

Анализ и прогнозирование изменений температурного режима грунта в районе города Норильска

А. А. Федотов, В.В. Канибер, П.В. Храпов

Аннотация – В работе проведено исследование начально-краевой задачи для нестационарного одномерного уравнения теплопроводности, моделирующей распределение температуры грунта в районе г. Норильска. Математическая модель построена с учетом фазовых переходов – твердое тело-жидкость. Для определения параметров модели использованы данные метеорологической станции и отчеты об инженерно-геологических изысканиях, с помощью которых получены необходимые физические и теплофизические характеристики расчетной области. Для численного решения задачи использовался метод контрольного объема. За начало расчетов принято 1 января первого года наблюдения за температурным режимом грунта. Моделирование температурного режима грунта проводилось до момента выхода на нестационарный периодический режим. С целью анализа изменения температурного поля грунта были построены графики зависимости температуры от глубины для января и июля 7 выбранных годов наблюдения. Исследование результатов показало, что для выхода температуры грунта на глубине до 20 м на нестационарный периодический режим необходимо около 50 лет. Для установившегося периодического режима построены зависимости температуры от глубины для каждого месяца и найдена глубина активного слоя (0,5 м) и глубина нулевых амплитуд (12 м). Смоделирован прогноз температурного режима грунта на 2080 год по двум сценариям Representative Concentration Pathway (RCP) глобального потепления: умеренному RCP2.6 и негативному RCP8.5. Сценарий RCP2.6 показал увеличение глубины оттаивания (промерзания) на 0,1 м и уменьшение глубины нулевых амплитуд на 1 м, а также увеличение температуры по глубине в среднем на 2°C. Результаты расчетов по сценарию RCP8.5 показали увеличение глубины активного слоя на 0,5 м (в 2 раза по сравнению с настоящим временем) и уменьшение глубины нулевых амплитуд на 4 м, температура грунта в среднем выросла на 5,7°C. В связи с произошедшим в мае 2020 года разливом топлива из резервуара в г. Норильске из-за проседания опор фундамента был смоделирован температурный режим

грунта в 1980 году. Результаты показали увеличение глубины активного слоя с 1980 года на 0,1 м, которое и могло вызвать просадку свай фундамента резервуара. Далее было проведено сравнение многолетних среднемесячных температур по десятилетиям, в котором было установлено, что 2010-2020 годы имеют наибольшее количество самых высоких значений среднемесячных температур. Данное исследование дополнительно подтверждает деградацию вечной мерзлоты.

Ключевые слова – вечная мерзлота, криолитозона, глобальное потепление, прогноз, температурный режим, нестационарный периодический режим, глубина оттаивания, глубина нулевых амплитуд, уравнение теплопроводности, метод контрольного объема.

I. ВВЕДЕНИЕ

Прогноз распределения температуры в вечномерзлых грунтах очень актуален для нашей страны, так как криолитозона занимает большую часть территории [1]. В настоящее время, в связи с глобальным потеплением, многолетнемерзлые породы начинают оттаивать, что в свою очередь, с одной стороны, может навредить уже возведенным сооружениям в соответствующих районах. В мае 2020 года произошел разлив топлива из резервуара в г. Норильске. Основной причиной аварии специалисты МЧС назвали потепление в условиях вечной мерзлоты. Разгерметизация резервуара с нефтепродуктами произошла из-за проседания свай фундамента, прослуживших без замечаний более 30 лет [2]. С другой стороны, потепление климата увеличит области благоприятного грунта, не подверженного серьезным сезонным изменениям и подходящим для ведения различной хозяйственной деятельности [3]. Повышение температуры также делает климат Восточной Сибири более мягким и благоприятным, что способствует миграции людей. Гостеприимство новых областей можно охарактеризовать при помощи ЭПЛ (экологический потенциал ландшафта), который учитывает влияние уменьшения площади вечной мерзлоты и суровости зимних холодов [4]. Данные исследования только усиливают актуальность прогнозирования температуры грунта [5].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется численно смоделировать температурный режим в среде с фазовыми переходами – твердое тело-жидкость. Такое состояние среды в нестационарной

Статья получена 29 августа 2020.

А. А. Федотов – Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3383-1188>, e-mail: le-tail@list.ru, fedotov_a_a@bmsu.ru.

В. В. Канибер – Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0846-6641>, e-mail: kanibervolodya@bk.ru, kanibervv@student.bmsu.ru.

П. В. Храпов – Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Россия, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6269-0727>, e-mail: pvkhrapov@gmail.ru, khrapov@bmsu.ru.

одномерной постановке описывается следующим уравнением теплопроводности:

$$(c\rho + Q\delta(u - u^*))\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \right) + s(z, t), \quad (1)$$

где c - удельная теплоемкость; ρ - плотность; λ - коэффициент теплопроводности; $u(z, t)$ - температура среды; u^* - температура фазового перехода; Q - теплота фазового перехода; $s(z, t)$ - мощность внутренних источников тепла; $\delta(u - u^*)$ - дельта-функция.

Решение $u(z, t)$ требуется найти в ограниченной области $D = \{0 \leq z \leq zL\}$, удовлетворяющее начальному условию

$$u(z, 0) = \varphi(z). \quad (2)$$

На верхней границе $z = 0$ с температурой $u(0, t)$ происходит конвективный теплообмен со средой, имеющей температуру $\theta(t)$:

$$J = h \cdot (\theta(t) - u(0, t)), \quad (3)$$

Таблица 1. Средние многолетние значения температуры и толщины снежного покрова.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура воздуха	-26,80	-26,03	-20,81	-13,07	-4,26	7,25	14,45	11,01	4,10	-8,13	-20,96	-24,59
Снеж. покров (см)	27,8	35	40,6	45,5	36,5	0	0	0	0	10,1	24,4	28,6
0	-12,8	-12,3	-8,7	-5,6	-1,4	7,8	14,8	11,2	4,1	-5,3	-10,3	-11,6
20	-6,9	-8,0	-8,1	-6,8	-3,0	1,5	8,1	8,5	3,8	0,3	-1,0	-3,6
40	-5,0	-6,6	-7,1	-6,4	-3,6	-0,5	4,1	5,9	3,0	0,4	-0,2	-1,8
60	-3,8	-5,8	-6,7	-6,4	-4,1	-1,4	2,7	3,8	1,7	0,3	-0,1	-1,1
80	-2,8	-5,0	-6,3	-6,3	-4,4	-2,0	0,1	2,2	1,5	0,2	0,0	-0,6
120	-1,5	-3,5	-5,0	-5,5	-4,5	-2,9	-0,1	0,9	0,2	0,0	0,0	-0,1
160	-1,1	-2,5	-4,0	-4,7	-4,3	-2,9	-1,9	-1,1	-0,7	-0,5	-0,4	-0,5
240	-1,6	-1,6	-2,6	-3,3	-3,4	-2,1	-2,9	-2,0	-1,4	-0,8	-1,6	-2,1
320	-1,6	-1,7	-2,2	-2,8	-3,3	-3,2	-2,9	-2,5	-2,2	-2,0	-1,8	-1,7

В Таблице 1 представлены многолетние среднемесячные значения толщины снежного покрова и температуры на соответствующей глубине до 320 см, ниже данного значения продолжается вечная мерзлота с усиливающимся затуханием колебаний температуры [7], [8]. Коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле [6]

$$h = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R}, \quad (5)$$

где α - коэффициент конвективного теплообмена; R - термическое сопротивление.

Термического сопротивления снежного покрова вычисляется по формуле [9]

$$R = \frac{d_s}{\lambda_s}, \quad (6)$$

где d_s - среднемесячная высота снежного покрова, принимаемая по метеоданным [7], [8];

где J - плотность теплового потока на границе, h - коэффициент теплоотдачи [6].

