

Влияние верхнего граничного условия на гидротермическое поле земляного полотна железных дорог в районах вечной мерзлоты

Синь Вэньшао, А. Ф. Колос, А. В. Петряев

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: *Вэньшао Синь, Колос А. Ф., Петряев А. В.* Влияние верхнего граничного температурного условия на гидротермическое поле земляного полотна железных дорог в районах вечной мерзлоты // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 1. — С. 93–104. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-93-104

Аннотация

Цель: На основе модели, учитывающей гидротермическую связь влажности и температуры грунта, провести численное моделирование гидротермического поля земляного полотна (ЗП) железной дороги в районе распространения вечной мерзлоты. Изучить степень влияния глобального потепления и годовой амплитуды температуры на гидротермическое поле земляного полотна. **Метод:** Выполнен численный расчет земляного полотна железных дорог в программе COMSOL Multiphysics с помощью программного модуля системы дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) методом конечных элементов. Уточнены различные значения параметров температурной функции верхней границы земляного полотна, и изучено влияние этих параметров на гидротермическое поле земляного полотна. **Результаты:** На основе температурной функции измеренных данных выявлено влияние эффекта глобального потепления и годовой амплитуды температуры на гидротермическое поле земляного полотна. Получен закон изменения распределения температуры, льдистости и незамерзшей воды в земляном полотне железных дорог в районах вечной мерзлоты после стабилизации гидротермического поля. Выявлены периоды наступления максимумов и минимумов температуры, льдистости и незамерзшей воды. **Практическая значимость:** Применение данной численной модели позволяет эффективно прогнозировать тенденцию изменения гидротермического поля земляного полотна в районах вечной мерзлоты под влиянием глобального потепления.

Ключевые слова: Железная дорога, гидротермическое поле, вечная мерзлота, численное моделирование, глобальное потепление.

Введение

С развитием экономики деятельность человека в районах вечной мерзлоты становится все более активной. В районе распространения вечной мерзлоты Цинхай-Тибетского нагорья за последние 30 лет было построено множество крупных объектов, таких как автомобильные и железные дороги, линии электропередач и нефтепроводы. Деформативность этих крупных инженерных сооружений в значительной степени зависит от термической устойчивости вечной мерзлоты под ними. На изменение термоустойчивости вечной мерзлоты влияют два основных фактора. Во-первых, тепловое возмущение, создаваемое инженерными сооружениями на

поверхности. Во-вторых, влияние глобального изменения климата на температуру воздуха и солнечную радиацию в районе распространения вечномерзлых грунтов [1–4]. Поэтому влияние изменения климата на гидротермическое поле вечной мерзлоты нельзя игнорировать, если исследуемый слой вечной мерзлоты находится на относительно небольшой глубине, особенно для слоев вечной мерзлоты с высокой температурой грунта и малой их мощностью. Изменение температурного поля грунта непосредственно отражает процесс исчезновения вечной мерзлоты. При проведении численного моделирования [5, 6] начальное температурное поле и верхние граничные температурные условия (ВГТУ — т. е. граничные условия поверхностного теплообмена) слоя вечной мерзлоты напрямую определяют окончательные результаты расчетов.

Решение дифференциальных уравнений методом гидротермической связи для вечной мерзлоты

Задача гидротермической связи в двумерной модели требует решения системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Уравнение теплопередачи, предложенное в [7], имеет вид:

$$\rho C(\theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(\theta) \nabla^2 T + L \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t}, \quad (1)$$

где ρ , ρ_i — плотность грунта и льда соответственно, кг/м³;

T — температура грунтов, °С;

t — время, с;

$C(\theta)$ — объемная теплоемкость, Дж/(кг · °С);

$\lambda(\theta)$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С);

θ — объемная влажность, %;

θ_i — объемная льдистость, %;

L — скрытая теплота, выделяющаяся при фазовом переходе воды (335 · 10³ Дж/кг);

∇ — дифференциальный оператор, [$\partial/\partial x$, $\partial/\partial y$] в двумерном случае;

x , y — значения координат в горизонтальном и глубинном направлениях, м.

Объемная влажность θ грунтов определяется по формуле:

$$\theta = \theta_u + \frac{\rho_i}{\rho_w} \theta_i, \quad (2)$$

где θ_u — содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте, %;

ρ_w — плотность воды (кг/м³).

