

УДК 519.6

Поступила в редакцию 17.10.2025
Received 17.10.2025

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Г. П. Бровка, К. А. Агутин, И. Н. Дорожок

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. В статье представлены две прикладные программы для моделирования температурного режима деятельного слоя территории белорусской антарктической станции, одна из которых служит для моделирования температурного режима на горизонтальных поверхностях, а вторая учитывает наклон поверхности и связанные с ним особенности. Расчетная схема программы для горизонтальных поверхностей построена на трехмерной ортогональной сетке. Для программы, учитывающей наклон поверхности, используется трехмерная неортогональная сетка. В численных моделях обоих вариантов программ учитывается зависимость фазового состава воды и теплофизических характеристик верхнего слоя пород от температуры. В программах учтено формирование граничных условий на поверхности территории, обусловленных метеорологическими условиями. В частности, в программе для склоновых поверхностей учтено влияние угла наклона на суточный ход плотности потока солнечной радиации.

Проведено тестирование разработанных программ на эталонных моделях и путем сравнения данных, полученных с помощью мониторинга температурного режима на контрольных площадках, с данными численного моделирования по разработанным программам. Получено удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: прикладная программа, моделирование температурного режима, трехмерная неортогональная сетка, теплофизические характеристики горных пород, фазовые переходы воды в лед, мониторинг температурного режима.

Для цитирования. Бровка Г. П., Агутин К. А., Дорожок И. Н. Прикладные программы для моделирования температурного режима деятельного слоя территории белорусской антарктической станции // Природопользование. – 2025. – № 2. – С. 46–61.

APPLICATION PROGRAMS FOR SIMULATION THE TEMPERATURE REGIME OF THE ACTIVE LAYER OF THE VICINITY OF THE BELARUSIAN ANTARCTIC STATION

G. P. Brovka, K. A. Agutin, I. N. Dorozhok

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Минск, Belarus

Abstract. This paper introduces two applied tools designed to simulate the thermal regime of the active layer in the vicinity of the Belarusian Antarctic station. The first program focuses on temperature dynamics over horizontal surfaces, while the second incorporates the effects of surface inclination and its specific features. The horizontal-surface model employs a three-dimension orthogonal grid, whereas the slope-oriented model is based on a three-dimensional non-orthogonal mesh. Both approaches account for the temperature-dependent phase composition of water and the thermo-physical properties of the upper soil layer. Boundary conditions are formulated using meteorological inputs, including air temperature, wind speed, and solar radiation. In the slope model, particular attention is given to the influence of surface angle on the diurnal variation of incoming solar flux.

The developed tools were tested against benchmark models and validated through comparison with field monitoring data collected at control sites. The numerical simulations demonstrated satisfactory agreement with the observed temperature profiles, confirming the reliability of the proposed methodology.

Keywords: application program, temperature regime simulation, three-dimensional non-orthogonal grid, thermo-physical characteristics of rocks, phase transitions of water into ice, temperature regime monitoring.

For citation. Brovka G. P., Agutin K. A., Dorozhok I. N. Application programs for simulation the temperature regime of the active layer of the vicinity of the Belarusian Antarctic station. *Nature Management*, 2025, no. 2. pp. 46–61.

Введение. Мониторинг температурного режима верхнего слоя территории, как и всякий другой мониторинг по определению академика Ю. А. Израэля [1], должен включать этап моделирования. С одной стороны, моделирование должно основываться на данных и закономерностях, выявленных в процессе мониторинга, а с другой – оно позволяет более полно реализовать и дополнить мониторинг. Этот общий подход положен в основу методологии проведения исследований по мероприятию А-7 «Провести мониторинг энергообмена в деятельном слое Земной поверхности для оценки изменения температурного режима и развития негативных геокриологических процессов в районе расположения белорусской антарктической станции (Гора Вечерняя)» подпрограммы «Развитие деятельности белорусской антарктической станции» Государственной программы «Научно-инновационная деятельность Национальной академии наук Беларуси» на 2021–2025 годы.

Неоднородности рельефа территории белорусской антарктической станции обусловили разработку двух прикладных программ для моделирования температурного режима деятельного слоя территории белорусской антарктической станции. При этом первая прикладная программа в основном построена на ранее отработанных стандартных элементах численных решений задач с фазовыми переходами воды в лед в горных породах методом контрольного объема на трехмерной ортогональной сетке [2, 3]. Эта программа рассчитана на моделирование температурного режима на горизонтальных поверхностях территории и учитывает стандартные метеорологические условия [4]. Вторая прикладная программа учитывает особенности неоднородного рельефа [5] с помощью трехмерной неортогональной сетки, а также влияние угла наклона на суточный ход плотности потока солнечной радиации [6].

Вариант прикладной программы для моделирования температурного режима на горизонтальных поверхностях территории. Расчет трехмерных температурных полей при фазовых переходах вода – лед представляет собой сложную задачу, особенно при локализации фазовых переходов в узком температурном диапазоне. Такие задачи рационально решать в энтальпийной постановке, используя нелинейную зависимость эффективной теплоемкости от температуры, согласованную с фактической зависимостью количества незамерзшей воды во всем рассматриваемом диапазоне:

$$\frac{\partial H(t)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(t) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(t) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$H(t) = \int_0^t \left[C_a(t) + \rho_{ск} \frac{\partial W_H(t)}{\partial t} L \right] dt, \quad (2)$$

где $H(t)$ – объемная энтальпия, Дж/м³; $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности породы; $T(x, y, z, \tau)$ – температура, °C; x, y, z – декартовы координаты, м; C_a – объемная аддитивная теплоемкость, Дж/(м³·K); $W_H(t)$ – количество незамерзшей воды, кг/кг; $\rho_{ск}$ – плотность скелета породы, кг/м³; L – теплота фазового перехода воды в лед, Дж/кг; t – время, с.

Для решения применяются численные сеточные методы, основанные на алгоритме пошаговой коррекции температуры с учетом теплового баланса. Этот алгоритм универсален и не имеет принципиальных различий для одномерных и многомерных задач. Его суть заключается в проверке выполнения теплового баланса при переходе точки начала замерзания за временной шаг Δt .

Моделируемый объект – грунтовый массив в форме прямоугольного параллелепипеда размерами 100 м × 100 м × 20 м. Шаг сетки составляет: $\Delta x = 1$ м, $\Delta y = 1$ м, $\Delta z = 0,1$ м. Таким образом, число узлов по осям x и y равно 100, а по оси z – 200.

Граничные условия задаются следующим образом:

– верхняя граница – радиационный и конвективный тепловые потоки, рассчитываемые по метеоданным (температура воздуха, скорость ветра, суммарная солнечная радиация, зависящая от географической широты и высоты Солнца над горизонтом);

– боковые границы – условие теплоизоляции.

В качестве исходных характеристик грунта используются общая плотность, влагосодержание, температура начала замерзания, удельная теплоемкость скелета, коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого состояния. В процессе расчета дополнительно определяются количество незамерзшей воды, эффективные теплоемкости талого и мерзлого грунта, а также теплота фазового перехода вода – лед. Теплофизические параметры (теплоемкость, коэффициент теплопроводности) корректируются в зависимости от температуры и содержания незамерзшей воды.

Задача сводится к энтальпийной постановке задачи Стефана: определяется теплота фазового перехода на фронте промерзания и постоянной эффективной теплоемкости в зоне ниже температуры начала замерзания. Особенность алгоритма заключается в обратном вычислении температуры по изменяющемуся значению энтальпии в области ниже точки замерзания.

Теплофизические характеристики грунтов: ρ – общая плотность, кг/м³; W – влагосодержание, кг/кг; $T_{н.з.}$ – температура начала замерзания, °С; $c_{ск}$ – удельная теплоемкость скелета грунта, Дж/кг; λ_t, λ_m – коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта, Вт/(м К).