На нижней границе $z = zL$ ставится условие отсутствия теплового потока

$$J_b = 0. \quad (4)$$

III. НАЧАЛЬНОЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

В задаче (1)-(4) расчетная область начинается на поверхности земли (от границы с атмосферой) и заканчивается в вечной мерзлоте на определенной глубине. В расчетах полагалось, что поток тепла из недр Земли не будет оказывать значительного влияния на распределение температуры на выбранной глубине (см. Инженерно-геологическая характеристика грунта).

Для задания верхнего граничного условия была составлена Таблица 1 средних многолетних температур воздуха по месяцам, зафиксированных метеорологической станцией г. Норильска (Индекс WMO:23078) за 1941- 2020 гг. [7], [8].

λ_s - среднемесячная теплопроводность снегового покрова, определяется по формуле [9]

$$\lambda_s = m_d (0,18 + 0,87\rho_s), \quad (7)$$

где $m_d = 1 \text{ м} \cdot \text{ккал} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$ - пересчетный множитель для нашего случая;

ρ_s - среднемесячная плотность снегового покрова, $\text{т} / \text{м}^3$, принимаемая по метеоданным [10].

В районах со средней скоростью ветра в зимний период свыше $5 \text{ м} / \text{с}$ [10], рассчитанное по формуле (6) значение R следует увеличить в 1,3 раза [9].

С использованием данных для d_s , λ_s , ρ_s [7-10], α [6] и формул (5) и (6) составлена Таблица 2 с физическими характеристиками на верхней границе расчетной области.

Начальное распределение температуры грунта (2) принято на основе Таблицы 1 и инженерно-геологической характеристики грунта (см. ниже).

Таблица. 2. Физические характеристики на верхней границе расчетной области.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$d_s, \text{см}$	27,8	35	40,6	45,5	36,5	0	0	0	0	10,1	24,4	28,6
$\rho_s, \text{кг} / \text{м}^3$	256,7	260	263,3	283,3	313,3	0	0	0	0	156,7	213,3	226,7
$R, \frac{\text{м}^2 \text{ч}^\circ \text{С}}{\text{ккал}}$	0,896	1,12	1,29	1,387	1,048	0	0	0	0	0,415	0,868	0,986
$\alpha, \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ч}^\circ \text{С}}$	13,8	12,3	12,3	12	12,1	12,6	13,4	14	14,3	13,4	13,5	12,7
$h, \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{ч}^\circ \text{С}}$	1,032	0,832	0,729	0,68	0,884	12,6	13,4	14	14,3	2,041	1,062	0,939

IV. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРУНТА

Мощность вечномёрзлых пород в предгорной и горной частях (Норильское плато) составляет 100 и более, метров. В границах Норильско-Рыбинской равнины (равнинная часть территории) мощность многолетнемерзлых пород изменяется в зависимости от абсолютных отметок рельефа, составляя в поймах рек 15-20 метров, а в пределах распространения ледово-морских и озерных террас – до 50 метров [11], [12].

Для исследования литологического состава грунта обратимся к инженерно-геологической экспертизе [11], [12].

Геологический разрез представлен на поверхности толщей суглинков, глубина залегания колеблется до 9 м. Согласно классификации ГОСТ 25100-11 по гранулометрическому составу и числу пластичности – суглинки легкие пылеватые [13]. Средние значения влажности – 25%, а числа пластичности – 9%. По показателю текучести суглинки мягко- и тугопластичные, среднее значение показателя текучести равно 0,5 д.е. Плотность равна 1920 кг/м³, среднее значение плотности скелета равно 1540 кг/м³ [11], [12], [14], [15].

Ниже по разрезу залегают суглинки с содержанием гальки и гравия до 25%, находящиеся в твердомерзлом состоянии, мощностью до 4 м (9-13м). По гранулометрическому составу, согласно ГОСТ 25100-11, суглинки – легкие песчаные [13]. Среднее число пластичности составляет 10,7%. Средняя влажность равняется от 20%. По показателю текучести суглинки туго-мягкопластичные, среднее значение показателя

составляет 0,6 д.е. Плотность суглинка равна 1900 кг/м³, плотность скелета – 1500 кг/м³ [11], [12], [14], [15].

Далее залегает базальт темно-серый, прочный, трещиноватый, слабывветрелый, неразмягчаемый, мощностью до 7 м (13-20 м). Средняя плотность камня равна 2900 кг/м³. Грунт морозный, температура залегания грунта T=-2,8°C [11], [12], [14], [15].

Все вскрытые участки грунта не засолены. Насыпных грунтов нет.

Таким образом, в геологическом разрезе выделены 3 инженерно-геологических элемента (ИГЭ):

- ИГЭ-1. Суглинок гравелистый, по показателю текучести – тугопластичный (аQIV);
- ИГЭ-2. Суглинок с содержанием гальки и гравия до 25%, по показателю текучести мягкопластичный (аQIV);
- ИГЭ-3. Базальт очень прочный (Т1).

V. ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТА

При помощи рекомендуемого Приложения Б: «Физические и теплофизические характеристики многолетнемерзлых грунтов» актуализированной на 2020 год редакции СНиП 2.02.04-88 были определены значения удельной теплоемкости сухого грунта и коэффициента теплопроводности [9], [16], [17].

Из известных естественной влажности грунта, числа пластичности и показателя текучести была вычислена влажность грунта на границе пластичности [13]:

$$I_L = \frac{W - W_p}{I_p}, \quad (8)$$

где W – естественная влажность грунта, W_p – влажность на границе раскатывания, I_p – число пластичности, I_L – показатель текучести.

При помощи полученного значения были посчитаны значения долей незамерзшей воды [9]:

$$W_w = k_w W_p, \quad (9)$$

Таблица 3. Значение коэффициент k_w для соответствующей температуры.

Грунт	0,07 < I_p < 0,13	Т, °С	-0,3	-1	-10
Суглинок		k_w	0,7	0,58	0,4

После этого были получены все необходимые характеристики для моделирования

температурного режима грунта в Норильске (Таблица 4).

Таблица 4. Физические характеристики литологических слоев.

Слой	ИГЭ-1	ИГЭ-2	ИГЭ-3
ρ_d , кг / м ³	1540	1500	2900
W , д. е.	0,25	0,2	0
λ_{th} , ккал / (м · ч · С)	1,3	0,95	1,12
λ_f , ккал / (м · ч · С)	1,5	1,13	
c_d , ккал / (кг · С)	0,23	0,23	0,2
I_p , д. е.	0,09	0,107	N/A
I_L , д. е.	0,5	0,6	
W_p , д. е.	0,205	0,1358	
Температура	W_w , д. е.		
-0,3	0,14350	0,09506	
-1	0,11890	0,07876	
-10	0,08200	0,05432	

где ρ_d – плотность сухого грунта; λ_{th} – коэффициент теплопроводности талого грунта; λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта; c_d – удельная теплоемкость сухого грунта [9].

Зависимость $W_w = W_w(u)$, описывающая массовую долю незамерзшей воды при определенной температуре, представляется в виде интерполяционной формулы [6]

$$W_w(u) = \frac{\alpha_w}{\beta_w - u} + \gamma_w, \quad (10)$$

где α_w, β_w и γ_w – постоянные коэффициенты для каждого слоя грунта, определенные по трем значениям функции W_w при трех значениях температуры u (таблица 4). Миграция влаги в данной модели не учитывается.

Величина объемной теплоты замерзания (таяния) грунта принимается равной количеству теплоты, необходимой для замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта и определяется по формуле [9]

$$Q = \kappa \rho_d (W - W_w(u^*)), \quad (11)$$

где $\kappa = 79,4$ ккал / кг – удельная теплота фазового перехода вода-лед, температура фазового перехода $u^* = 0$.

Формула для объемной теплоемкости, учитывающая фазовые переходы, имеет вид

$$c\rho = \begin{cases} \rho_d \left(c_d + c_{ice} (W - W_w) + c_{ice} W_w + \kappa \frac{\partial W_w}{\partial u} \right), & u < u^*; \\ \rho_d c_d (c_d + c_w W), & u > u^*, \end{cases} \quad (12)$$

где $c_{ice} = 0,49$ ккал / (кг · °C) и

$c_w = 1,006$ ккал / (кг · °C) – удельные теплоемкости льда и воды, соответственно.