Уравнение миграции влаги, согласно [8, 9], имеет вид:

$$\frac{\partial \theta_u}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[D(\theta_u) \frac{\partial \theta_u}{\partial y} + k_g(\theta_u) \right], \quad (3)$$

где $D(\theta_u)$ — коэффициент гидравлической диффузии мерзлоты ($\text{м}^2/\text{с}$);
 $k_g(\theta_u)$ — коэффициент проницаемости ненасыщенного грунта в направлении гравитационного ускорения ($\text{м}/\text{с}$).

Коэффициент диффузии влаги мерзлоты определяется по формуле:

$$D(\theta_u) = \frac{k(\theta_u)}{c(\theta_u)} \cdot I, \quad (4)$$

где $k(\theta_u)$ — проницаемость ненасыщенного грунта, которая представляет скорость потока при единичном гидравлическом градиенте, $\text{м}/\text{с}$;

$c(\theta_u)$ — удельная водоемкость, м^{-1} ;

I — коэффициент сопротивления, безразмерный, $I = 10^{-10\theta_i}$.

Для учета динамического равновесия фазового перехода мерзлого грунта необходимо ввести новое уравнение, чтобы установить связь между θ_i , θ_u , T .

Вода в вечной мерзлоте существует в двух формах: пористый лед и незамерзшая вода. Поэтому в литературе предложено понятие твердожидкостного соотношения B_i [10]. Отношение объемной влажности льда к объемной влажности незамерзшей воды B_i является однозначной функцией температуры и определяется выражением:

$$B_i(T) = \frac{\theta_i}{\theta_u} = \begin{cases} \frac{\rho_w}{\rho_i} \left(\frac{T}{T_{bf}} \right)^b - 1,1 & T < T_{bf}, \\ 0 & T \geq T_{bf} \end{cases}, \quad (5)$$

где b — коэффициент, связанный с типом грунтов.

Данная численная модель реализована с помощью конечно-элементной программы COMSOL Multiphysics. Модель апробирована, и результаты хорошо согласуются с фактическими данными измерений [10, 11].

Расчетная схема и исходные данные

Расчетная схема выбрана для участка с высокой температурой и льдистостью в районе Бэйлухе Цинхай-Тибетской железной дороги. Участок расположен в зоне вечной мерзлоты [12] со среднегодовой температурой грунта в пределах $-1,8 \sim 0,5$ °C

и мощностью деятельного слоя 1,6 ~ 3,4 м [13]. Высота сечения данного участка земляного полотна — 3,5 м, ширина верхней поверхности — 11,5 м, уклон — 1:1,5, глубина основания — 30 м, длина — 80 м. По данным исследования, в расчетном диапазоне часть земляного полотна ниже плоскости А1-Ж1 представлена гравием (0 ~ -2 м), пылеватой глиной (-2 ~ -8 м) и выветрившимся аргиллитом (-8 ~ -30 м). Модель расчета представлена на рис. 1.

