

# Прогноз температурного режима грунта в криолитозоне с учетом потепления климата

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

**Аннотация**—В статье проведено исследование начально-краевой задачи для нестационарного одномерного уравнения теплопроводности, моделирующей распределение температуры грунта в районе г. Якутска. Для определения параметров математической модели были использованы данные метеорологической станции и экспертизы инженерно-геологических изысканий. Моделирование температурного режима грунта проводилось до момента выхода на нестационарный периодический режим. Для численного решения поставленной задачи использовался метод контрольного объема (МКО). За начало расчетов было принято 1 января первого года наблюдения за температурным режимом грунта. С целью анализа температурного поля грунта были построены графики зависимости температуры от глубины для июня и октября 1-го, 10-го, 35-го, 50-го и 100-го года. Исследование результатов показало, что для выхода температуры грунта на глубине до 30 м на нестационарный периодический режим необходимо около 50 лет. Далее были смоделированы температурные режимы каждого месяца и найдена глубина сезонного оттаивания и промерзания, равная 5 м, а также глубина нулевых амплитуд, равная 17 м. Были установлены диапазоны изменения температуры: для поверхности от -18 до 16,5°C; для 5 м в диапазоне от -6 до 0,5°C и для 10 м от -3 до -2°C. Смоделирован прогноз температурного режима грунта на 2080 год по двум сценариям Representative Concentration Pathway глобального потепления: умеренному RCP2.6 и негативному RCP8.5. Сценарий RCP2.6 показал сохранение вечной мерзлоты с увеличением глубины оттаивания (промерзания) более чем в 2 раза, а также увеличение температуры по глубине в среднем на 2,5°C. Из результатов расчетов по сценарию RCP8.5 следует полное исчезновение вечной мерзлоты на глубинах 30 м и далее, что повлечет за собой дестабилизацию грунта в рассматриваемой области.

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

Статья получена 27 мая 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](mailto:le-tail@list.ru), [fedotov\\_a\\_a@bmstu.ru](mailto:fedotov_a_a@bmstu.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](mailto:kanibervolodya@bk.ru), [kanibervv@student.bmstu.ru](mailto:kanibervv@student.bmstu.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](mailto:pvkhrapov@gmail.ru), [khrapov@bmstu.ru](mailto:khrapov@bmstu.ru).

## 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 или, с другой стороны, увеличить области благоприятного грунта, не подверженного серьезным сезонным изменениям и подходящим для ведения различной хозяйственной деятельности [2].

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 вечно мерзлоты и суровости зимних холодов [3-4]. В связи с этим возникает необходимость исследования и прогнозирования температуры грунта [5].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе требуется численно смоделировать температурный режим сухих грунтов. Такое состояние среды в нестационарной одномерной постановке описывается следующим уравнением теплопроводности:

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

где  $c$  - удельная теплоемкость;  $\rho$  - плотность;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $u(z, t)$  - температура среды;  $s$  - мощность внутренних источников тепла [6].

Решение уравнения (1), удовлетворяющее начальному условию

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

необходимо найти в ограниченной области  $D = \{0 \leq z \leq zL\}$ .

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

$$-\lambda \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = h \cdot (\theta(t) - u(0, t)), \quad (3)$$

$$h = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + R}, \quad (4)$$

где  $h$  – коэффициент теплоотдачи,  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена, а  $R$  – термическое сопротивление [7].

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

$$\lambda \frac{\partial u(zL, t)}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

### III. НАЧАЛЬНОЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

В задаче (1)-(5) 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 данной глубине (см. 5).

Для задания верхнего граничного условия была составлена Таблица 1 средних многолетних температур воздуха по месяцам, зафиксированных метеорологической станцией (Индекс WMO: 24959) [8].

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 (°C)	-39	-34,5	-20,3	-4,6	7,5	16,2	19,3	15,2	5,9	-7,8	-27,6	-37,7
Снеж.покр. (см)	27,3	31	32,2	23,8	6,1				2,6	7	15,9	22,7
20	-9,1	-9,9	-8,8	-4,7	3,2	12,4	17,1	15,1	7,6	-0,3	-4,2	-7,1
40	-6,4	-7,2	-6,4	-4	0,4	7,9	13,4	13	7,5	0,7	-2	-4,5
60	-9,3	-12,6	-12,6	-8,5	-1,6	7,9	13,5	13,6	7,9	0,9	-1,8	-5,2
80	-5,3	-6,7	-6,7	-4,9	-2	2,6	8,5	10,2	6,8	1,4	-0,7	-2,7
120	-2,4	-4,1	-4,8	-4,1	-2,3	-0,6	3,5	6,4	5,2	1,5	-0,2	-0,8
160	-0,9	-2,1	-3,1	-3	-2,1	-1,3	0	2,9	3,4	1,3	0	-0,3
240	-0,4	-0,5	-0,7	-1	-1	-1	-0,8	-0,6	0	0,1	-0,2	-0,4
320	-0,6	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-0,9	-0,9	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,6

В Таблице 1 представлены многолетние среднемесячные значения толщины снежного покрова и температуры на соответствующей глубине до 320 см, так как ниже данного значения начинается вечная мерзлота [8].

