл таяния. В среднем, она недооценивает дневное таяние (на 48% от эталонного) и сильно переоценивает ночное (на 460%). Очевидно это связано с временной изменчивостью коэффициентов таяния, которая совсем не учитывается моделью. В отличие от модели ТМ модель ЕТМ очень хорошо воспроизводит суточный ход таяния, хотя максимальное таяние также немного недооценивается (90% от эталонного).

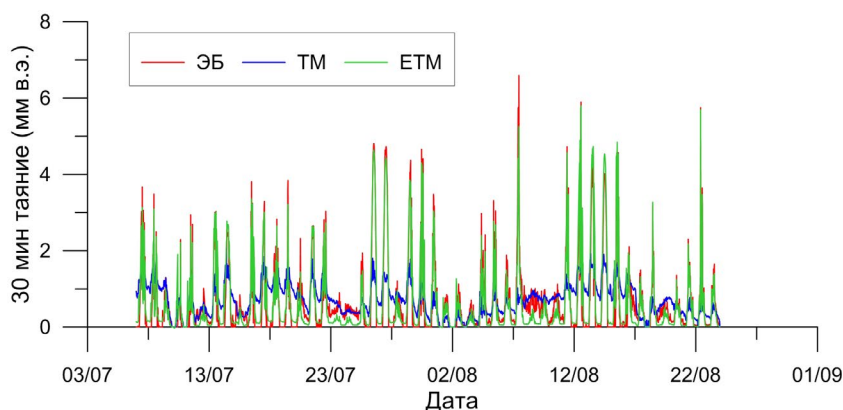


Рис.5. Сравнение 30-минутных скоростей таяния (мм в.э.) рассчитанных с помощью энергетического баланса (ЭБ), простой (ТМ) и улучшенной (ЕТМ) Т-индексных моделей.

Таблица 2. Характеристики эффективности Т-индексных моделей ТМ и ЕТМ в сравнении с моделью энергетического баланса (SEB) рассчитанные за период 7 июля – 23 августа 2021 г.

Модель	Суммарное таяние (мм в.э.)	Среднее значение таяния (мм в.э./30 мин)	Стандартное отклонение (мм в.э./30 мин)	Средняя квадратическая ошибка	R ²
SEB	1533	0.67	0.96	–	–
ТМ	1646	0.71	0.42	0.82	0.26
ЕТМ	1423	0.62	0.96	0.27	0.92

На интенсивность таяния влияет такой фактор как облачность. На Рисунке 7 показаны значения 30-минутного таяния при разных условиях общей облачности. Например, 23-24 июля были пасмурными днями (облачность в дневное время составляла 100%), а 26-27 июля солнечными (облачность 0-25%). Видно, что в облачных условиях модель ЕТМ занижает абляцию (30% от энергетической модели), а модель ТМ немного завышает ее (111%). В безоблачных условиях, наоборот, модель ЕТМ немного завышает абляцию (107%), а модель ТМ сильно занижает ее (64%). В целом, с увеличением общей облачности (выше 65%) модель ТМ имеет тенденцию завышать абляцию, а модель ЕТМ, наоборот, занижать ее.

6.3. Оценка чувствительности параметров Т-индексных моделей

Для оценки чувствительности мы меняли параметры DDF, TF и SRF относительно оптимального значения с шагом 10%. При этом один из параметров изменялся (DDF снега или DDF льда, TF или SRF), а другой сохранял свое оптимальное значение. На Рисунке 8а показано влияние изменений параметра DDF на производительность модели ТМ. Видно, что модель примерно одинаково чувствительна к значениям DDF снега и льда, хотя для DDF льда чувствительность немного выше. Суммарное таяние наиболее чувствительно к изменению DDF снега (Рис. 8б). Это объясняется более продолжи-

тельным периодом залегания снежного покрова по сравнению с открытым льдом.

Чувствительность модели ЕТМ показана на Рисунке 9. Видно, что наиболее чувствительным параметром данной модели является радиационный параметр SRF.