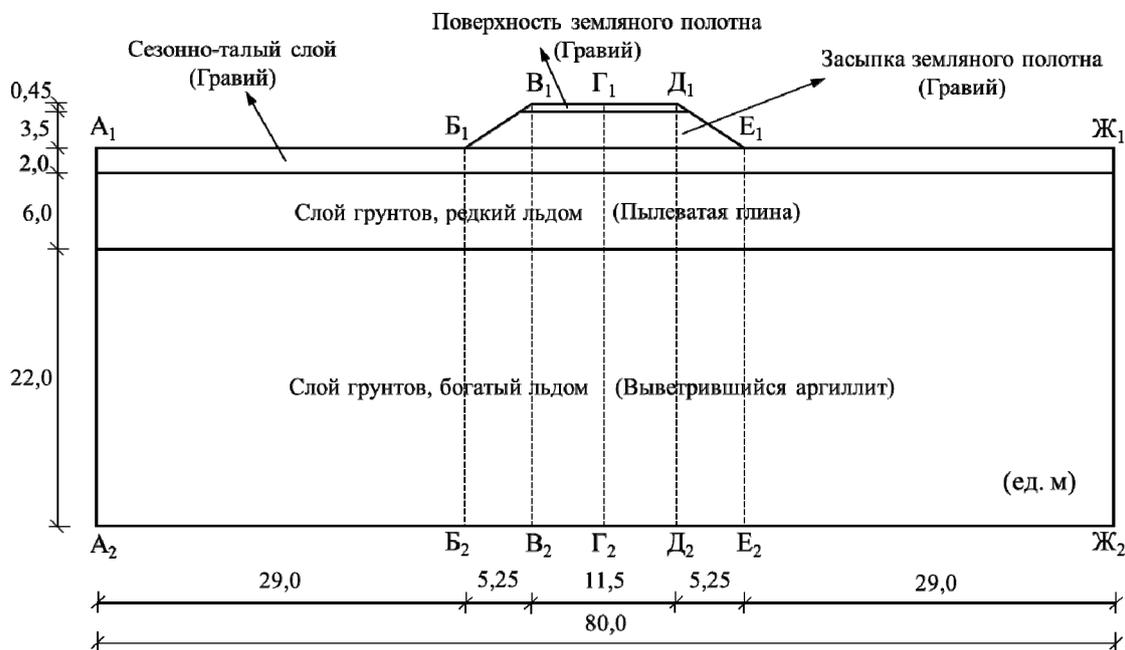


Рис. 1. Расчетная модель

Основные физические параметры материалов, необходимые для расчета температурного и влажностного полей земляного полотна, приведены в табл. 1 [14, 15].

ТАБЛИЦА 1. Основные физические параметры материалов ЗП

Материалы ЗП	ρ	$w, \%$	λ		C		L	k	
			λ_f	λ_u	C_f	C_u		k_u	k_f
Гравий (поверхность ЗП)	1950	6	1,4	1,15	706	861	10 461	$1,0 \cdot 10^{-19}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
Гравий (засыпка ЗП)	1900	6	1,4	1,15	706	861	10 736	$1,0 \cdot 10^{-19}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
Гравий (СТС)	1800	15	2,414	1,837	851	1099	37 687	$1,3 \cdot 10^{-19}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Пылеватая глина	1600	30	2,12	1,42	1222	1608	52 527	$5,0 \cdot 10^{-21}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
Выветрившийся аргиллит	1800	15	1,82	1,6	981	1272	20 944	$1,6 \cdot 10^{-21}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$

Примечание: нижние индексы f и u обозначают замороженное и оттаявшее состояния соответственно.

Граничные условия

Граничное температурное условие:

Теплообмен на поверхности верхнего граничного условия включает конвекцию, излучение и т. д. Совместное воздействие всех условий теплообмена приведет к изменению температуры верхней границы. Поэтому верхнее граничное условие принимается за первый тип граничного условия, представляющего собой известную функцию установленной температуры верхней границы. Уравнение:

$$T = T_0 + G(t) + A \sin(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

где T_0 — средняя температура поверхности грунта, °С;

$G(t)$ — функция изменения температуры поверхности грунта во времени;

A — половина годовой амплитуды температуры на поверхности грунта, °С, согласно измеренным данным в районе проекта, $A = 12$ °С;

ω — угловая частота, определяемая периодом изменения температуры, обычно принимаемым за период в один год;

φ — начальная фаза, определяющая начальный момент. Некоторые особые фазы показаны в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Особые фазы температурной функции

Дата	Знак A	Значение φ
01.01	–	$\pi/2$
01.04	–	π
01.07	+	$\pi/2$
01.10	+	π

При рассмотрении изменения будущего климата функцию $G(t)$ необходимо давать на основе прогнозирования температуры.

Как правило, функция $G(t)$ рассматривается как линейное выражение при определенной скорости потепления: $G(t) = C \cdot t$, причем C является константой. Согласно соответствующему отчету МГЭИК [16] и результатам исследований Цинь Дахэ [17], рассматривающих влияние глобального потепления, в регионе Цинхай-Тибетского нагорья в ближайшие 50 лет ожидается потепление на 2,6 °С. Тогда максимальное значение C составляет 0,052 °С/год.

Согласно соответствующим данным измерений температуры [18], в табл. 3 приведены три расчетных верхних граничных условия. Можно исследовать влияние эффектов глобального потепления и годовых амплитуд температуры на гидротермическое поле земляного полотна.