Расчет эффективной теплоемкости и энтальпии. Для песчано-гравелистых пород, какими является большинство рыхлых пород в районе расположения белорусской антарктической станции, основные фазовые переходы воды в лед происходят в диапазоне температуры до -1 °С. Поэтому расчет удельной эффективной теплоемкости проводится по нижеприведенным формулам.

Количество незамерзшей воды при -1 °С и -30 °С

$$W_n(T) = a_1(-T)^n + a_2, \quad (3)$$

где W_n – количество незамерзшей воды, кг/кг; a_1, a_2, n – эмпирические коэффициенты.

Плотность скелета

$$\rho_{ск} = \frac{\rho}{1+W}. \quad (4)$$

Удельная теплоемкость:

а) талого грунта:

$$c_{эф.т.} = c_w W + c_{ск}, \quad (5)$$

где c_w – удельная теплоемкость воды, Дж/кг;

б) мерзлого грунта:

$$c_{эф.м.} = \frac{(W_n(-30) - W_n(-1))L - c_l(W_n(-30) - W)(-30 - T_{н.з.})}{-30 - T_{н.з.}} + \frac{(c_w W_n(-30) + c_{ск})(-30 - T_{н.з.})}{-30 - T_{н.з.}}, \quad (6)$$

где c_l – удельная теплоемкость льда, Дж/кг; L – удельная теплота фазового перехода вода – лед, Дж/кг.

Теплота фазового перехода вода – лед, Дж/кг:

$$Q_f = (W - W_n(-1))L\rho_{ск}. \quad (7)$$

Расчет начальных значений энтальпии:

$$H_{i,j,k} = \begin{cases} (C_{эф.м.}\rho_{ск}(T_{i,j,k} - T_{н.з.}) - Q_f)\Delta V, & \text{если } T_{i,j,k} < T_{н.з.} \\ -Q_f\Delta V, & \text{если } T_{i,j,k} = T_{н.з.} \\ (C_{эф.т.}\rho_{ск}(T_{i,j,k} - T_{н.з.}))\Delta V, & \text{если } T_{i,j,k} > T_{н.з.} \end{cases}, \quad (8)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_t, & \text{если } H \geq 0 \\ \lambda_m, & \text{если } H < 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Расчет радиационного потока проводится согласно [5].

Склонение Солнца

$$S = \frac{23,5 \sin(D - 81,5) \pi}{183}, \quad (10)$$

где D – номер дня с начала года.

Высота Солнца над горизонтом

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin S + \cos \varphi \cdot \cos S \cdot \cos \left(\frac{2\pi\tau}{\Pi} \right), \quad (11)$$

где φ – географическая широта местности наблюдения; τ – время, отсчитываемое от полудня; Π – период вращения Земли (24 ч).

Суммарная солнечная радиация

$$I = I^* (0,944 - 0,063\tau_L) \sin h, \quad (12)$$

где I^* – солнечная постоянная ($I^* = 1,26$ кВт/м²); τ_L – параметр мутности атмосферы ($\tau_L = 2,4$); h – высота солнца над горизонтом, м.

Встречное излучение атмосферы

$$B_a = \sigma T_n^4 (a_1 + b_1 \sqrt{P_2}), \quad (13)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴)); T_n – абсолютная температура воздуха на высоте 2 м, К (из погодных данных); $a_1 = 0,526$; $b_1 = 0,065$; P_2 – парциальное давление водяного пара в миллибарах на высоте 2 м.

Излучение поверхности почвы

$$B_0 = \sigma T_n^4, \quad (14)$$

где T_n – абсолютная температура поверхности.

Радиационный поток [5]:

$$q_p = (1-r)I + d(B_a - B_0), \quad (15)$$

где r – альbedo поверхности; I – суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная), Вт/м²; d – поглощательная способность поверхности.

Расчет конвективного теплового потока.

Коэффициент конвективного теплообмена:

а) в ночное время:

$$\alpha_k = 4,0 + 2,0 V_n; \quad (16)$$

б) в дневное время:

$$\alpha_k = 8,5 + 2,0 V_n, \quad (17)$$

где V_n – скорость ветра, м/с (из погодных данных).

Конвективный тепловой поток

$$q_k = -\alpha_k T_n - T_n, \quad (18)$$

где α_k – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К); T_n – температура поверхности почвы, °С; T_n – температура воздуха на высоте 2 м, °С.

Общий внешний поток

$$q_{out} = q_p + q_k. \quad (19)$$

Расчет внутренних потоков:

$$q_{1,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (21)$$

$$q_{2,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (22)$$

$$q_{3,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (20)$$

$$q_{4,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (23)$$

$$q_{5,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}, \quad (24)$$

$$q_{6,i,j,k} = \frac{dy \cdot dz}{dx} (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) \frac{2\lambda_{i-1,j,k}\lambda_{i,j,k}}{\lambda_{i-1,j,k} + \lambda_{i,j,k}}. \quad (25)$$

Изменение энтальпии

$$\Delta H_{i,j,k} = (q_{1,i,j,k} + q_{2,i,j,k} + q_{3,i,j,k} + q_{4,i,j,k} + q_{5,i,j,k} + q_{6,i,j,k}) \Delta \tau. \quad (26)$$

Значения энтальпии на новом временном слое

$$\Delta H_{i,j,k}^{t+1} = H_{i,j,k}^t + \Delta H_{i,j,k}^t. \quad (27)$$

Значения температуры на новом временном слое

$$T_{i,j,k}^{t+1} = \begin{cases} \left(\frac{H_{i,j,k}^{t+1}}{c_{\text{эф.т.}} \rho_{\text{ск}} \Delta V} + T_{\text{н.з.}} \right), & \text{если } H_{i,j,k}^{t+1} \geq 0 \\ T_{\text{н.з.}}, & \text{если } -Q_{\phi} \Delta V \leq H_{i,j,k}^{t+1} < 0 \\ \left(\frac{H_{i,j,k}^{t+1} + Q_{\phi} \Delta V}{c_{\text{эф.м.}} \rho_{\text{ск}} \Delta V} + T_{\text{н.з.}} \right), & \text{если } H_{i,j,k}^{t+1} \geq -Q_{\phi} \Delta V \end{cases}. \quad (28)$$

Переход на следующий временной слой

$$\tau^{j+1} = \tau^j + \Delta \tau. \quad (29)$$

Разработанный модуль (рис. 1) предназначен для моделирования температурного поля горизонтального грунтового массива в районе белорусской антарктической станции «Гора Вечерняя». В его основу положен численный сеточный метод с алгоритмом коррекции пошагового изменения температуры на основании теплового баланса.

Вводная часть программы включает два блока: данные о характеристиках горных пород; метеоданные – альbedo, температуру воздуха и скорость ветра.

Метеоданные вводятся из Excel-файла (.xls) заданного формата (рис. 2).

Результатом расчета является трехмерный массив значений температуры, выводимый в таблицу. По умолчанию отображается вертикальный срез, позволяющий анализировать распределение температуры по глубине.

С помощью программы был проведен ряд расчетов на различные периоды времени, которые можно сравнить с данными натурных наблюдений (рис. 3, 4). Из приведенных результатов видна довольно близкая сходимость результатов расчета и наблюдения.