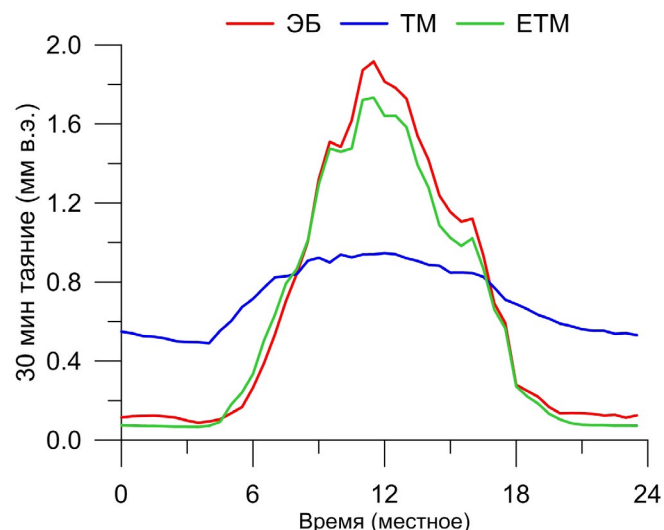
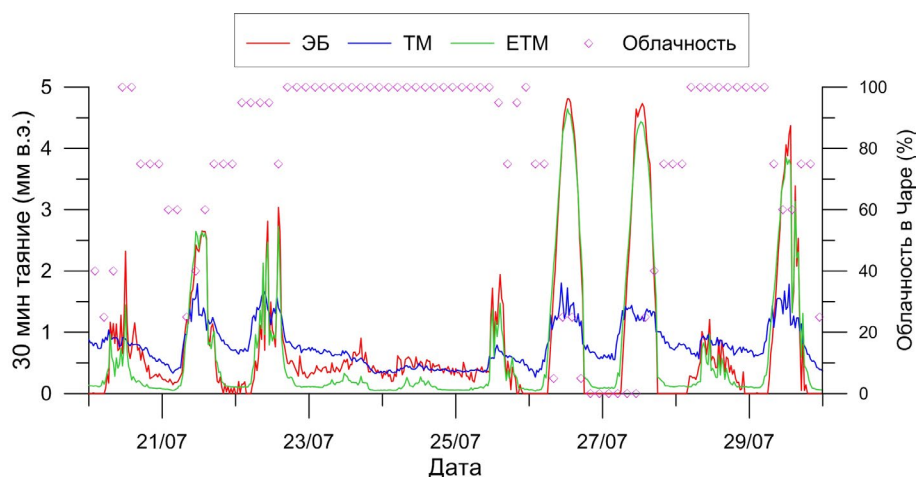
**Рис. 6.** Сравнение осредненных суточных циклов 30-минутной скорости таяния (мм в.э.) рассчитанных с помощью энергетического баланса (ЭБ), простой (ТМ) и улучшенной (ЕТМ) температурных моделей.**Рис. 7.** Сравнение 30-минутных скоростей таяния (мм в.э.) рассчитанных с помощью энергетического баланса (ЭБ), простой (ТМ) и улучшенной (ЕТМ) Т-индексных моделей при разных условиях облачности за период 20-30 июля 2021 г. Данные по общей облачности (%) на ближайшей метеостанции Чара.

Таблица 3. Параметры таяния и критерий эффективности (R^2) температурных моделей (в сравнении с моделью энергетического баланса) рассчитанные отдельно для снега и льда в точке метеостанции.

Модель	Среднее значение таяния (мм/30 мин)		Суммарное таяние (мм)		Эффективность R^2	
	снег	лед	снег	лед	снег	лед
SEB	0.65	0.69	1001	532	–	–
TM	0.69	0.76	1062	584	0.25	0.28
ETM	0.61	0.64	930	494	0.92	0.92