ТАБЛИЦА 3. Различные верхние граничные температурные условия

Тип ВГТУ	Положение	T_0	C	A
T_1	Центр ЗП (B_1D_1)	2,7	0	12,00
	Откос (B_1B_1, E_1D_1)	1,6		9,70
	Природная поверхность ($A_1B_1, E_1Ж_1$)	-1,5		8,00
T_2	B_1D_1	2,7	0,052	12,00
	B_1B_1, E_1D_1	1,6		9,70
	$A_1B_1, E_1Ж_1$	-1,5		8,00
T_3	B_1D_1	2,7	0,052	14,40
	B_1B_1, E_1D_1	1,6		11,64
	$A_1B_1, E_1Ж_1$	-1,5		9,60

За нижнее граничное условие принимается второй тип граничного условия, т. е. плотность теплового потока на границе. В этой модели геотермический градиент принимается равным $0,03 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$, преобразован в тепловой поток в качестве нижнего граничного условия.

Результаты расчета температурного поля

По полученным результатам установлено, что температурное поле земляного полотна имеет тенденцию быть стабильным на пятом периоде расчета, а результаты расчета на участке более 3 м ниже естественного грунта практически не меняются. На рис. 2 представлены облачная фракция изменения температуры и зависимость температуры и глубины в диапазоне 6,5 м ниже центра земляного полотна за весь пятый год.

Из рисунка видно, что из-за глобального потепления температурное поле земляного полотна находится в полностью оттаявшем состоянии с июля по октябрь, а в остальное время года частично в замороженном состоянии. Температура ЗП самая низкая в январе и самая высокая в июле.

Таким образом, получено влияние различных верхних граничных условий на температурное поле земляного полотна. Сравнивая температурное поле под действием верхних граничных температурных условий T_1 и T_2 , можно видеть, что климатические условия с учетом глобального потепления приводят к небольшому, но неочевидному повышению температуры земляного полотна. Сравнивая ВГТУ T_2 и T_3 , видно, что при неизменности среднегодовой температуры увеличение амплитуды годовой температуры существенно повлияет на изменение температурного поля ЗП.