VI. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Для численного решения задачи с фазовыми переходами вычислительный алгоритм строится без явного выделения границы фазового перехода. После нахождения решения граница фазового перехода может быть найдена как поверхность, имеющая температуру $u = u^*$.

При приближенном решении задачи (1)-(12) вначале коэффициент в левой части уравнения (1) сглаживается и совершается переход к обычной задаче теплопроводности [18]. Дельта-функция $\delta(u - u^*)$ заменяется функцией $\delta((u - u^*), \Delta)$, которая отлична от нуля лишь внутри промежутка сглаживания $[-\Delta, \Delta]$. В результате вместо решения (1) ищется решение уравнения со сглаженным коэффициентом

$$(c\rho + Q \delta((u - u^*), \Delta)) \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \right) + s(z, t). \quad (13)$$

Для аппроксимации дельта-функции используются формулы, которые строятся с учетом выполнения условия сохранения теплового баланса на отрезке $[-\Delta, \Delta]$. В работе используется ступенчатая аппроксимация

$$\delta(u - u^*, \Delta) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta}, & |u - u^*| \leq \Delta, \\ 0, & |u - u^*| \geq \Delta \end{cases}.$$

Можно убедиться в том, что для этой формулы условие сохранения теплового баланса выполняется:

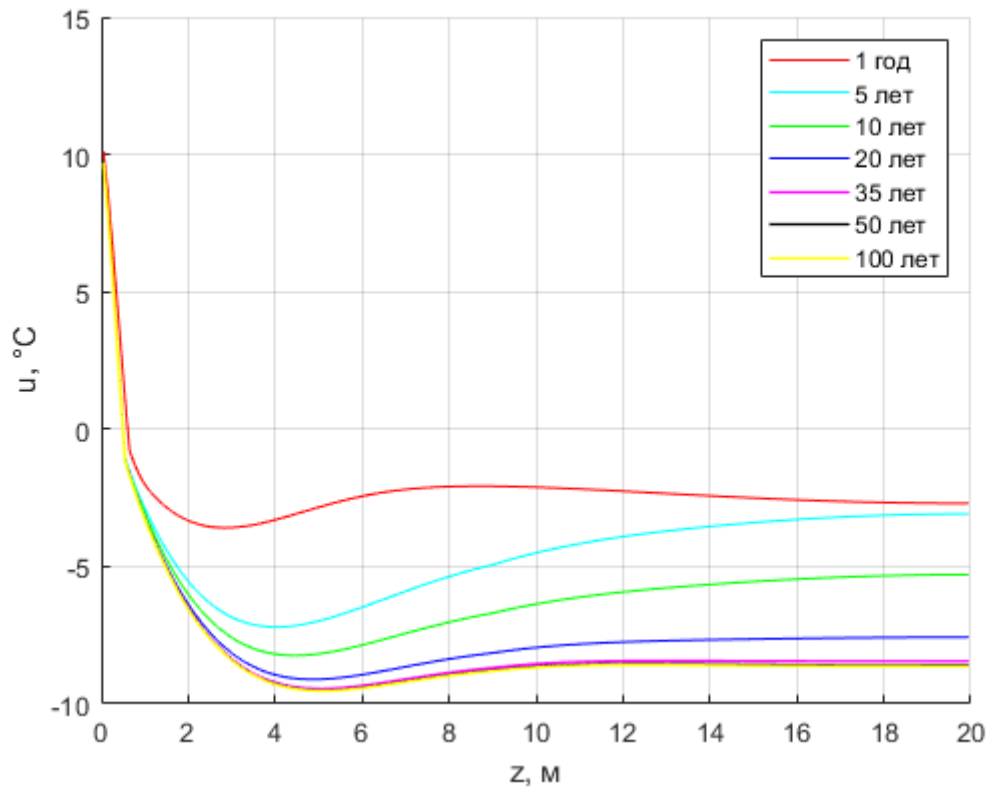
$$\int_{-\Delta}^{\Delta} \delta((u - u^*), \Delta) du = 1.$$

Значение параметра сглаживания Δ в расчетах принято равным двум.

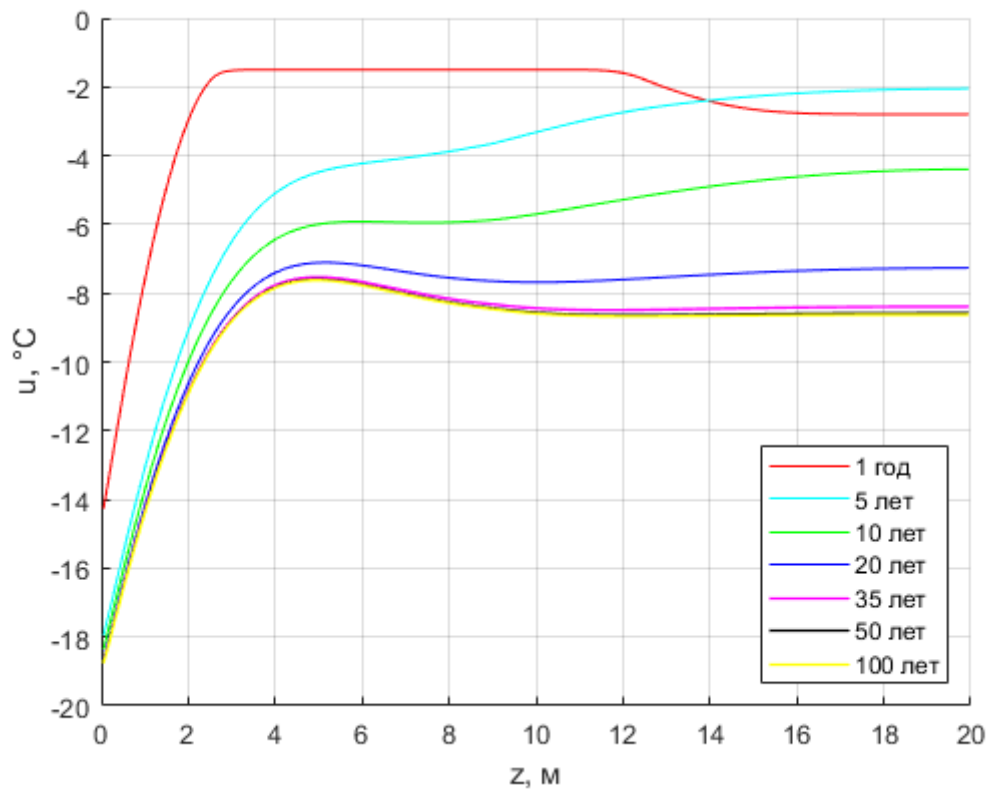
Численное решение уравнения (13) с соответствующими условиями (2)-(12) получено при помощи метода контрольного объема [19],[20].

Внутренние источники тепла в задаче отсутствуют, поэтому $s(z, t) = 0$.

Чтобы исследовать выход температурного режима на нестационарный периодический процесс было выбрано два месяца - январь и июль. Данные месяцы являются самым холодным и самым теплым, соответственно. Проведенное исследование помогло определить, через какое время температурный режим грунта на глубине 20 м стабилизируется (Рис. 1).



а



б

Рис. 1. График распределения температуры грунта в июле (а) и январе (б), соответственно, для указанных годов после начала наблюдения.

Из полученных графиков (Рис. 1) видно, что после 1 года распределение температуры в обоих случаях начинает смещаться от начальных условий. Через 50 лет графики начинают совпадать с достаточной точностью, т.е. зависимость температуры грунта от времени вышла на нестационарный периодический режим,

приблизительное значение температуры на глубине 20 м составляет $-8,5^{\circ}\text{C}$.

Представим графики нестационарного периодического режима двух выбранных месяцев на одном рисунке (Рис. 2).