Температурное поле "Гора Вечерняя"

Характеристики горной породы

Общая плотность, кг/м³

Общее влагосодержание, кг/кг

Температура начала замерзания, град С

Удельная теплоемкость скелета, Дж/кг

Козф. теплопроводности мерзлой породы, Вт/(м*грС)

Козф. теплопроводности талой породы, Вт/(м*гр С)

Количество незамерзшей воды (t=-5), кг/кг

Количество незамерзшей воды (t=-30), кг/кг

Параметры метеоданных

Альbedo поверхности

Альbedo: снег - 0.8, сухая глинистая порода - 0.3
песок - 0.4, чернозем - 0.15, влажная почва - 0.05

Кол-во строк метеоданных

Шаг по времени в метеоданных (ч)

Метеоданные

	Дата	Время	№ дня года	Температура	Скорость ветра
	01.01.2025	0	1	-10.3	1.3
	01.01.2025	0.125	1	-8.03	1.3
	01.01.2025	0.25	1	-5.75	1.3
	01.01.2025	0.375	1	-3.48	1.3

Рис. 1. Общий вид входного интерфейса программы

Fig. 1. General view of the program input interface

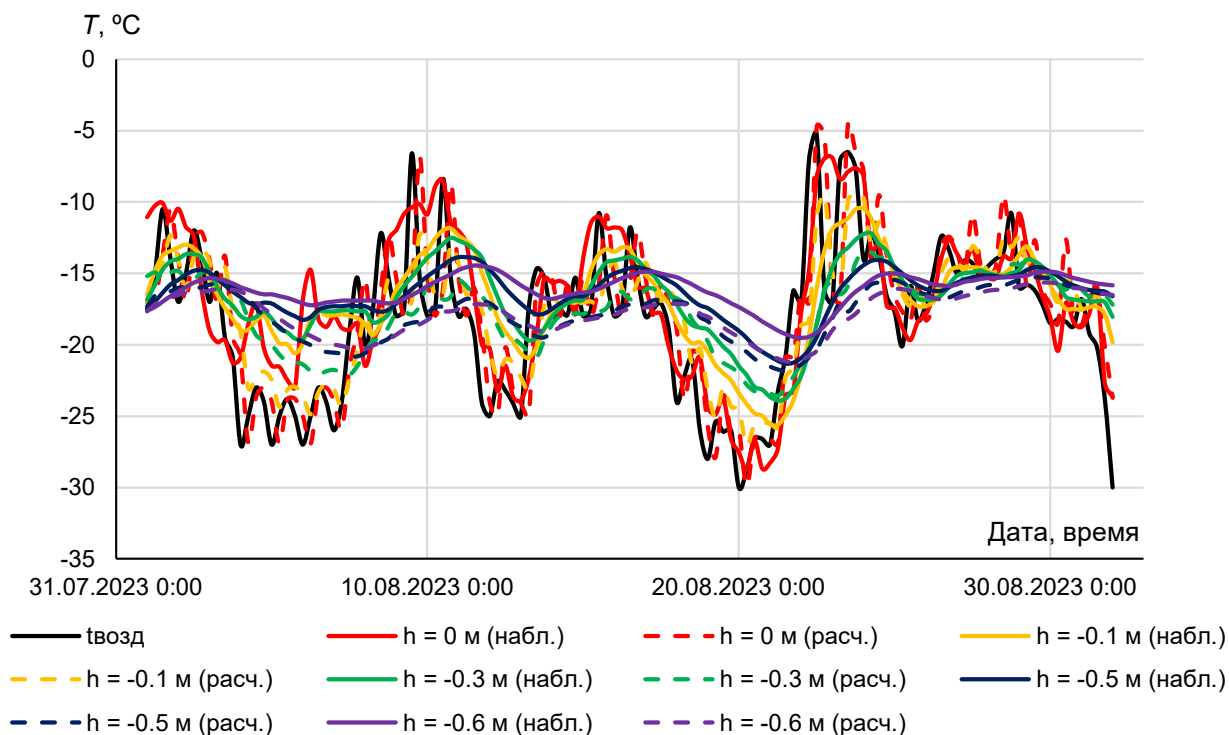
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	01.01.2025	0:00	1	-10.3	1.3				
2	01.01.2025	3:00	1	-8.03	1.3				
3	01.01.2025	6:00	1	-5.75	1.3				
4	01.01.2025	9:00	1	-3.48	1.3				
5	01.01.2025	12:00	1	-1.2	1.3				
6	01.01.2025	15:00	1	-3.28	1.3				
7	01.01.2025	18:00	1	-5.35	1.3				
8	01.01.2025	21:00	1	-7.43	1.3				
9	02.01.2025	0:00	2	-9.5	1.5				
10	02.01.2025	3:00	2	-7.5	1.5				
11	02.01.2025	6:00	2	-5.4	1.5				
12	02.01.2025	9:00	2	-3.3	1.5				
13	02.01.2025	12:00	2	-1.3	1.5				
14	02.01.2025	15:00	2	-3.3	1.5				
15	02.01.2025	18:00	2	-5.3	1.5				
16	02.01.2025	21:00	2	-7.3	1.5				
17	03.01.2025	0:00	3	-9.2	2.1				
18	03.01.2025	3:00	3	-7.3	2.1				
19	03.01.2025	6:00	3	-5.3	2.1				
20	03.01.2025	9:00	3	-3.3	2.1				
21	03.01.2025	12:00	3	-1.3	2.1				
22	03.01.2025	15:00	3	-4.2	2.1				
23	03.01.2025	18:00	3	-7.1	2.1				
24	03.01.2025	21:00	3	-10	2.1				

Рис. 2. Вид Excel-файла с метеоданными

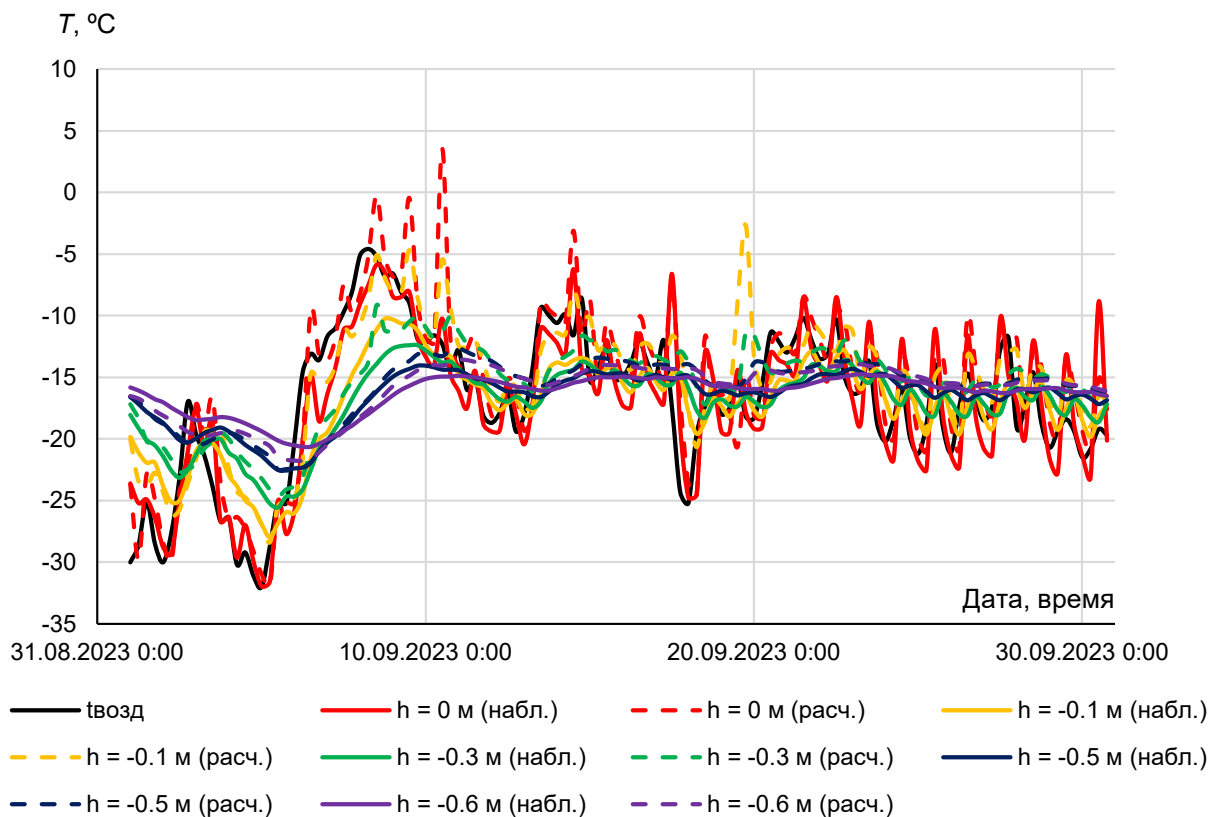
(столбцы: А – дата, В – время, С – номер дня года, D – температура воздуха, E – скорость ветра, м/с)