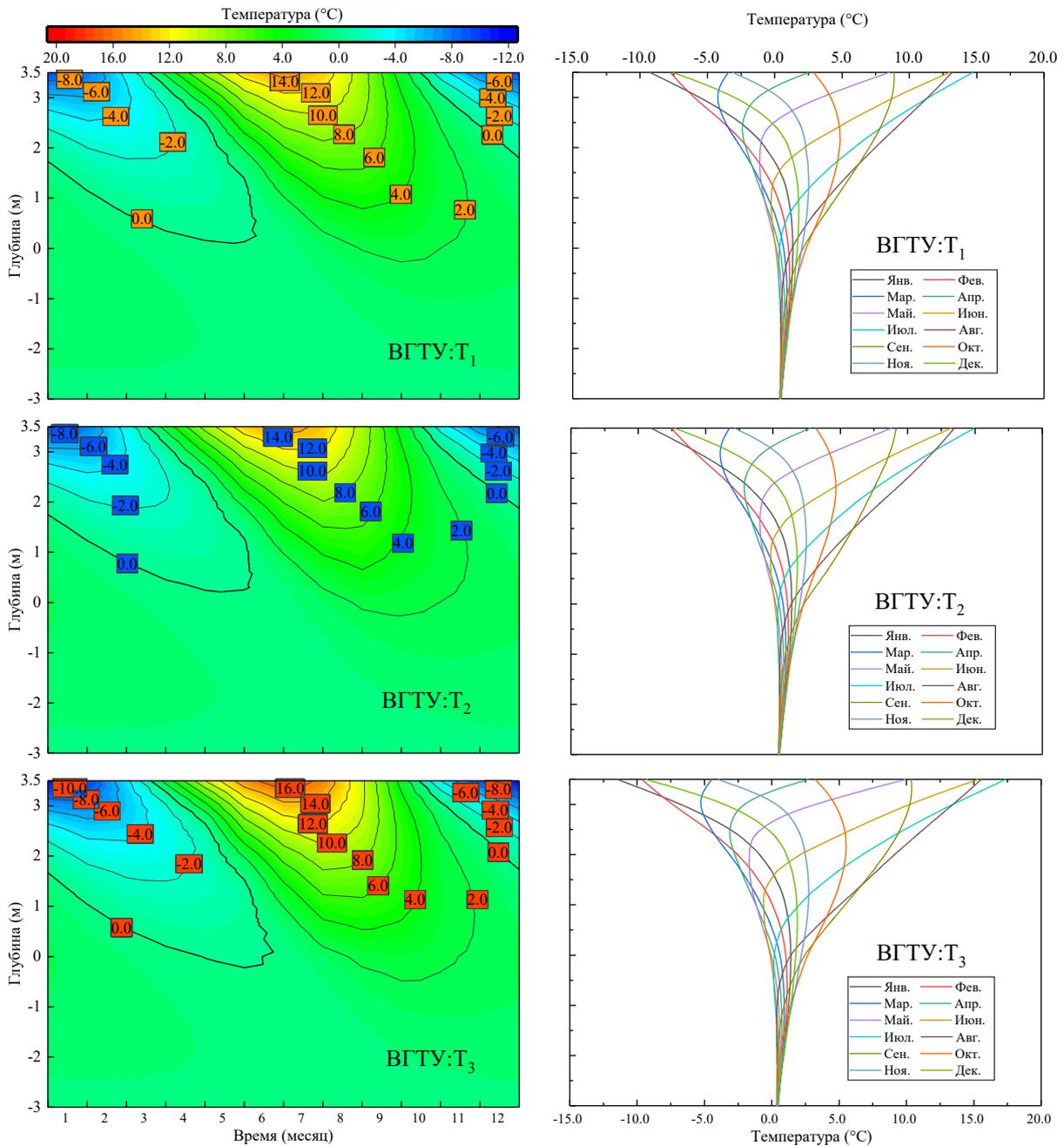


Рис. 2. Результаты расчета температурного поля

ТАБЛИЦА 4. Экстремум температуры

ВГТУ	Экстремум	Месяц	Температура (°C)
T_1	Мин.	Январь	-9,26
	Макс.	Июль	14,70
T_2	Мин.	Январь	-9,04
	Макс.	Июль	14,96
T_3	Мин.	Январь	-11,46
	Макс.	Июль	17,36

Результаты расчета поля влажности

Расчетные результаты поля влажности состоят из двух компонентов: льдистости и незамерзшей воды. На рис. 3 представлены результаты расчета поля влажности, слева — результат льдистости, а справа — содержания незамерзшей воды.

По результатам расчета льдистости и незамерзшей воды можно определить время и место появления их максимальных значений, как показано в табл. 5.

ТАБЛИЦА 5. Максимальные значения льдистости и содержания незамерзшей воды

Тип показателя	ВГТУ	Время/месяц	Положение (высота)/м	Максимум/%
Льдистость	T_1	2	3,03	13,84
	T_2	2	2,80	10,71
	T_3	2	3,03	18,70
Содержание незамерзшей водой	T_1	5	2,80	16,75
	T_2	5	2,55	16,41
	T_3	5	3,03	22,57

Из результатов расчета поля влажности и сравнения данных в табл. 5 получены следующие закономерности. Максимальная льдистость приходится на февраль, по сравнению с самой низкой температурой января образование льда в земляном полотне имеет определенный гистерезисный эффект. Максимальное содержание незамерзшей воды приходится на май. Эффект глобального потепления значительно снижает льдистость грунта земляного полотна зимой, но оказывает незначительное влияние на содержание незамерзшей воды. Увеличение годовой амплитуды температур значительно увеличивает глубину промерзания грунта земляного полотна зимой, а также увеличивает влажность грунта земляного полотна летом. Причина в том, что промерзание земляного полотна в зимний период вызовет восходящую миграцию влаги в его части, расположенной ниже естественной поверхности земли.

Заключение

Глобальное потепление является неоспоримым фактом. Из результатов расчетов видно, что эффект глобального потепления ослабит промерзающее действие грунта земляного полотна зимой и приведет к преждевременному оттаиванию. Увеличение годовой амплитуды температуры воздуха влияет на значения температуры грунтов земляного полотна, их льдистости и содержания незамерзшей воды. При увеличении годовой амплитуды температуры воздуха должны быть выбраны соответствующие инженерные мероприятия для защиты вечной мерзлоты или замедления ее оттаивания.