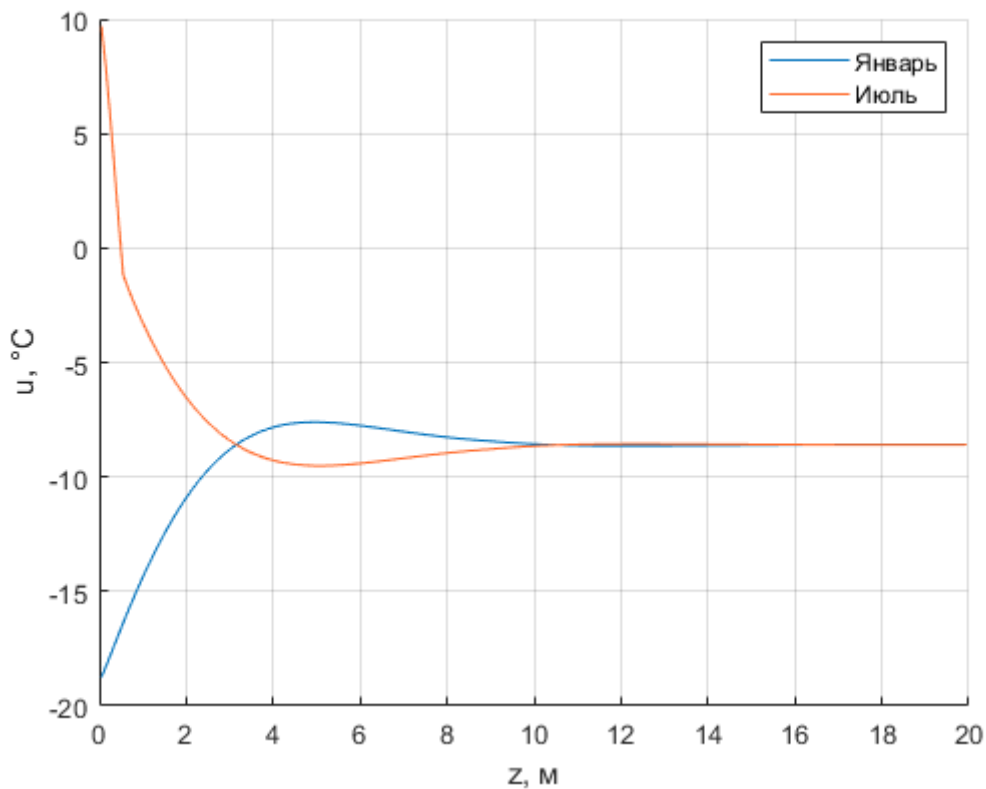


Рис. 2. График распределения температуры грунта в январе и июле

Из рис. 2 видно, что ниже 10 м указанные зависимости совпадают.

Поэтому для дальнейшего исследования температурного режима грунта в течение года мы

построим нестационарные периодические режимы всех месяцев. Для этого построим графики распределения температуры через 50 лет (Рис. 3).

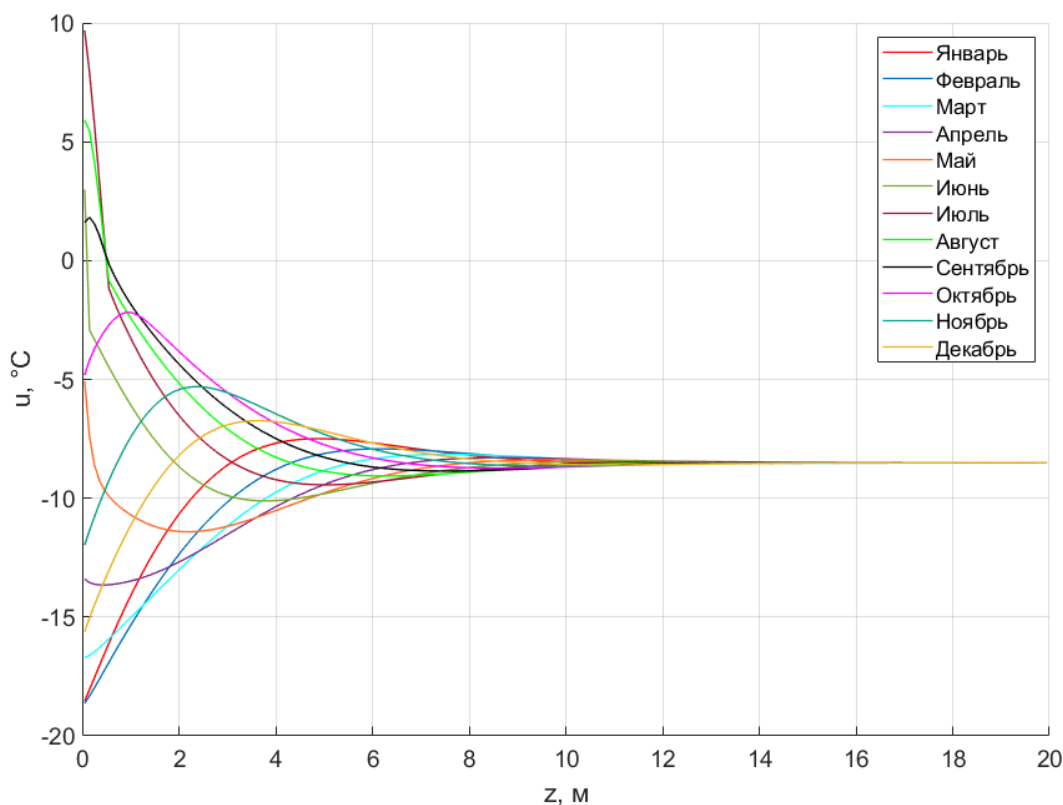


Рис. 3. Нестационарные периодические режимы температуры грунта для каждого месяца.

Из рис. 3 видно, что глубина сезонного оттаивания и промерзания грунта (active-layer) составляет примерно 0,5 м, далее начинается вечная мерзлота. Максимальная глубина оттаивания достигается в сентябре. Глубина нулевых амплитуд (zero annual amplitude) соответствует 12 метрам [21]. Для сравнения, в Таблице 1 положительные температуры были зафиксированы не ниже отметки в 1,2 метра. Подобная разница объясняется тем, что наше моделирование проводится для относительно стабильного состояния грунта, которое будет сформировано через 50 лет при условии поддержания всех факторов и характеристик грунта в текущем состоянии. В реальных же условиях распределения температуры грунта не успевает выйти на подобный нестационарный периодический режим из-за изменений климата.

При дальнейшем погружении в толщу земли сезонные колебания температуры стабилизируются, температура грунта становится равной минус 8,5°C.

У поверхности земли температура меняется в диапазоне от -18,6 до 9,7°C, на глубине 2 м в диапазоне от -13 до -3,8, на глубине 5 м в диапазоне от -9,8 до -7,1°C, на глубине 10 м в диапазоне от -8,7 до -8,3°C.

VII. ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Смоделируем влияние глобального потепления на температурный режим вечномерзлых грунтов [22], [23]. Первая модель RCP2.6 соответствует сценарию, по которому выбросы CO₂ в атмосферу были максимальны в 2010-2020 годах и далее до 2100 года будут снижаться. Вторая модель RCP8.5 подразумевает, что выбросы углекислого газа будут продолжать расти вплоть до 2100 года [24].

Для численной оценки изменения климата Азиатской части России были скомбинированы две выбранные прогностические модели содержания углекислого газа (RCP) и 20 моделей общей циркуляции атмосферы (CMIP5 GCM) [4], [25].

В сценарии RCP2.6 прогнозируется на 2080 год рост средней температуры января на 3,4°C, а июля – на 1,9°C. В более негативном сценарии RCP8.5 зимние температуры повышены на 9,1°C, а летние – на 5,7°C.

Рассмотрим модель сценария RCP2.6 и спрогнозируем изменение распределения температуры в толще грунта (Рис. 4 и 5).