7. Обсуждение результатов

Исследования проведенные на Сыгьктинском леднике показывают наличие умеренной статистически значимой положительной связи между 30-минутными значениями температуры воздуха и скоростью таяния снега и льда ($R^2 = 0.25$), что согласуется с результатами полученными ранее на основе средних суточных данных (Осипов и Осипова, 2024). Это существенно ограничивает использование простых температурных моделей при моделировании таяния ледников Кодара. Возможным объяснением относительно слабой связи между температурой воздуха и таянием является в целом невысокий вклад основных энергетических потоков таяния в температуру воздуха, что выражается довольно слабыми корреляциями между этими параметрами. Наиболее тесно температура связана с коротковолновой радиацией, однако радиационный фактор объясняет не более 40% температурной изменчивости. Считается, что длинноволновое излучение вместе с явным тепловым потоком (3/4 всей энергии таяния) сильно зависят от температуры воздуха над ледником и определяют физический механизм связи между таянием с температурой воздуха (Ohmura, 2001). Однако наши исследования показали отсутствие связи между температурой воздуха и длинноволновой радиацией ($R^2 = 0.09$) и турбулентными потоками ($R^2 = 0.01$) на Сыгьктинском леднике. Ослабление связи между температурой и длинноволновой радиацией может быть обусловлено влиянием влагосодержания приледникового слоя воздуха на относительно высокую излучательную способность атмосферы (Ebrahimi and Marshall, 2015). С другой стороны турбулентный тепло-

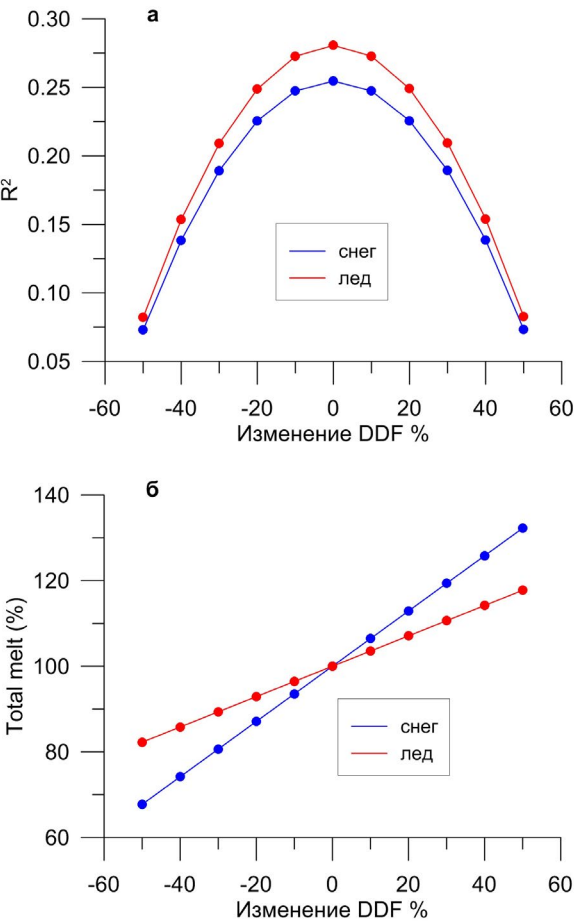


Рис.8. Чувствительность модели TM к температурным коэффициентам таяния (DDF) снега и льда выраженная в виде критерия эффективности R^2 (а) и относительного изменения суммарного сезонного таяния (б). Шаг изменения DDF 10%.