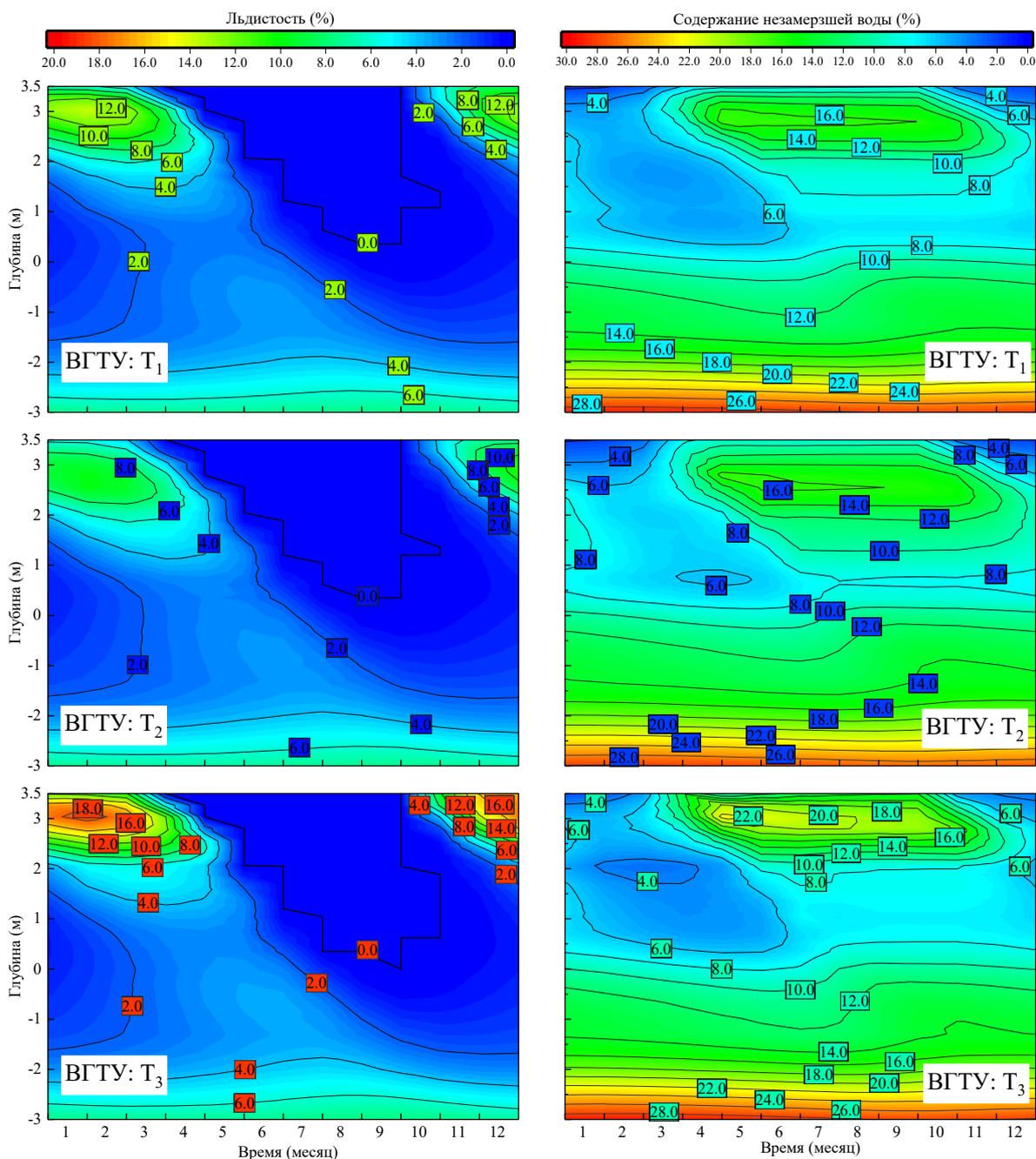


Рис. 3. Результаты расчета поля влажности

Библиографический список

1. Yang J. Vulnerability of frozen ground to climate change in China / Y. Yang, S. Yang, M. Li et al. // Journal of Glaciology and Geocryology. — 2013. — Vol. 35(6). — Pp. 1436–1445.
2. Wang C. Area change of the frozen ground in China in the next 50 years / C. Wang, S. Jin, H. Shi // Journal of Glaciology and Geocryology. — 2014. — Vol. 36(1). — Pp. 1–8.
3. Zhang Z. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as climate warming / Z. Zhang, Q. Wu // Journal of Glaciology and Geocryology. — 2012. — Vol. 34(3). — Pp. 505–511.