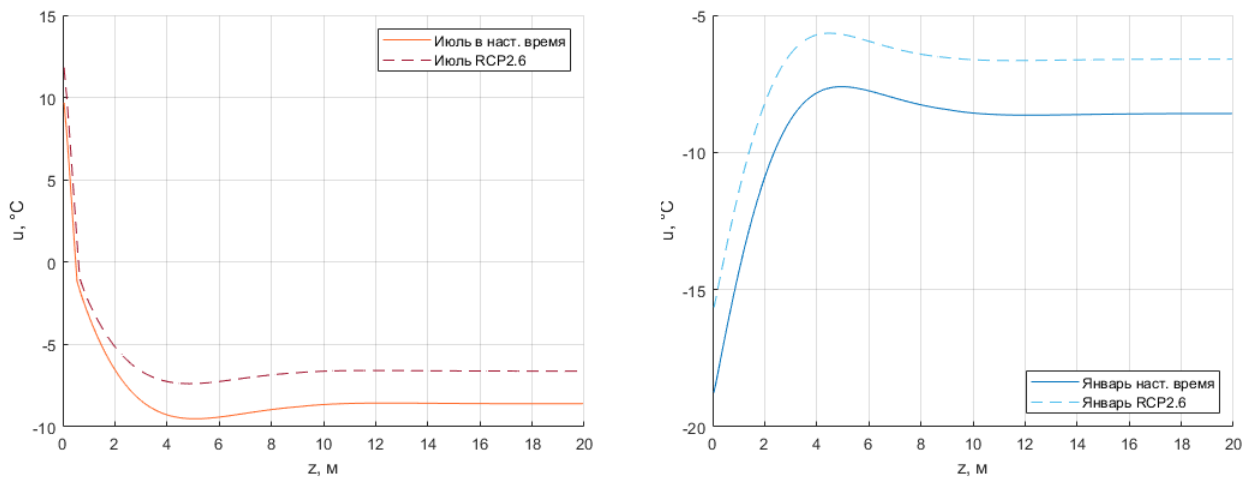


Рис. 4. Прогнозные графики распределения температуры в июле и январе в 2080 году для умеренного сценария RCP2.6.

Наш прогноз демонстрирует (Рис. 4) прогрев всех глубин на 2°C как в январе, так и в июле.

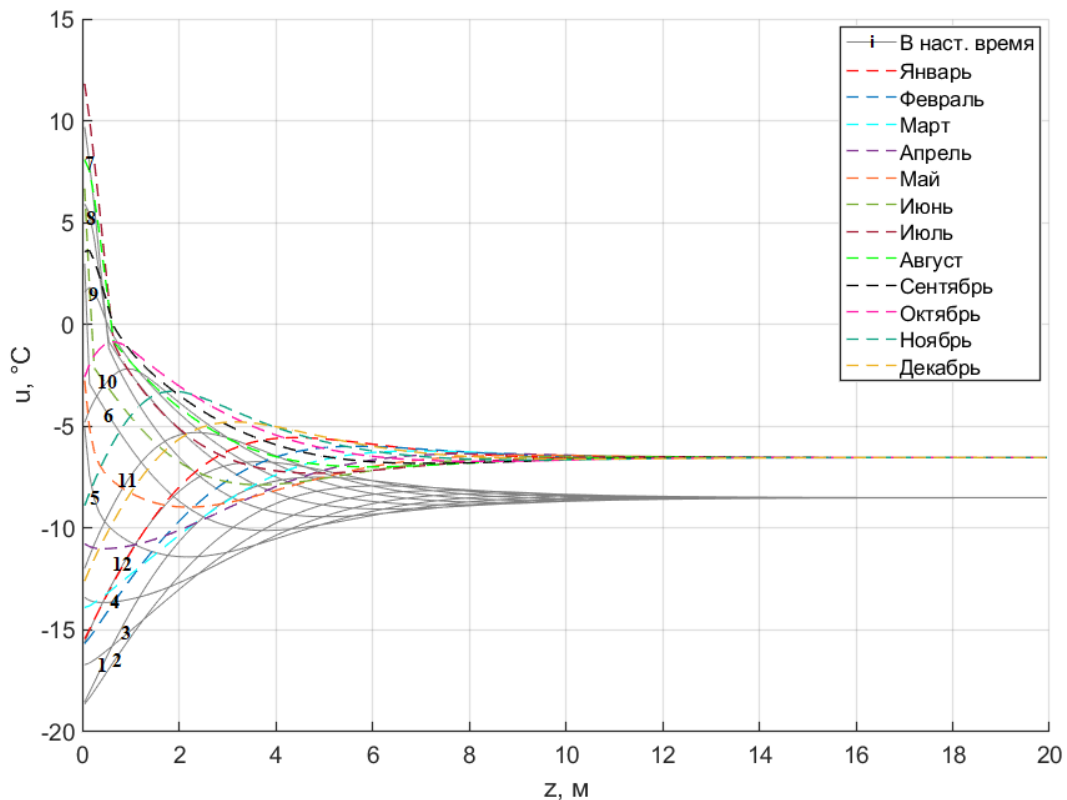


Рис. 5. Графики нестационарных периодических режимов температур грунта в настоящее время (серые) и прогнозные для умеренного сценария RCP2.6 на 2080 год (цветные).

Как мы видим (Рис. 5), нестационарный периодический температурный режим сместился на 2°C в сторону тепла, приняв значение $-6,5^{\circ}\text{C}$.

Глубина активного слоя увеличилась с 0,5 до 0,6 м. Глубина нулевых амплитуд наоборот уменьшилась с 12 до 11 м.

У поверхности температура земли меняется в диапазоне от $-15,7$ до $11,8^{\circ}\text{C}$ (было от $-18,6$ до $9,7^{\circ}\text{C}$), на

глубине 2 м в диапазоне от $-10,3$ до -3 (было от -13 до $-3,8$), на глубине 5 м в диапазоне от $-7,5$ до $-5,5^{\circ}\text{C}$ (было от $-9,8$ до $-7,1^{\circ}\text{C}$), на глубине 10 м от $-6,6$ до $-6,4^{\circ}\text{C}$ (было от $-8,7$ до $-8,3^{\circ}\text{C}$).

Теперь обратимся к модели негативного сценария RCP8.5 и спрогнозируем изменение распределения температуры в толще грунта (Рис. 6 и 7).

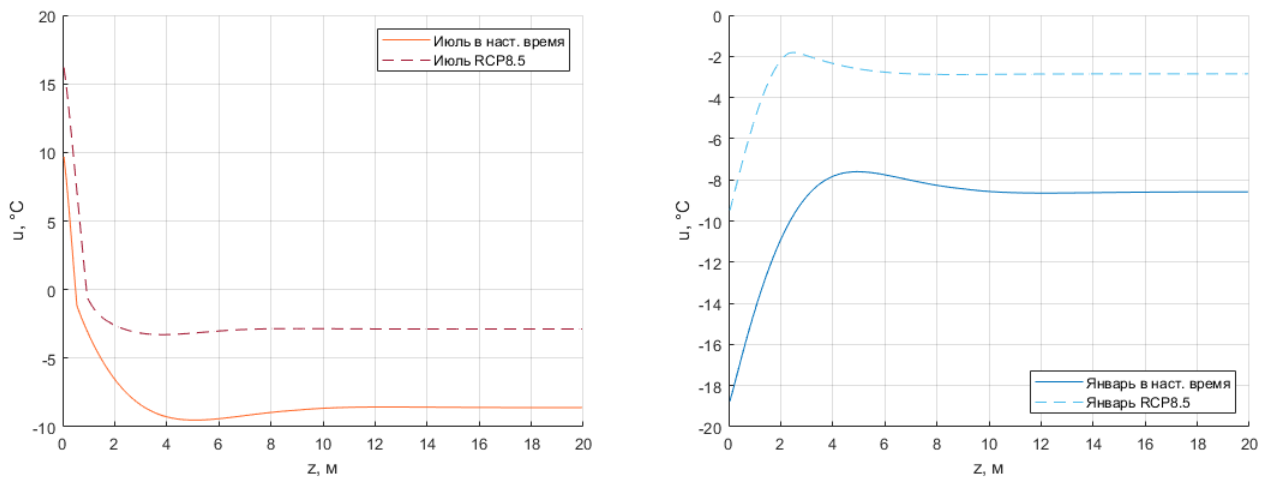


Рис. 6. Прогнозные графики распределения температуры в июле и январе в 2080 году для негативного сценария RCP8.5.