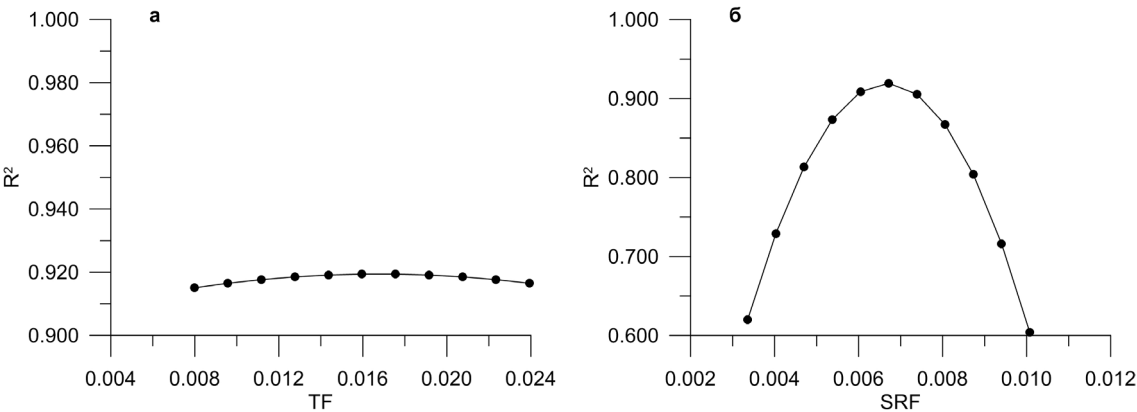


Рис.9. Чувствительность модели ETM (критерий эффективности R^2) к значениям TF (а) и SRF (б). Шаг изменения обоих параметров 10%.

бмен на Сыгьктинском леднике в значительной мере контролируется не температурой, а скоростью ветра (Osipov and Osipova, 2021). Летний период на леднике характеризуется незначительными скоростями ветра, что объясняется преобладанием малоградиентного барического поля (Osipova and Osipov, 2022).

Около 90% энергии таяния Сыгьктинского ледника приходится на радиационный баланс и главным образом, коротковолновую радиацию. Поэтому введение радиационных параметров в температурные модели таяния существенно улучшает их точность. Улучшенная модель представленная в данной работе помимо температуры учитывает также приходящую коротковолновую радиацию и альбедо и объясняет около 90% изменчивости скорости таяния, что в 3 раза превышает значения эффективности классической Т-индексной модели (около 30%). Полученные оценки эффективности улучшенной модели (ETM) хорошо согласуются с данными из других ледниковых районов. Например, на леднике д'Аролла (Швейцария) улучшенная Т-индексная модель с двумя дополнительными параметрами (коротковолновая радиация и альбедо) объяснила до 95% изменчивости скорости таяния (Pellicciotti et al., 2005).

Простая Т-индексная модель хорошо оценивает среднее суточное таяние, однако она плохо воспроизводит суточный цикл таяния. Это объясняется тем, что простая модель не учитывает изменчивость температурного коэффициента таяния во времени. Например, исследования на леднике Сторгласиарен (Швеция) показали, что эти коэффициенты подвержены отчетливым суточным циклам, при этом в течение суток их значения могут колебаться от 0 до 15 мм/сутки °C (Hock, 1999). При постоянном коэффициенте скорость таяния завышается в ночное время и занижается в дневное, то есть суточные амплитуды скорости таяния существенно занижаются (Рис. 6). В отличие от простых Т-индексных моделей (Ohmura, 2001; Hock, 2003) модель ETM позволяет моделировать изменения таяния с гораздо более высоким временным разрешением (в масштабе суточного цикла). Кроме того, эта модель намного точнее учитывает изменения альбедо ледниковой поверхности, которое является важным фактором таяния требующим учета в температурных моделях (Lang and Braun, 1990). Простая Т-индексная модель учитывает альбедо довольно грубо с помощью коэффициентов таяния рассчитываемых отдельно для снега и льда (Осипов и Осипова, 2024). При этом в простой модели совершенно не учитываются изменения альбедо связанные с метаморфизмом снега и летними снегопадами, а также загрязнением снежной поверхности материалом поступающим с горных склонов на ледник. Наши исследования на леднике показали, что такая изменчивость альбедо имеет место в летний период.

Изменчивость температуры воздуха кроме радиационной составляющей имеет также и адвективную компоненту. Например, данное исследова-

ние подтвердило вывод о том, что на Сыгьктинском леднике отчетливо прослеживаются изменения температуры воздуха с периодичностью от 3 до 12 дней (Осипов и др., 2021). Эти изменения, очевидно, обусловлены разномасштабными атмосферными процессами (синоптическими) в нижней тропосфере. Соответственно, изменчивость типов погоды должна влиять на относительный вклад разных компонентов энергетического баланса в таяние и вариabельность температурных коэффициентов (Lang and Braun, 1990). Поэтому, использование дополнительных синоптических параметров в Т-индексных моделях должно способствовать улучшению эффективности моделирования таяния ледника.