Fig. 2. View of an Excel file with meteorological data

(columns: A – date, B – time, C – day of the year number, D – air temperature, E – wind speed, m/s)



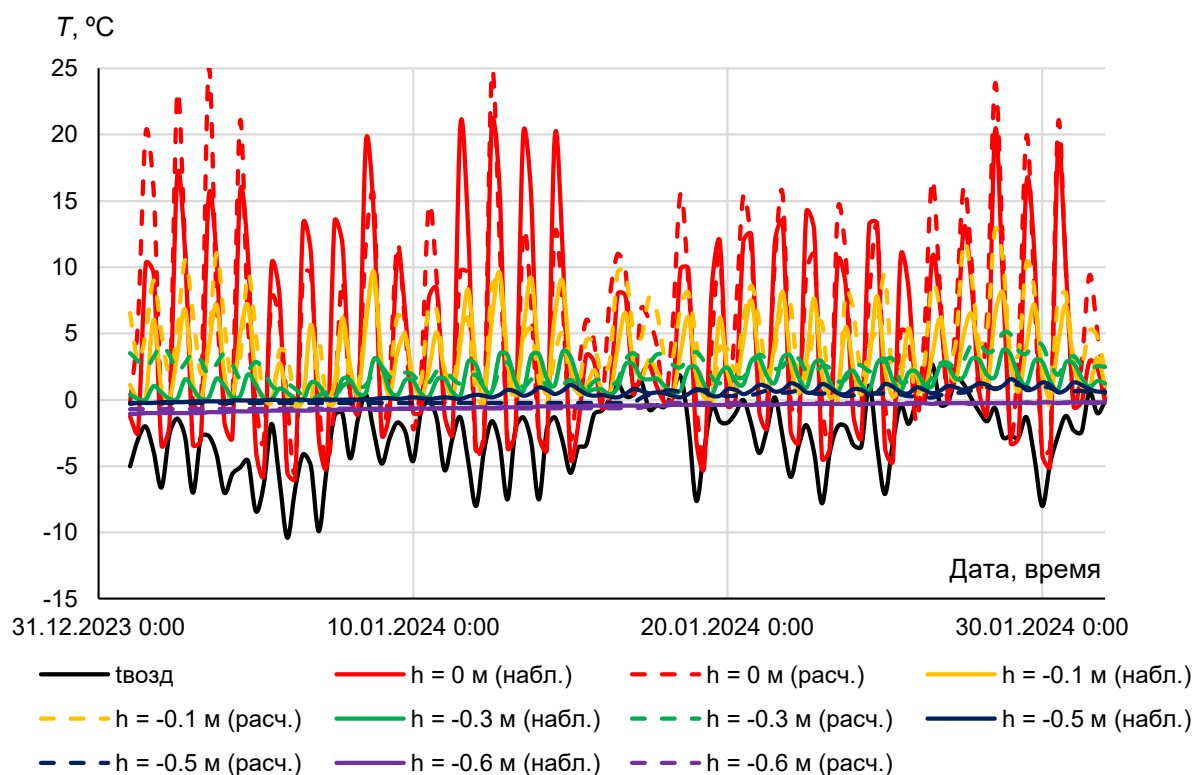
а (a)



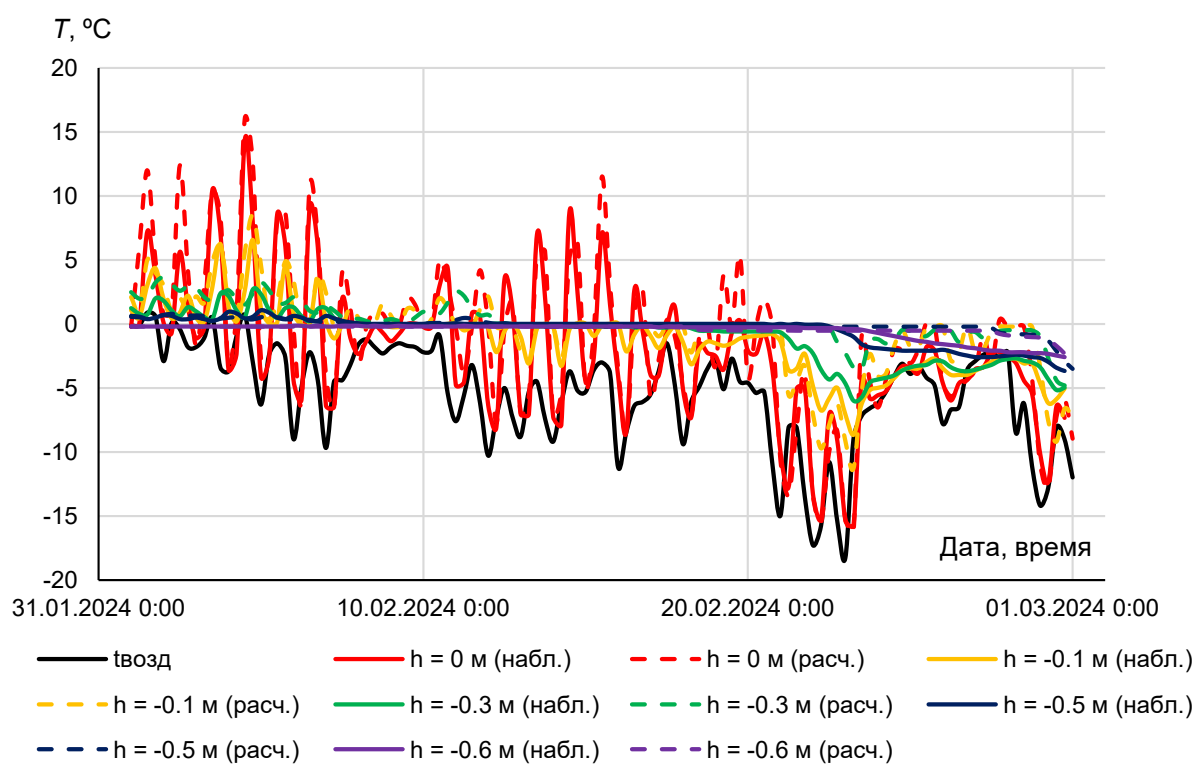
б (b)

Рис. 3. Сравнение натуральных и расчетных данных по температуре в августе (а) и сентябре (б) 2023 г.

Fig. 3. Comparison of actual and calculated temperature data for August (a) and September (b) 2023



а (а)



б (б)

Рис. 4. Сравнение натуральных и расчетных данных по температуре в январе (а) и феврале (б) 2024 г.