Наш прогноз демонстрирует (Рис. 6) прогрев всех глубин приблизительно на 7°C как в июле, так и в январе.

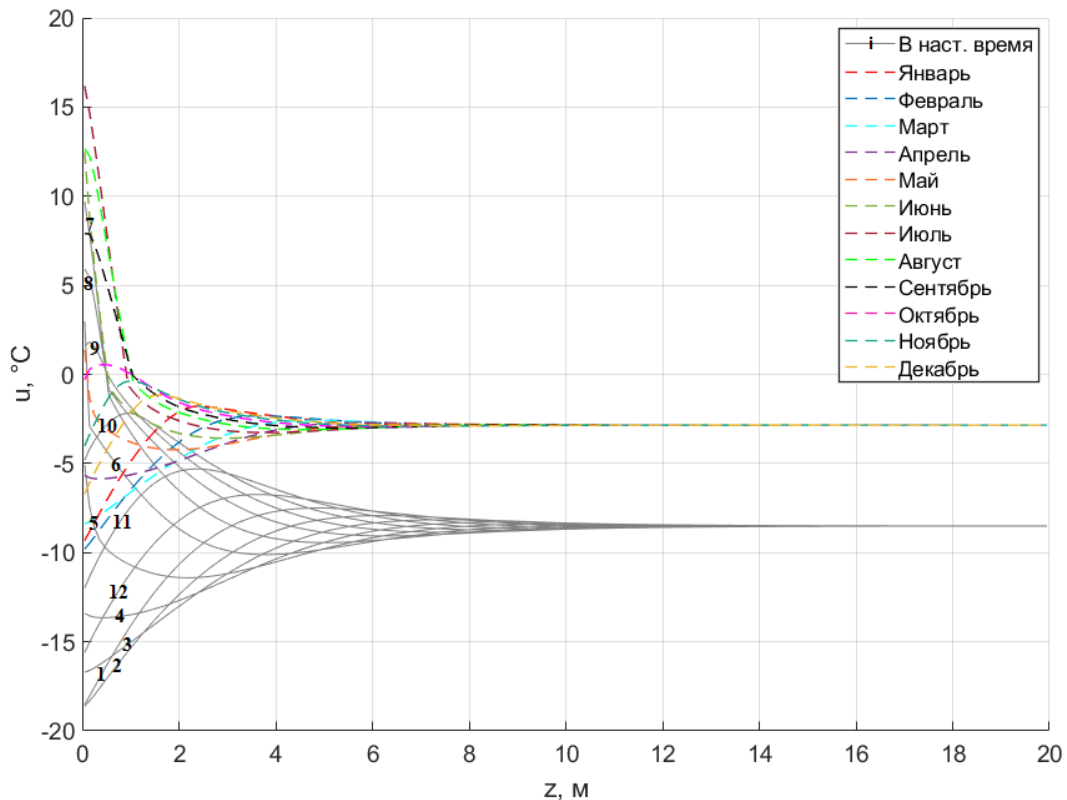


Рис. 7. Графики нестационарных периодических режимов температур грунта на текущий момент (серые) и прогнозные для негативного сценария RCP8.5 на 2080 год (цветные).

Нестационарный периодический температурный режим, изображенный на Рис. 7, сместился на $5,7^{\circ}\text{C}$ в сторону потепления, достигнув $-2,8^{\circ}\text{C}$.

Глубина сезонного оттаивания и промерзания увеличилась с 0,5 до 1 м. Глубина нулевых амплитуд уменьшилась с 12 до 8 м.

У поверхности температура земли меняется в диапазоне от $-9,8$ до $16,2^{\circ}\text{C}$ (было от $-18,6$ до $9,7^{\circ}\text{C}$), на глубине 2 м в диапазоне от $-4,8$ до $-1,4$ (было от -13 до -

$3,8$), на глубине 5 м в диапазоне от $-3,1$ до $-2,5^{\circ}\text{C}$ (было от $-9,8$ до $-7,1^{\circ}\text{C}$), на глубине 10 м от $-2,9$ до $-2,8^{\circ}\text{C}$ (было от $-8,7$ до $-8,3^{\circ}\text{C}$).

Для полноты исследований, кроме рассмотренных прогнозных моделей, смоделируем уже произошедшие изменения в температуре грунта. Как показывает практика, уже начали происходить разрушения фундаментов, заложенных примерно 40-50 лет назад [2].

В моделировании для 2020 года использовалась среднегодовая температура за промежуток 1941-2020 год [7], [8]. При рассмотрении 30-летних

промежутков видно, что последнее десятилетие внесло значительный вклад в потепление климата (Таблица 5).

Таблица 5. Среднегодовые значения для 30-летних промежутков времени.

Мес	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1951 - 1980	-28,29	-28,01	-21,96	-13,76	-5,79	6,15	14,78	10,71	3,93	-9,32	-21,66	-25,55
1981 - 2010	-26,21	-26,26	-20,68	-14,04	-4,21	7,15	14,28	11,64	4,01	-8,16	-20,54	-24,86
1991 - 2020	-26,1	-25,69	-18,84	-12,03	-3,24	8,48	14,61	11,31	4,33	-7,46	-20,59	-23,9

Смоделируем температурный режим грунта для 1980 года на основе данных по температуре за 1951-1980 годы (Рис. 8).

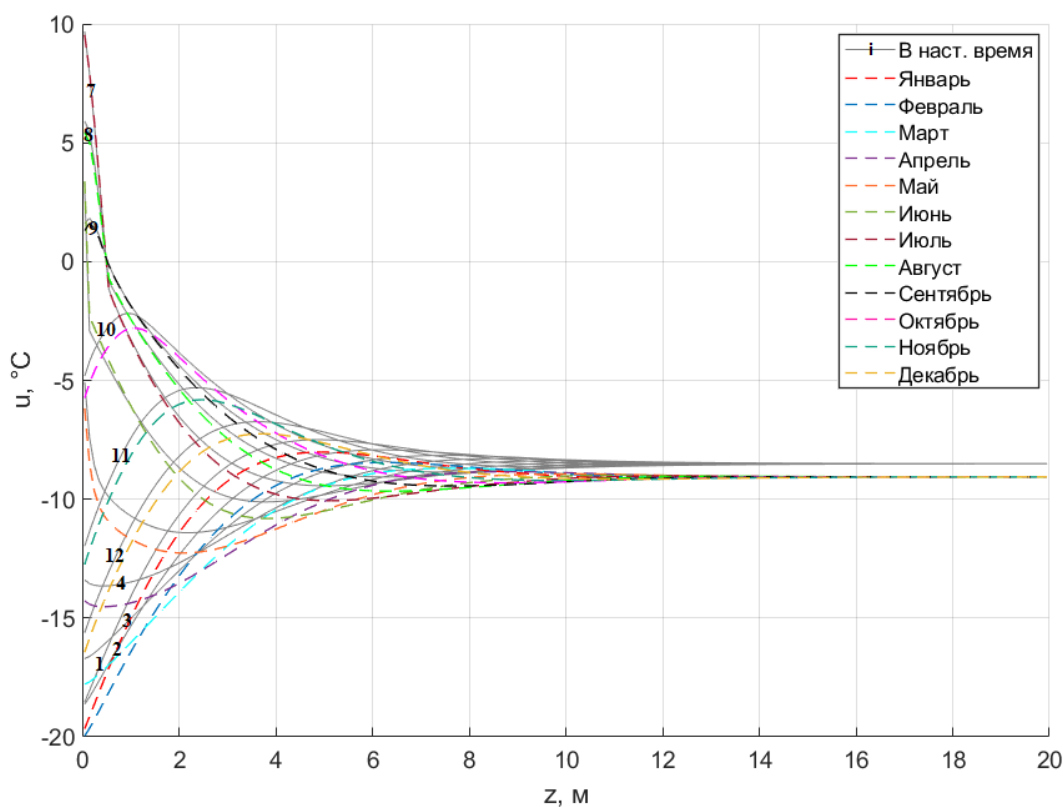


Рис. 8. Графики нестационарных периодических режимов температур грунта для 2020 года (серые) и для 1980 года (цветные).