4. Luo D. Degradation of permafrost and cold-environments on the interior and eastern Qinghai Plateau / D. Luo, H. Jin, L. Lin et al. // *Journal of Glaciology and Geocryology*. — 2012. — Vol. 34(3). — Pp. 538–546.
5. Li S. The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai-Xizang (Ti-bet) Plateau, China, under climate warming / S. Li, G. Cheng, D. Guo // *Science in China (Series D)*. — 1996. — Vol. 39(4). — Pp. 434–441.
6. Nan Z. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years / Z. Nan, S. Li, G. Cheng // *Science in China (Series D)*. — 2005. — Vol. 48(6). — Pp. 797–804.
7. Tao W. Heat transfer / W. Tao. — Xi'an, Northwestern Polytechnical University Press, 2006. — 592 p.
8. Lu N. Unsaturated soil mechanics / N. Lu, W. J. Likos. — Beijing: Higher Education Press, 2012. — 403 p.
9. Taylor G. S. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing / G. S. Taylor, J. N. Luthin // *Canadian geotechnical journal*. — 1978. — Vol. 15(4). — Pp. 548–555.
10. Bai Q. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil / Q. Bai, X. Li, Y. Tian et al. // *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. — 2015. — Vol. 37(z2). — Pp. 131–136.
11. Xin W. Frost Jacking characteristics and Bearing Capacity of Tower Foundation in Seasonally Frozen Soil. Master thesis / W. Xin. — Beijing, 2020. — 99 p.
12. Yin G. Effects of local factors and climate on permafrost conditions and distribution in Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau, China / G. Yin, F. Niu, Z. Lin et al. // *Science of the Total Environment*. — 2017. — Vol. 581. — Pp. 472–485.
13. Wu Q. Changes in active-layer thickness and near-surface permafrost between 2002 and 2012 in alpine ecosystems, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China / Q. Wu, Y. Hou, H. Yun et al. // *Global and Planetary Change*. — 2015. — Vol. 124. — Pp. 149–155.
14. Zheng B. Investigation for the deformation of embankment underlain by warm and ice-rich permafrost / B. Zheng, J. Zhang, Y. Qin // *Cold Regions Science and Technology*. — 2010. — Vol. 60(2). — Pp. 161–168.
15. Yuan C. Formation mechanism of longitudinal cracks in expressway embankments with inclined thermosyphons in warm and ice-rich permafrost regions / C. Yuan, Q. Yu, Y. You et al. // *Applied Thermal Engineering*. — 2018. — Vol. 133(25). — Pp. 21–32.
16. Cooper R. N. Climate Change / R. N. Cooper // *Foreign Affairs*. — 2002. — Vol. 81. — Iss. 1. — P. 208.
17. Qin D. Climate change science and sustainable development / D. Qin // *Progress in Geography*. — 2014. — Vol. 33(07). — Pp. 874–883.
18. Sun Z. Experimental and Numerical Analyses on Traditional Embankment of Qinghai Tibet Railway / Z. Sun, W. Ma, Z. Wen et al. // *Journal of the China Railway Society*. — 2010. — Vol. 32(03). — Pp. 71–76.

Дата поступления: 23.12.2022

Решение о публикации: 20.02.2023

Контактная информация:

СИНЬ Вэньшао — аспирант; wsxin9607@163.com

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; kolos2004@inbox.ru

ПЕТРЯЕВ Андрей Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; pgups60@mail.ru

Influence of Upper Boundary Condition on Railway Subgrade Hydrothermal Field in Permafrost Areas

Xin Wenshao, A. F. Kolos, A. V. Petriaev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Wenshao Xin, Kolos A. F., Petriaev A. V. Influence of Upper Boundary Condition on Railway Subgrade Hydrothermal Field in Permafrost Areas. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 1, pp. 93–104. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-1-93-104