Fig. 4. Comparison of actual and calculated temperature data for January (a) and February (b) 2024

Особенности расчета температурного режима наклонных подстилающих поверхностей. Территория, прилегающая к белорусской антарктической станции, имеет перепад высот в направлении север – юг – 225 м, а в направлении запад – восток – 200 м. В глобальном масштабе количество солнечного излучения, полученного поверхностью, контролируется геометрией Земли, атмосферной проницаемостью и относительным размещением Солнца. В местном масштабе излучение изменяется из-за наклона поверхности, перспективы и возвышения. Выше была приведена методика расчета энергии солнечного излучения для горизонтальной поверхности. Для наклонной поверхности она требует доработки.

Анализ данных наблюдений за температурным режимом и развитием геокриологических процессов в компонентах природно-территориального комплекса белорусской антарктической станции показывает, что основным фактором, влияющим на указанные процессы, является динамика температурного поля в верхних слоях ледопородного покрова. При этом динамика температурного поля определяется в основном кондуктивным переносом тепла в ледопородном покрове и радиационно-конвективным теплообменом на поверхности ледопородного покрова. Следует обратить внимание, на тот факт, что в ясную погоду в весенне-летний период амплитуда колебаний температуры на поверхности ледопородного покрова достигает более 30 °С с нагревом поверхностного слоя до +25 °С. Это обуславливает существенные структурные преобразования в горных породах верхнего слоя, что приводит к ряду негативных геокриологических явлений, таких как криогенное выветривание, морозобойное растрескивание на склоне скальных пород, полигонально-трещинные образования, курумообразование, денудационно-карстовый палеорельеф с признаками ветровой эрозии и палеокарстовыми пустотами, солифлюкция на склонах, медальоны пучения на морене.

Для расчета располагаемого количества солнечной энергии, поступающего на наклонную поверхность, необходимо знать углы падения солнечных лучей на наклонную и горизонтальную поверхности в данном месте. На количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность, оказывают влияние ориентация поверхности, характеризующаяся азимутом поверхности, и угол наклона освещаемой поверхности к горизонту [6].

Среднемесячное среднее дневное значение плотности солнечного излучения, поступающего на наклонную поверхность,

$$E_n = RE, \quad (30)$$

где R – отношение значений плотности солнечного излучения, поступающего на наклонную и горизонтальную поверхности; E – среднемесячное среднее дневное значение плотности солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, Вт/м².

Коэффициент пересчета количества солнечной энергии с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность равен сумме трех составляющих, соответствующих прямому, рассеянному и отраженному солнечному излучению:

$$R = \left(1 - \frac{E_p}{E}\right) R_n + \frac{E_p}{E} \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (31)$$

где $\frac{E_p}{E}$ – среднемесячная доля рассеянного солнечного излучения; R_n – среднемесячный коэффициент пересчета прямого солнечного излучения с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность, градус; β – угол наклона освещаемой поверхности к горизонту, градус; ρ – альbedo поверхности Земли и окружающих тел.

Альbedo снега сильно различается: от 0,9 для свежеснежного до 0,4 для таящего снега и до 0,2 для грязного снега. В районе Антарктиды альbedo снега в среднем немногим больше 0,8.

Среднемесячный коэффициент пересчета прямого солнечного излучения с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность

$$R_n = [\cos(\beta) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\beta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\beta) \cdot \cos(\psi_n) \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \sin(\beta) \cdot \cos(\psi_n) \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \sin(\beta) \cdot \cos(\psi_n) \cdot \frac{\sin(\delta)}{\cos(\varphi)} + \sin(\beta) \cdot \sin(\psi_n) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega)], \quad (32)$$

где β – угол наклона склона к горизонту, рад (изменяется от 0 до $\pi/2$); φ – широта места, рад; δ – склонение солнца, рад; ω – часовой угол Солнца в данный момент времени, отсчитываемый от момента истинного полудня; ψ_n – азимут проекции нормали к склону на горизонтальную плоскость, отсчитываемую от плоскости меридиана (если вертикальная поверхность обращена к югу, то $\psi_n = 0$, если на восток или запад – $\psi_n = \pi/2$, если на север – $\psi_n = \pi$).

Склонение

$$\delta = 23,5 \sin\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + D)\right), \quad (33)$$

где D – номер дня с начала года.

Часовой угол переводит местное солнечное время в количество градусов. В полдень часовой угол равен нулю. Земля поворачивается на 15° за 1 ч. Утром угол солнца отрицательный, а после полудня положительный:

$$\omega = 15^\circ(LST - 12), \quad (34)$$

где LST – местное солнечное время;

$$LST = LT + \frac{TC}{60}, \quad (35)$$

где LT – местное время; TC – временной поправочный коэффициент, мин.

Временной поправочный коэффициент

$$TC = 4(LSTM - Longitude) + EoT, \quad (36)$$

где $LSTM$ – местный стандартный временной меридиан; $Longitude$ – долгота; EoT – уравнение времени суток, мин.

Уравнение времени суток:

а) мин:

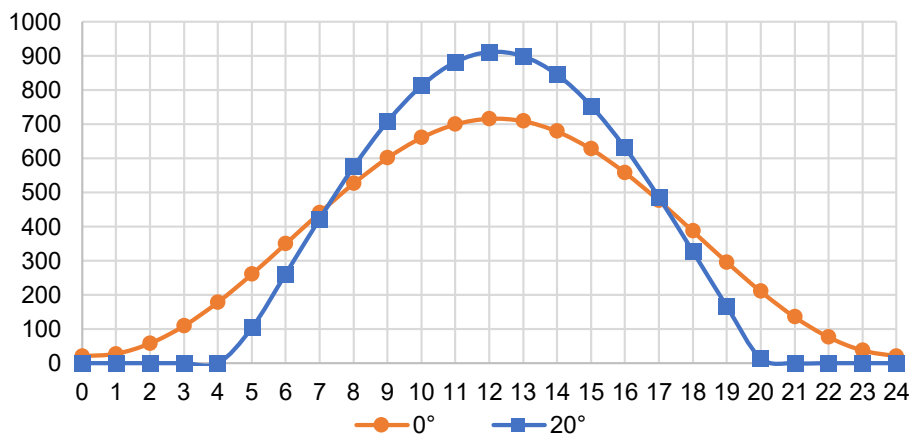
$$EoT = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B); \quad (37)$$

б) град:

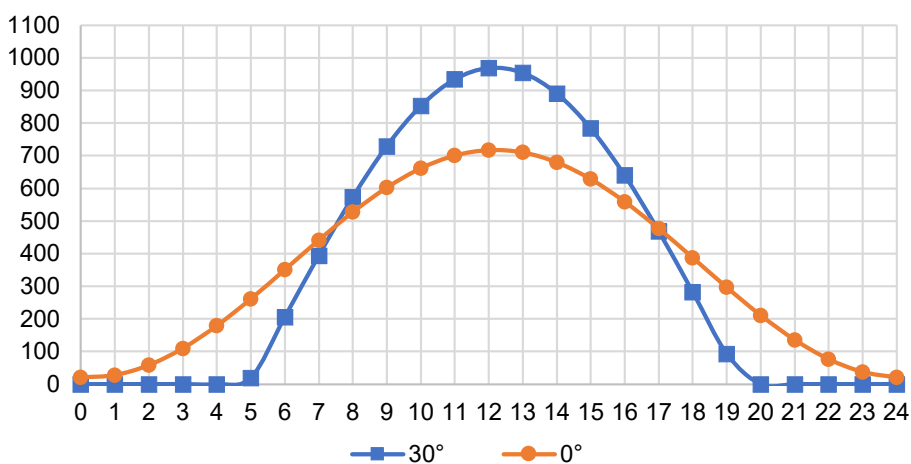
$$B = \frac{360}{365}(D - 81). \quad (38)$$

Используя вышеизложенную методику расчета, выполнены расчеты изменения суммарной солнечной радиации в течение суток в районе белорусской антарктической станции на начало января при наклоне подстилающей поверхности от 10° до 60° в направлении юг – север.