8. Заключение

Был проведен сравнительный анализ двух температурных моделей таяния снега и льда на Сыгьктинском леднике (хребет Кодар) за сезон абляции 2021 г. Модели были откалиброваны и протестированы с помощью 30-минутного таяния, рассчитанного для одной точки ледника с помощью физически обоснованной модели энергетического баланса на основе прямых метеорологических измерений. Измерения проводились с помощью 3-х автоматических метеостанций установленных на леднике и конечной морене. Кроме того, абляция измерялась с помощью ультразвукового датчика понижения поверхности ледника с 30-минутным разрешением. Сравнение измеренных значений абляции с рассчитанными по модели энергетического баланса показало их хорошую согласованность. Оценка компонентов энергетического баланса ледника в период абляции показала, что наибольший вклад в таяние вносит баланс коротковолновой радиации (93%). Корреляционный анализ показал наличие статистически значимой, но слабой связи между температурой и таянием ($R^2=0.25$), что объясняется незначительным вкладом составляющих энергетического баланса в температурную изменчивость (до 40%). Классическая температурная модель (ТМ), использующая температуру воздуха в качестве параметра объясняет не более 30% изменчивости абляции. При этом модель имеет тенденцию переоценивать ночное таяние и недооценивать дневное таяние. Улучшенная Т-индексная модель (ETM), учитывающая температуру, приходящую коротковолновую радиацию и альбедо показала наилучшую эффективность при расчете скорости таяния и объяснила около 90% его изменчивости. В отличие от модели ТМ модель ETM хорошо воспроизводит суточный ход таяния. Включение в Т-индексную модель дополнительных параметров не зависящих от температуры (коротковолновая радиация и альбедо) существенно улучшает ее эффективность и временное разрешение. Улучшенная модель может быть использована для пространственного моделирования абляции ледников Кодара, а также других ледников расположенных внутри континента со значительным вкладом коротковолновой радиации в таяние.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00165, <https://rscf.ru/project/24-27-00165/>. Авторы благодарят В.С. Рыжего, С.Д. Логвиненко, И.В. Енущенко и В.А. Исаева за помощь в проведении экспедиционных работ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Осипов Э.Ю., Осипова О.П., Василенко О.В. 2021. Метеорологический режим Сыгьтинского ледника (хребет Кодар) в период абляции. Лёд и снег 61 (2): 179-194. DOI: [10.31857/S2076673421020080](https://doi.org/10.31857/S2076673421020080)
- Осипов Э.Ю., Осипова О.П. 2024. Измерение и моделирование абляции на Сыгьтинском леднике (хребет Кодар). Лёд и Снег 64 (3): 358-372. DOI: [10.31857/S2076673424030045](https://doi.org/10.31857/S2076673424030045)
- Осипова О.П., Осипов Э.Ю. 2023. Влияние атмосферных процессов на динамику ледников Кодара. География и природные ресурсы 44 (4): 99-107. DOI: [10.15372/GIPR20230410](https://doi.org/10.15372/GIPR20230410)
- Braithwaite R.J. 1981. On glacier energy balance, ablation, and air temperature. *Journal of Glaciology* 27 (97): 381-391. DOI: [10.3189/S0022143000011424](https://doi.org/10.3189/S0022143000011424)
- Ebrahimi S., Marshall S.J. 2015. Parameterization of incoming longwave radiation at glacier sites in the Canadian Rocky Mountains. *Journal of geophysical research: Atmospheres* 120 (24): 12536-12556. DOI: [10.1002/2015JD023324](https://doi.org/10.1002/2015JD023324)
- Hock R. 1999. A distributed temperature-index ice-and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology* 45 (149): 101-111. DOI: [10.3189/S0022143000003087](https://doi.org/10.3189/S0022143000003087)
- Hock R. 2003. Temperature index melt modelling in mountain areas. *Journal of hydrology* 282 (1-4): 104-115. DOI: [10.1016/S0022-1694\(03\)00257-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00257-9)
- Hock R., Holmgren B. 2005. A distributed surface energy-balance model for complex topography and its application to Storglaciären, Sweden. *Journal of Glaciology* 51 (172): 25-36. DOI: [10.3189/172756505781829566](https://doi.org/10.3189/172756505781829566)
- Lang H., Braun L. 1990. On the information content of air temperature in the context of snow melt estimation. *IAHS Publ.* 190: 347-354.
- Mölg T., Hardy D.R. 2004. Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 109 (D16): 1-13. DOI: [10.1029/2003JD004338](https://doi.org/10.1029/2003JD004338)
- Müller F., Keeler C.M. 1969. Errors in short-term ablation measurements on melting ice surfaces. *Journal of Glaciology* 8 (52): 91-105. DOI: [10.3189/S0022143000020785](https://doi.org/10.3189/S0022143000020785)