На Рис. 8 смоделирован температурный режим для 1980 года. Нестационарный периодический температурный режим на глубине 20 м был на $0,6^{\circ}\text{C}$ холоднее, чем в 2020 году, и составлял $-9,1^{\circ}\text{C}$.

Глубина сезонного оттаивания и промерзания с 1980 года увеличилась на $0,1$ м. Глубина нулевых амплитуд уменьшилась примерно на $0,3$ м.

У поверхности температура земли меняется в диапазоне от -20 до $9,5^{\circ}\text{C}$ (в 2020 от $-18,6$ до $9,7^{\circ}\text{C}$), на глубине 2 м в диапазоне от $-13,9$ до -4 (в 2020 от -13 до -

$3,8$), на глубине 5 м в диапазоне от $-10,5$ до $-7,6^{\circ}\text{C}$ (в 2020 от $-9,8$ до $-7,1^{\circ}\text{C}$), на глубине 10 м от $-9,3$ до $-8,9^{\circ}\text{C}$ (в 2020 от $-8,7$ до $-8,3^{\circ}\text{C}$).

Также при рассмотрении средних многолетних температур по десятилетиям становится очевидным увеличение темпов потепления, начиная с 2001 года. (Таблица 6) [7], [8].

Таблица 6. Средние многолетние температуры по десятилетиям. Голубым цветом показаны самые минимальные значения температуры, красным – самые максимальные.

Мес	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1941 - 1950	-25,36	-25,77	-21,85	-11,8	-2,14	7,78	13,98	11,03	4,5	-5,65	-20,61	-23,87
1951 - 1960	-25,77	-28,09	-22,93	-13,73	-5,02	7,47	15,27	10,18	4,11	-8,8	-22,15	-25,83
1961 - 1970	-29,03	-27,34	-20,12	-14,44	-6,85	4,64	15,34	10,45	4	-8,82	-21,52	-25,35
1971 - 1980	-30,06	-28,59	-22,82	-13,12	-5,5	6,34	13,74	11,51	3,68	-10,35	-21,32	-25,46
1981 - 1990	-26,31	-25,25	-21,93	-15,04	-4,53	6,83	14,5	11,53	4,1	-8,67	-21,03	-23,83
1991 - 2000	-25,73	-24,73	-18,41	-13,61	-4,11	5,77	13,77	12,15	3,42	-9,02	-21,37	-26,29
2001 - 2010	-26,58	-28,8	-21,7	-13,46	-3,98	8,86	14,56	11,25	4,51	-6,8	-19,22	-24,45
2011 - 2019	-26,73	-24,42	-16,39	-9,71	-2,26	10,68	15,51	10,54	5,07	-6,55	-21,19	-20,96
2011 - 2020	-26	-23,55	-16,4	-9,02	-1,64	10,8	15,49	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была построена модель температурного режима грунта г. Норильска в настоящее время. Построены графики температур для каждого месяца и определены глубины сезонного оттаивания (промерзания) и глубины нулевых колебаний. Составлена модель температурного режима грунта 40-летней давности, а также составлены прогностические модели двух сценариев глобального потепления на 60 лет.

Результаты расчетов показывают значительные изменения в температурном режиме грунта при реализации обоих сценариев потепления. Тем не менее, расчеты демонстрируют сохранение вечной мерзлоты даже при негативном сценарии потепления климата. Последнее обстоятельство является обнадеживающим фактом с точки зрения сохранения несущих способностей зданий и сооружений, построенных к настоящему времени в районе г. Норильска.

БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Anisimov, Oleg A., and Frederick E. Nelson. "Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of

climatic change." *Global and Planetary Change* 14.1-2 (1996): 59-72.

[2] В МЧС назвали причину ЧП с разливом топлива в Норильске [Электронный ресурс] // РИА Новости. 2020. 3 июня. URL: <https://ria.ru/20200603/1572413719.html>.

[3] Nelson F. E., Anisimov O. A., Shiklomanov N. I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions // *Natural Hazards*. – 2002. – Т. 26. – №. 3. – С. 203-225.

[4] Parfenova E., Tchebakova N., Soja A. Assessing landscape potential for human sustainability and 'attractiveness' across Asian Russia in a warmer 21st century // *Environmental Research Letters*. – 2019. – Т. 14. – №. 6. – С. 065004.

[5] Anisimov O. A., Kokorev V. A. RUSSIAN PERMAFROST IN THE 21st CENTURY: MODEL-BASED PROJECTIONS AND ANALYSIS OF UNCERTAINTIES // *Kriosfera Zemli*. – 2017. – №. 2.

[6] РСН 67–87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами. М.: Госстрой РСФСР, 1987. 40 с.

[7] Метеорологический центр в г. Норильск. Индекс WMO: 230780 //Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://meteo.ru/>.

[8] NNDC CLIMATE DATA ONLINE from NOAA agency URL: <https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/dataproduct>.

[9] СНиП 2.02.04-88 Строительные нормы и правила. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция (СП 25.13330.2012). М.: Государственный строительный комитет СССР, 1990. 114 с.

- [10] Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3. Вып. 21. Ч. 1–6. Кн. 1. Красноярский край и Тувинская автономная область. Л., Гидрометеиздат, 1990. 623 с.
- [11] Василенко Е. С. Инженерно-геологические условия г. Норильска и проект инженерно-геологических изысканий под строительство участка трассы ЛЭП-110. – 2018. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/49357>.
- [12] Миллоджанова Г. И. Инженерно-геологические условия г. Норильска и проект инженерно-геологических изысканий под строительство объектов Надеждинского металлургического завода (Красноярский край). – 2018. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/48727>.
- [13] ГОСТ 25100-11. Грунты. Классификация.
- [14] Бондарик Г.К. Методика инженерно – геологических исследований. – М.: Недра, 1986. 333 с.
- [15] Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород. Том 2. Лабораторные методы / Под. Ред. Сергеева Е.М.. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Недра, 1984. 438 с.
- [16] Физические величины. Справочник. А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [17] Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород): Учеб. для вузов. 2-ое изд. перераб. и доп. под редакцией доктора физико-математических наук Д.А. Кожевникова — М.: ФГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 368 с., ил. ISBN 5-7246-0295-4.
- [18] Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Книжный дом «Либроком», 2014. 784 с.
- [19] Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах. М.: Издательство МЭИ. 2003. 312 с. (Перевод с английского. Patankar S.V. Computation of conduction and duct flow heat transfer. Innovative Research, Inc. 1991.).
- [20] Крылов Д.А., Сидняев Н.И., Федотов А.А. Математическое моделирование распределения температурных полей // Математическое моделирование. 2013. Т. 25. № 7. С. 3–27.
- [21] Biskaborn B. K. et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature communications. 2019. Т. 10. №. 1. С. 264.
- [22] Fedotov A.A., Khrapov P.V., Tarasyuk Yu. V. Modeling the dynamics of the temperature field of soils around gas pipelines in the permafrost zone // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 2. – С. 7-13. URL: <http://www.injoit.org/index.php/j1/article/view/894>.
- [23] Fedotov A. A., Kaniber V. V., Khrapov P. V. Forecast of the soil temperature in permafrost in response of climate warming // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8. – №. 6. – С. 53-61. URL: <http://www.injoit.ru/index.php/j1/article/view/953>.
- [24] "Representative Concentration Pathways (RCPs)". IPCC. URL: <https://www.iiasa.ac.at>.
- [25] Koven C. D., Riley W. J., Stern A. Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth System Models // Journal of Climate. 2013. Т. 26. №. 6. С. 1877-1900.