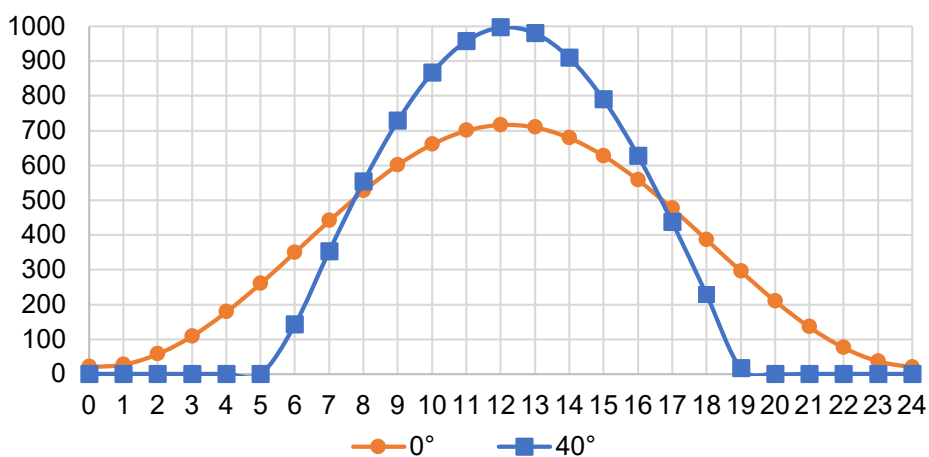
Из приведенных на рис. 5 данных видно, что в начале и конце суток на наклонных площадках суммарный поток солнечной радиации имеет нулевое значение. В полуденное время суммарный поток солнечной радиации начинает возрастать по сравнению с соответствующими условиями на горизонтальных площадках по мере увеличения угла наклона от 10° до 50° , а затем постепенно снижается. Максимальное увеличение потока солнечной радиации по сравнению с горизонтальной площадкой может достигать 40 %, что обуславливает соответствующее увеличение максимальной температуры в полуденное время на объектах рельефа, имеющих наклонные площадки, ориентированные в направлении север – юг.



a (a)



б (b)



в (c)

Рис. 5. Изменение суммарной солнечной радиации (Вт/м²) в течение суток в районе белорусской антарктической станции на начало января при наклоне подстилающей поверхности на 20° (а), 30° (б), 40° (в) в направлении юг – север

Fig. 5. Change in total solar radiation during the day in the area of the Belarusian Antarctic station at the beginning of January with an underlying surface tilt of 20° (a), 30° (b), 40° (c) in the south-north direction

Модуль прикладной программы для численного расчета процессов энергомассообмена в приземном слое атмосферы и подстилающей поверхности применительно к склоновым поверхностям рельефа. При численном расчете процессов переноса тепла в природно-территориальных комплексах с неоднородным рельефом с различной проницаемостью возникают проблемы с построением ортогональных сеток, на которые должна быть разбита область моделирования. Для адаптации сетки и расчетной схемы к рельефу местности разработана расчетная схема на неортогональных сетках.

Принцип построения таких расчетных схем заключается в следующем. Проекция области моделирования на горизонтальную плоскость разбивается двумерной прямоугольной сеткой с шагом от 10 до 100 м в зависимости от неоднородности рельефа местности. Шаги в направлениях осей горизонтальных координат X и Y могут иметь различные значения. Вертикальная координата Z разбивается более мелким и неравномерным шагом, адаптированным к геологическому строению верхнего слоя почвы, подстилающих грунтов и водоносных горизонтов. Направление оси Z и порядок нумерации узлов по ней может быть направленным от поверхности в нижние горизонты или наоборот – от нижней границы моделируемого слоя к поверхности. Это не имеет принципиального значения для качественных и количественных характеристик расчетной схемы. Необходимо только учитывать соответствующим образом знаки потенциалов и геометрических параметров сетки. Основное требование при разбивке вертикальной координаты заключается в строго одинаковом количестве узлов в вертикальном направлении и соответствии одинаковому номеру узла вертикальной координаты дневной поверхности для всей области моделирования.

В результате такой процедуры вся область моделирования разбивается на блоки, имеющие форму прямоугольников в проекции на горизонтальную плоскость. Проекция этих блоков на вертикальные плоскости, разбивающие область в горизонтальном плане, представляют собой трапеции, и сетка в этих плоскостях является неортогональной. Это, с одной стороны, несколько усложняет расчетную схему, а с другой – позволяет выделить и привязать слой одинакового строения к определенному диапазону номеров узлов в вертикальном направлении. Главное – выделить особый поверхностный слой, соответствующий рельефу.

С учетом неортогональности сетки в проекциях на вертикальные плоскости и неравномерности ее по координате Z в формулы для расчета потоков тепла вводятся корректирующие коэффициенты. При этом потоки на границе блоков нумеруются в определенной последовательности. Потоки в вертикальных направлениях обозначаются q_{T_1} и q_{T_2} , по оси X – q_{T_3} и q_{T_4} , по оси Y – q_{T_5} и q_{T_6} . Меньший номер соответствует потоку со стороны узла с меньшим номером. Далее для однозначного определения вклада потоков в баланс рассчитываемого блока потоки, направленные от соседних узлов к этому узлу, считаются положительными независимо от направления соответствующей оси координат. Для этого во всех формулах, по которым рассчитываются потоки, фигурирует разность потенциала переноса соседнего узла и потенциала рассчитываемого узла.

Расчетная схема с учетом оговоренных условий:

$$q_{T_1} = \lambda_1 \frac{T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k} + \delta T_1}{\Delta z_{j,k}} \Delta x \Delta y f_{1,i,j,k}, \quad (39)$$

$$q_{T_2} = \lambda_2 \frac{T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k} + \delta T_2}{\Delta z_{j,k}} \Delta x \Delta y f_{2,i,j,k}, \quad (40)$$

$$q_{T_3} = \lambda_3 \frac{T_{i,j-1,k} - T_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta y 0,5 (\Delta z_{j-1,k} + \Delta z_{j,k}) f_{3,i,j,k}, \quad (41)$$

$$q_{T_4} = \lambda_4 \frac{T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}}{\Delta x} \Delta y 0,5 (\Delta z_{j+1,k} + \Delta z_{j,k}) f_{4,i,j,k}, \quad (42)$$

$$q_{T_5} = \lambda_5 \frac{T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}}{\Delta y} \Delta x 0,5 (\Delta z_{j,k-1} + \Delta z_{j,k}) f_{5,i,j,k}, \quad (43)$$

$$q_{T_6} = \lambda_6 \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{\Delta y} \Delta x 0,5 (\Delta z_{j,k+1} + \Delta z_{j,k}) f_{6,i,j,k}. \quad (44)$$

Более детальные элементы расчетной схемы представлены в работе [4].

Изменение энтальпии за шаг по времени в узлах трехмерной сетки выполняется по формуле (26):

$$\Delta H_{i,j,k} = (q_{1,i,j,k} + q_{2,i,j,k} + q_{3,i,j,k} + q_{4,i,j,k} + q_{5,i,j,k} + q_{6,i,j,k}) \Delta \tau.$$

После цикла расчета изменения энтальпии во всех узлах моделируемой области в соответствии с явной расчетной схемой выполняется цикл обновления энтальпии по формуле (27):

$$\Delta H_{i,j,k}^{t+1} = H_{i,j,k}^t + \Delta H_{i,j,k}^t.$$

Значения температуры на новом временном слое определяются по формуле (28):

$$T_{i,j,k}^{t+1} = \begin{cases} \left(\frac{H_{i,j,k}^{t+1}}{c_{эфт} \rho_{ск} \Delta V} + T_{нз} \right), & \text{если } H_{i,j,k}^{T+1} \geq 0 \\ T_{нз}, & \text{если } -Q_{\phi} \Delta V \leq H_{i,j,k}^{T+1} < 0 \\ \left(\frac{H_{i,j,k}^{t+1} + Q_{\phi} \Delta V}{c_{эфм} \rho_{ск} \Delta V} + T_{нз} \right), & \text{если } H_{i,j,k}^{T+1} \geq -Q_{\phi} \Delta V \end{cases}.$$

На основе вышеприведенной схемы разработана программа, позволяющая рассчитывать и прогнозировать распределение температурных полей в породах с учетом неоднородностей рельефа и поступления солнечной радиации на наклонные поверхности и графической визуализацией полученных результатов. Моделирование осуществлено в следующей последовательности.