Munro D.S. 1990. Comparison of melt energy computations and ablatometer measurements on melting ice and snow. *Arctic and Alpine Research* 22 (2): 153-162. DOI: [10.1080/00040851.1990.12002777](https://doi.org/10.1080/00040851.1990.12002777)

Nash J.E., Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of hydrology* 10 (3): 282-290. DOI: [10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Ohmura A. 2001. Physical basis for the temperature-based melt-index method. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 40 (4): 753-761. DOI: [10.1175/1520-0450\(2001\)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<0753:PBFTTB>2.0.CO;2)

Osipov E.Y., Osipova O.P. 2014. Mountain glaciers of southeast Siberia: current state and changes since the Little Ice Age. *Annals of Glaciology* 55 (66): 167-176. DOI: [10.3189/2014AoG66A135](https://doi.org/10.3189/2014AoG66A135)

Osipov E.Y., Osipova O.P. 2015. Glaciers of the Levaya Sygkta River watershed, Kodar Ridge, southeastern Siberia, Russia: modern morphology, climate conditions and changes over the past decades. *Environmental Earth Sciences* 74 (3): 1969-1984. DOI: [10.1007/s12665-015-4352-4](https://doi.org/10.1007/s12665-015-4352-4)

Osipov E.Y., Osipova O.P. 2019. Reconstruction of the Little Ice Age glaciers and equilibrium line altitudes in the Kodar Range, southeast Siberia. *Quaternary International* 524: 102-114. DOI: [10.1016/j.quaint.2018.11.033](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.033)

Osipov E.Y., Osipova O.P. 2021. Surface energy balance of the Sygktsky Glacier, south Eastern Siberia, during the ablation period and its sensitivity to meteorological fluctuations. *Scientific Reports* 11 (1): 21260. DOI: [10.1038/s41598-021-00749-x](https://doi.org/10.1038/s41598-021-00749-x)

Osipova O.P., Osipov E.Y. 2022. Objective classification of weather types for the Eastern Siberia over the 1970–2020 period using the Jenkinson and Collinson method. *Atmospheric Research* 277: 106291. DOI: [10.1016/j.atmosres.2022.106291](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106291)

Pellicciotti F., Brock B., Strasser U. et al. 2005. An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology* 51 (175): 573-587. DOI: [10.3189/172756505781829124](https://doi.org/10.3189/172756505781829124)

Stokes C., Shahgedanova M., Evans I. et al. 2013. Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia. *Global and Planetary Change* 101: 82-96. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2012.12.010](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.12.010)

Sun W., Qin X., Ren J. et al. 2012. The Surface Energy Budget in the Accumulation Zone of the Laohugou Glacier No. 12 in the Western Qilian Mountains, China, in Summer 2009. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 44 (3): 296-305. DOI: [10.1657/1938-4246-44.3.296](https://doi.org/10.1657/1938-4246-44.3.296)

van den Broeke M., van As D., Reijmer C., van de Wal R. 2004. Assessing and improving the quality of unattended radiation observations in Antarctica. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 21 (9): 1417-1431. DOI: [10.1175/1520-0426\(2004\)021<1417:AAITQO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2004)021<1417:AAITQO>2.0.CO;2)

Wagnon P., Sicart J.-E., Berthier E. et al. 2003. Wintertime high-altitude surface energy balance of a Bolivian glacier, Illimani, 6340 m above sea level. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 (D6): 1-14. DOI: [10.1029/2002JD002088](https://doi.org/10.1029/2002JD002088)