Analysis and forecasting of changes in the soil temperature distribution in the area of the city of Norilsk

A. A. Fedotov V.V. Kaniber P. V. Khrapov

Abstract – The article studies the initial boundary value problem for a non-stationary one-dimensional heat equation that simulates the distribution of soil temperature in the area of Norilsk. The mathematical model is based on solid-liquid phase transitions. To determine the model parameters, data from the meteorological station and reports on engineering and geological surveys were used to obtain the necessary physical and thermophysical characteristics of the calculated area. For the numerical solution of the problem, the finite volume method (FVM) was used. The calculation was started on January 1 of the first year of observation of the soil temperature distribution. Simulation of the soil temperature distribution was carried out until the moment of reaching the non-stationary periodic mode. In order to analyze the temperature field, graphs of the temperature dependence on the depth for January and July of the 7 selected years of observation were constructed. The study of the results showed that it takes about 50 years for the soil temperature to reach a non-stationary periodic mode at a depth of 20 m. For a steady-state periodic mode, temperature dependences on the depth for each month are constructed and the depth of the active layer (0.5 m) and the depth of zero amplitudes (12 m) are found. The forecast of the ground temperature distribution for 2080 was modeled for two scenarios of Representative Concentration Pathway (RCP) of global warming: moderate RCP2.6 and negative RCP8.5. The RCP2.6 scenario showed an increase in the depth of thawing (freezing) by 0.1 m and a decrease in the depth of zero amplitudes by 1 m, as well as an increase of soil temperature at all depths by an average of 2°C. The results of calculations for the RCP8.5 scenario showed an increase in the depth of the active layer by 0.5 m (2 times compared to the present time) and a decrease in the depth of zero amplitudes by 4 m, the soil temperature increased by 5.7°C on average. In connection with the fuel spill that occurred in May 2020 from a storage tank in Norilsk due to subsidence of the foundation mainstays, the soil temperature distribution was modeled in 1980. The results showed an increase in the depth of the active layer since 1980 by 0.1 m, which could cause subsidence of the foundation piles of the storage tank. Further, a comparison of the long-term average monthly temperatures by decades was made, in which it was found that 2010-2020 has the largest number of the highest values of average monthly temperatures. This study further confirms the degradation of permafrost.

Key words—Permafrost, cryolithozone, global warming, forecast, temperature distribution, non-stationary periodic mode, active-layer, depth of zero annual amplitudes, heat equation, finite volume method.

BIBLIOGRAPHY

- [1] Anisimov, Oleg A., and Frederick E. Nelson. "Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change." *Global and Planetary Change* 14.1-2 (1996): 59-72.
- [2] The MES called the cause of the emergency with a fuel spill in Norilsk [Electronic resource]// RIA News. 2020. 3 June. URL: <https://ria.ru/20200603/1572413719.html>.
- [3] Nelson F. E., Anisimov O. A., Shiklomanov N. I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions // *Natural Hazards*. – 2002. – T. 26. – №. 3. – C. 203-225.
- [4] Parfenova E., Tchebakova N., Soja A. Assessing landscape potential for human sustainability and 'attractiveness' across Asian Russia in a warmer 21st century // *Environmental Research Letters*. – 2019. – T. 14. – №. 6. – C. 065004.
- [5] Anisimov O. A., Kokorev V. A. RUSSIAN PERMAFROST IN THE 21st CENTURY: MODEL-BASED PROJECTIONS AND ANALYSIS OF UNCERTAINTIES // *Kriosfera Zemli*. – 2017. – №. 2.
- [6] RSN67–87. Engineering surveys for construction. Making a forecast of changes in the temperature distribution of permafrost soils by numerical methods. Moscow: Gosstroy RSFSR, 1987. 40 p.
- [7] Meteorological centre in the city of Norilsk. WMO index: 230780 // All-Russian research Institute of hydrometeorological information (VNIIGMI-MCD). URL: <http://mete.ru/>.
- [8] NNDC CLIMATE DATA ONLINE from NOAA agency URL: <https://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/dataproduct>.
- [9] SNiP 2.02.04-88 Building codes and regulations. Bases and foundations on permafrost soils. Updated version (SP 25.13330.2012). Moscow: State construction Committee of the USSR, 1990. 114 p.
- [10] Scientific and applied reference book on climate of the USSR: Ser. 3. Issue 21. CH. 1-6. KN. 1. Krasnoyarsk Krai and Tuva Autonomous region. L., Hydrometeoizdat, 1990. 623 p.
- [11] Vasilenko E. S. Engineering-geological conditions of Norilsk and the project of engineering-geological surveys for the construction of a section of the power line route 110. - 2018. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/49357>.
- [12] Millodzhanova G. I. Engineering-geological conditions of Norilsk and the project of engineering-geological surveys for the construction of objects of the Nadezhdinsky metallurgical plant (Krasnoyarsk territory). – 2018. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/48727>.
- [13] GOST 25100-11. Soils. Classification.
- [14] Bondarik G. K. Methodology of engineering-geological research. - Moscow: Nedra, 1986. 333 p.
- [15] Methodological guide to engineering and geological study of rocks. Volume 2. Laboratory methods / Ed. Sergeeva E. M.. - 2nd ed., pererab and add. - M.: Nedra, 1984. 438 p.
- [16] Physical quantities. Handbook. A. P. Babichev, N. A. Babushkina, A. M. Bratkovsky, etc.; edited by I. S. Grigoriev, E. Z. Meilikhov. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 1232 p.
- [17] Dobrynin, V. M., Wendelstein B. Yu., Kozhevnikov D. A. Petrophysics (Physics of rocks): Studies! for universities. 2nd ed. Rev. and add. edited by doctor of physical and mathematical Sciences D. A. Kozhevnikov-Moscow: FSUE publishing house "Oil and gas" Gubkin Russian state University of oil and gas, 2004. 368 p., II. ISBN 5-7246-0295-4.
- [18] Samarskiy A. A., Vabishchevich P. N. Computational heat transfer. Moscow: Book house "Librokom", 2014, 784 p.
- [19] Patankar S. V. Numerical solution of problems of thermal conductivity and convective heat transfer during flow in channels. Moscow: MEI Publishing house. 2003. 312 p. (Translated from English. Patankar S. V. calculation of thermal conductivity and heat transfer of the flow stream. Innovative research, Inc. 1991.).

- [20] Krylov D. A., Sidnyaev N. I., Fedotov A. A. Mathematical modeling of temperature field distribution // Mathematical modeling. 2013, Vol. 25, No. 7, Pp. 3-27.
- [21] Biskaborn B. K. et al. Permafrost is warming at a global scale //Nature communications. 2019. T. 10. №. 1. C. 264.
- [22] Fedotov A.A., Khrapov P.V., Tarasyuk Yu. V. Modeling the dynamics of the temperature field of soils around gas pipelines in the permafrost zone // International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – №. 2. – C. 7-13.
URL: <http://www.injoit.org/index.php/j1/article/view/894>.
- [23] Fedotov A. A., Kaniber V. V., Khrapov P. V. Forecast of the soil temperature in permafrost in response of climate warming //International Journal of Open Information Technologies. – 2020. – T. 8. – №. 6. – C. 53-61.
URL: <http://www.injoit.ru/index.php/j1/article/view/953> .
- [24] "Representative Concentration Pathways (RCPs)". IPCC.
URL: <https://www.iiasa.ac.at> .
- [25] Koven C. D., Riley W. J., Stern A. Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 Earth System Models //Journal of Climate. 2013. T. 26. №. 6. C. 1877-1900.