На объекте «Гора Вечерняя» (рис. 6) выделена область моделирования, которая в проекции на горизонтальную плоскость представляет собой прямоугольник размером 3,2 км² × 2,2 км². В плоскости вертикальных разрезов выделен один пласт мощностью 50 м. Область моделирования разбита трехмерной сеткой с шагом 1 м. Проекция области на горизонтальную плоскость разбита прямоугольной сеткой 126 × 92 узлов с шагом 25 м. В плоскости вертикальных разрезов пласт разбит на 50 слоев. При такой разбивке шаг по вертикальной координате в каждом пласте изменяется в горизонтальном направлении, и в плоскости вертикальных разрезов сетка является неортогональной. Для численного моделирования на такой сетке использована расчетная схема (39 × 47). Для проверки работы программы в нее загружены данные по лучисто-конвективному обмену с учетом наклона поверхности [2] и характеристикам теплопереноса.

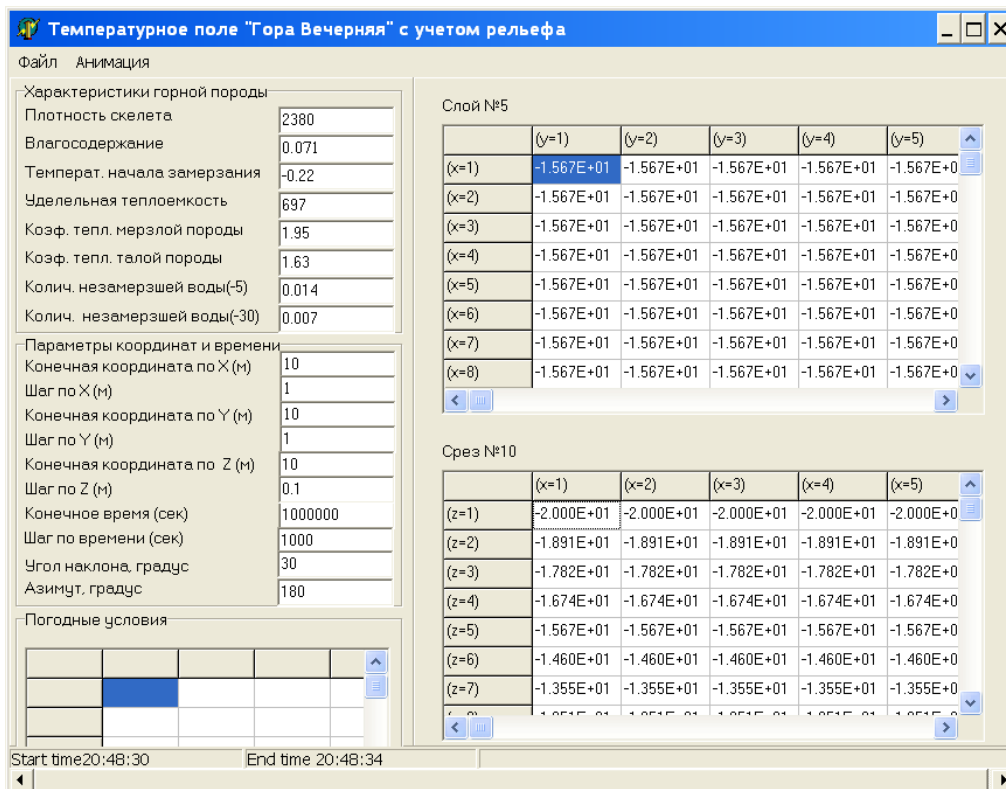


Рис. 6. Главное окно программы

Fig. 6. The main program window

Тестирование программного модуля для расчета температурного режима ледопородного слоя применительно к склоновым поверхностям рельефа. Для сравнения численной модели, используемой в расчетной программе для склоновых поверхностей рельефа, проведено сопоставление данных, полученных с помощью модуля программы, соответствующей склоновым поверхностям, и эталонной программой на различные периоды времени в режиме замораживания. При этом смоделирован слой горной породы, наклоненный к горизонтальной поверхности с tg угла, равным значению 0,5, т. е. на 5 м расстояния в горизонтальном направлении поверхность рельефа поднимается на 2,5 м. В соответствии с этим создана неортогональная сетка, на которой проведено моделирование замораживания слоя горной породы с начальной температурой $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на охлаждаемой поверхности. Полученные результаты сопоставлены с результатами, полученными с помощью эталонной программы, в которой координата, соответствующая основному направлению изменения температуры, направлена перпендикулярно поверхности.

На рис. 7 представлены расположения изотерм после 30 суток промораживания на тестируемой и эталонной программе, из данных которого следует, что наблюдается удовлетворительное соответствие тестируемой и эталонной программ.

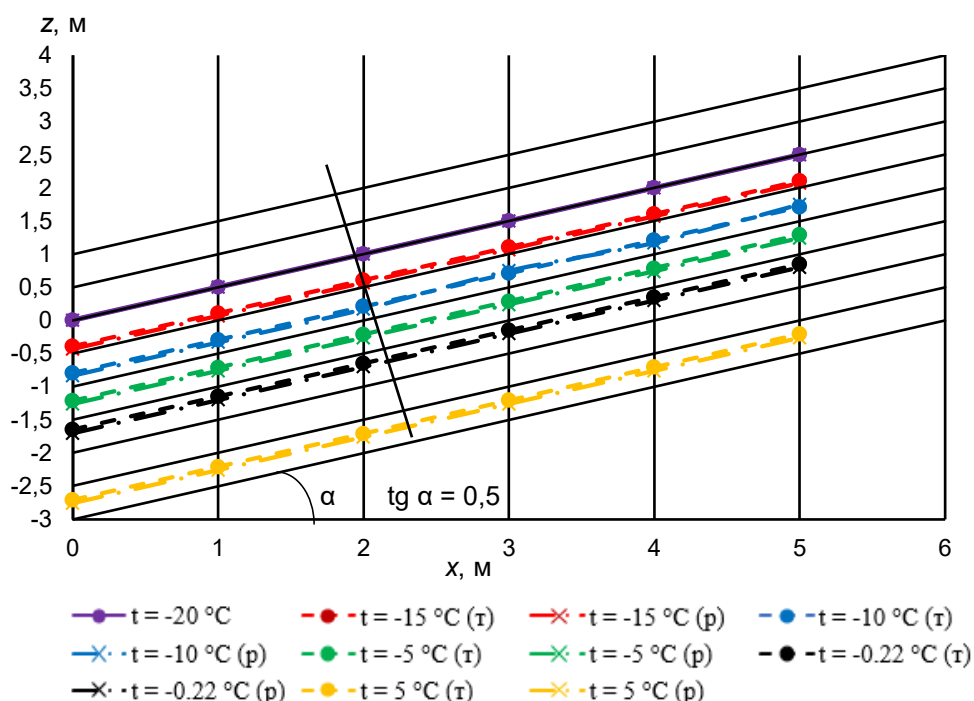


Рис. 7. Расположение изотерм после 30 суток промораживания на тестируемой и эталонной программах

Fig. 7. Location of isotherms after 30 days of freezing on the test and reference programs

Таким образом, можно сделать заключение, что неортогональная сетка позволяет получать адекватные результаты при моделировании температурного режима на склоновых участках территории.