Summary

Purpose: Based on numerical model that takes into account the hydrothermal interrelation of soil humidity and temperature, to carry out numerical modeling of hydrothermal field of railway subgrade in the area of permafrost spread. To study the influence degree of global warming and temperature annual amplitude on hydrothermal field of subgrade. To determine the need for reasonable and economical engineering measures to ensure the stability of subgrade. **Method:** Calculation of hydrothermal bonding of railroad subgrade has been performed in COMSOL Multiphysics software with the use of partial differential equation (PDE) module with the methods of finite elements. Different values of the parameters of subgrade upper boundary temperature function are specified and the effect of these parameters on subgrade hydrothermal field is studied. **Results:** Based on measured data temperature function, the influence of global warming effect and temperature annual amplitude on subgrade hydrothermal field was determined. Change law and characteristics of temperature distribution, ice content and unfrozen water in railway subgrade in permafrost areas after hydrothermal field stabilization has been obtained. The periods of maxima and minima onset for temperature as well as for ice content and unfrozen water are given. **Practical significance:** The use of given numerical model allows to predict effectively the tendency of subgrade hydrothermal field change in permafrost areas under global warming influence. Based on the numerical calculation results, relevant technical recommendations are shown for elimination or reduction of engineering accidents caused by temperature changes in permafrost regions.

Keywords: Railway, hydrothermal field, permafrost, numerical modeling, global warming.

References

1. Yang J., Yang S., Li M. et al. Vulnerability of frozen ground to climate change in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2013, vol. 35(6), pp. 1436–1445.
2. Wang C., Jin S., Shi H. Area change of the frozen ground in China in the next 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2014, vol. 36(1), pp. 1–8.
3. Zhang Z., Wu Q. Predicting changes of active layer thickness on the Qinghai-Tibet Plateau as climate warming. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2012, vol. 34(3), pp. 505–511.
4. Luo D., Jin H., Lin L. et al. Degradation of permafrost and cold-environments on the interior and eastern Qinghai Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2012, vol. 34(3), pp. 538–546.
5. Li S., Cheng G., Guo D. The future thermal regime of numerical simulating permafrost on Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China, under climate warming. *Science in China (Series D)*. 1996, vol. 39(4), pp. 434–441.

6. Nan Z., Li S., Cheng G. Prediction of permafrost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years. *Science in China (Series D)*. 2005, vol. 48(6), pp. 797–804.
7. Tao W. Heat transfer. Xi'an, Northwestern Polytechnical University Press, 2006, 592 p.
8. Lu N., Likos W. J. Unsaturated soil mechanics. Beijing: Higher Education Press, 2012, 403 p.
9. Taylor G. S., Luthin J.N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing. *Canadian geotechnical journal*. 1978, vol. 15(4), pp. 548–555.
10. Bai Q., Li X., Tian Y. et al. Equations and numerical simulation for coupled water and heat transfer in frozen soil. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2015, vol. 37(z2), pp.131–136.
11. Xin W. Frost Jacking characteristics and Bearing Capacity of Tower Foundation in Seasonally Frozen Soil. Master thesis. Beijing, 2020, 99 p.
12. Yin G., Niu F., Lin Z. et al. Effects of local factors and climate on permafrost conditions and distribution in Beiluhe basin, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Science of the Total Environment*. 2017, vol. 581, pp. 472–485.
13. Wu Q., Hou Y., Yun. H. et al. Changes in active-layer thickness and near-surface permafrost between 2002 and 2012 in alpine ecosystems, Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, China. *Global and Planetary Change*. 2015, vol. 124, pp. 149–155.
14. Zheng B., Zhang J., Qin Y. Investigation for the deformation of embankment underlain by warm and ice-rich permafrost. *Cold Regions Science and Technology*. 2010, vol. 60(2), pp. 161–168.
15. Yuan C., Yu Q., You Y. et al. Formation mechanism of longitudinal cracks in expressway embankments with inclined thermosyphons in warm and ice-rich permafrost regions. *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 133(25), pp. 21–32.
16. Cooper R. N. Climate Change. *Foreign Affairs*. 2002, vol. 81, Iss. 1, p. 208.
17. Qin D. Climate change science and sustainable development. *Progress in Geography*. 2014, vol. 33(07), pp. 874–883.
18. Sun Z., Ma W., Wen Z. et al. Experimental and Numerical Analyses on Traditional Embankment of Qinghai Tibet Railway. *Journal of the China Railway Society*. 2010, vol. 32(03), pp. 71–76.

Received: December 23, 2022

Accepted: February 20, 2023

Author's information:

Wenshao XIN — Postgraduate Student; wsxin9607@163.com

Aleksey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; kolos2004@inbox.ru

Andrey V. PETRYAEV — PhD in Engineering, Senior Researcher; pgups60@mail.ru