Для оценки влияния наклона поверхности территории на максимальную температуру нагрева этой поверхности выполнены расчеты суточных изменений температуры на горизонтальной и наклонной поверхностях с углом наклона в направлении север – юг в 40° в теплый период года (начало января). Результаты этого расчета представлены на рис. 8, из которых видно, что пик температуры на наклонной поверхности на $10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше, чем соответствующий пик на горизонтальной поверхности. Эти результаты коррелируют с данными, полученными участником 17-й антарктической экспедиции Н. В. Козловским, выполняющим задание вышеуказанного мероприятия А-7. Исследователем было выявлено, что в отдельных случаях температура поверхности скальных пород может достигать 35°C . Это может являться одной из основных причин деструкции скальных пород.

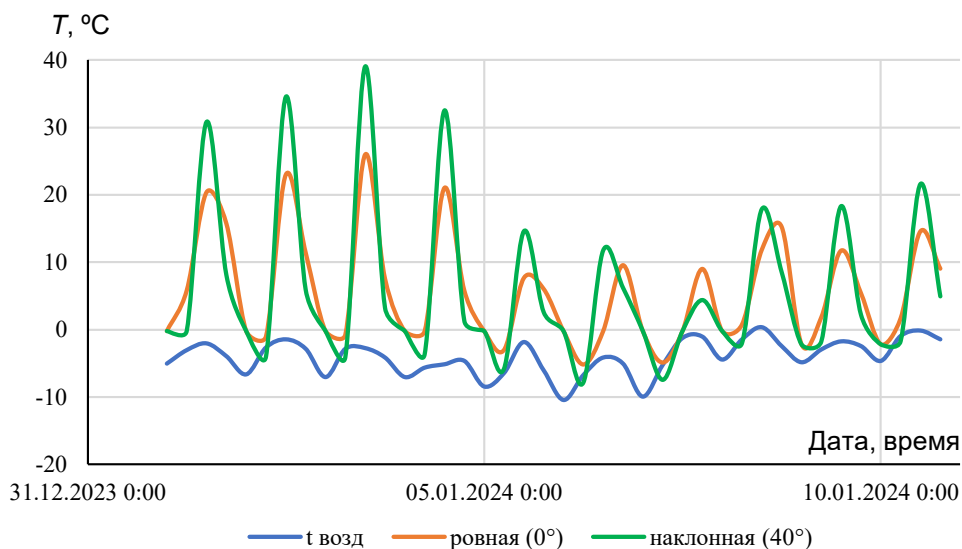


Рис. 8. Сравнение расчетной температуры на ровной и наклонной (40°) поверхностях в январе 2024 г.

Fig. 8. Comparison of estimated temperatures on flat and inclined (40°) surfaces in January 2024

Заключение. С учетом неоднородности рельефа территории белорусской антарктической станции разработаны две прикладные программы для моделирования температурного режима горизонтальных и склоновых участков территории. Эти программы протестированы на эталонных моделях и путем сравнения данных, полученных с помощью мониторинга температурного режима на контрольных площадках, с данными численного моделирования по разработанным программам. Результаты тестирования показали адекватность численных расчетов результатам фактических наблюдений.

Разработанные программы позволяют рассчитать динамику температурного поля в деятельном слое территории с различным рельефом и выявить закономерности влияния теплофизических характеристик горных пород, метеорологических условий и рельефа территории на формирование температурного режима.

В частности, установлено, что в период полярного дня в полуденное время суммарный поток солнечной радиации возрастает по сравнению с соответствующими условиями на горизонтальных площадках по мере увеличения угла наклона от 10° до 50°, а затем начинает снижаться по мере увеличения угла наклона. Максимальное увеличение потока солнечной радиации по сравнению с горизонтальной площадкой может достигать 40 %. Это будет обуславливать соответствующее увеличение максимальной температуры в полуденное время на объектах рельефа, имеющих наклонные площадки, ориентированные в направлении север – юг.

С помощью разработанных программных средств и приборного мониторинга температурного режима с помощью термометрических кос, оснащенных логгерами, можно выполнять комбинированный мониторинг территории белорусской антарктической станции. В таком случае расчеты с помощью разработанных программных средств будут дополнять данные разреженной сети приборного мониторинга температурного режима территории. В свою очередь, приборный мониторинг будет обеспечивать контроль адекватности моделирования температурного режима в периоды экстремальных вариаций метеорологических условий и тренда климатических условий.

Список использованных источников

1. Израэль, Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
2. Расчеты температурного режима и энергетических затрат при формировании ледопородных ограждений для проходки шахтных стволов / Г. П. Бровка, К. А. Агутин, М. В. Мучко, Н. А. Липницкий // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 1. – С. 74–84.

3. Бровка, Г. П. Математические модели и методы экспериментального исследования процессов тепло-массообмена и пучения при промерзании грунтов / Г. П. Бровка, К. А. Агутин, А. А. Мурашко // Инженерная геология. – 2021. – Т. 16, № 4. – С. 62–71.
4. Бровка, Г. П. Взаимосвязанные процессы тепло- и массообмена в природных дисперсных средах / Г. П. Бровка. – Минск: Бел. наука, 2011. – 363 с.
5. Матвеев, Л. Т. Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли / Л. Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 295 с.
6. Duffie J. A. Solar engineering of thermal process / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – 1st ed. – N. Y.: John Wiley and Sons, 1980. – 469 p.

References

1. Israel Y. A. *Ekologiya i kontrol sostoyaniya prirodnoy sredy* [Ecology and control of the state of the natural environment]. Moscow, Hydrometeoizdat Publ., 1984, 560 p. (in Russian)
2. Brovka G. P., Agutin K. A., Muchko M. V., Lipnitsky N. A. *Raschioty temperaturnogo rezhima i energeticheskikh zatrat pri formirovani ledoporodnyh ograzhdeniy dla prohodki shahtnyh stvolov* [Calculations of temperature conditions and energy costs during the formation of ice walls for sinking mine shafts]. *Inzhenernaya geologiya* = Engineering geology, 2021, vol. 16, no. 1, pp. 74–84. (in Russian)
3. Brovka G. P., Agutin K. A., Murashko A. A. *Matematicheskie modeli i metody experimentalnogo issledovaniya processov teplomassoperenosa i pucheniya pri promerzanii gruntov* [Mathematical models and methods of experimental study of heat and mass transfer processes and heaving during soil freezing]. *Inzhenernaya geologiya* = Engineering geology, 2021, vol 16, no. 4, pp. 62–71. (in Russian)
4. Brovka G. P. *Vzaimosvyazannye processy teplo- i massoperenosa v prirodnyh dispersnyh sredah* [Interrelated processes of heat and mass transfer in natural dispersed media] Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2011, 363 p. (in Russian)
5. Matveev L. T. *Teoriya obschey cirkulyaciy atmosfery i klimata Zemli* [Theory of General Circulation of the Atmosphere and Climate of the Earth] Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1991, 295 p. (in Russian)
6. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal process. 1st ed. New York, John Wiley and Sons, 1980, 469 p.

Информация об авторах

Бровка Геннадий Петрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: brovka_gp@tut.by

Агутин Кирилл Алексеевич – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

Дорожок Инга Николаевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: ingadorozhok@list.ru

Information about the authors

Gennady P. Brovka – D. Sc. (Technical), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: brovka_gp@tut.by

Kirill A. Agutin – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kirill.agutin@gmail.com

Inga N. Dorozhok – Researcher, Institute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus, (10, F. Skoryna Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: ingadorozhok@list.ru