Мощность вечномерзлых грунтов в Якутске составляет 200-300 метров, за городом 300-350 метров,

в 5-6 км от города глубина промерзания составляет 350-450 метров [9].

Якутск расположен в древнем русле реки Лены. Типичный геологический разрез выделяется степенью обводненности. Для исследования литологического состава грунта (Таблица 2) обратимся к инженерно-геологической экспертизе к объекту строительства в черте города [10].

Таблица 2. Геологический разрез г. Якутска.

Номер Слоя (толщи)	Плотность грунта г/м <sup>3</sup>	Литология
№ 1а	1640	Намывной грунт (песок мелкий средней плотности с частыми прослоями песка средней крупности и линзами песка крупного, светло-желтый, с включением гравия и гальки до 10%), малой степени водонасыщения
№ 1б	1720	Насыпной грунт (песок средней крупности средней плотности светло-желтый, с частыми прослоями песка мелкого с включением гравия и гальки до 10%), малой степени водонасыщения
№ 2	1760	Песок пылеватый темно-серый, средней степени водонасыщения, с частыми прослоями супеси пластичной, мощностью до 5 см, с примесью органических веществ
№ 3	1770	Песок мелкий желтовато-коричневый, средней степени водонасыщения, с редкими прослоями суглинка слабозаторфованного, мощностью до 20 см
№ 4	1850	Песок средней крупности светло-желтый, серо-желтый, водонасыщенный, с редким включением гравия в подошве слоя
№ 5	1890	Песок мелкий серый, темно-серый, пластичномерзлый, с прослоями песка крупного и средней крупности, мощностью до 20 см, с редким включением гравия, слабльдистый, с массивной криогенной текстурой
№ 6	1890	Песок средней крупности серовато-желтый, пластичномерзлый, с редкими прослоями песка мелкого и крупного, с включением гравия до 10%,

		слабодыстый, массивной криотекстуры
№ 7	1890	Песок гравелистый серый, пластичномерзлый. Встречен локально, в виде небольших прослоев и линз в песках средней крупности и мелких.

После анализа инженерно-геологической экспертизы в Якутске средняя плотность грунта взята равной  $\rho = 1800 \text{ кг} / \text{м}^3$ . Из [11] (Таблица 3 обязательного Приложения 1 “Физические и теплофизические характеристики вечномерзлых грунтов” стр. 38) в нашей одномерной модели, с учетом ранее определенной плотности (см. выше) для сухого (влажность  $<5\%$ ) мерзлого грунта, были приняты следующие значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости:  $\lambda = 1,3 \text{ ккал} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C})$  и  $c = 0,25 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Начальная температура грунта в расчетной области была принята равной значению  $-1^\circ\text{C}$ . Снежный покров в нашей модели отсутствует.

Численное решение было получено при помощи метода контрольного объема (МКО). Особенностью данного метода является получение дискретных аналогов, являющихся математической аппроксимацией уравнений математической физики, которые имеют ясный физический смысл: они представляют собой дискретные выражения законов сохранения. Численное решение задачи (1)-(5), полученное методом контрольного объема, удовлетворяет закону сохранения энергии во всей расчетной области [12,13].

#### IV. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Численное решение поставленной начально-краевой задачи было получено при помощи программы, написанной в среде MATLAB.

Чтобы исследовать выход температурного режима на нестационарный периодический процесс, возьмем 2 месяца - июнь и октябрь и исследуем, через какое время температурный режим грунта на глубине 30 м стабилизируется. Построим графики для июня и октября через различные периоды времени.

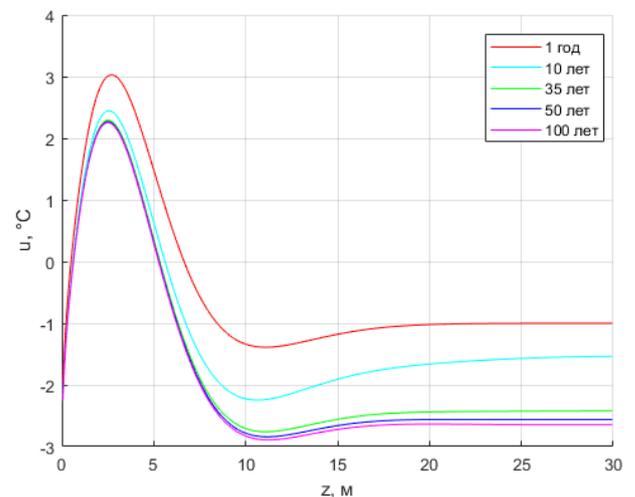
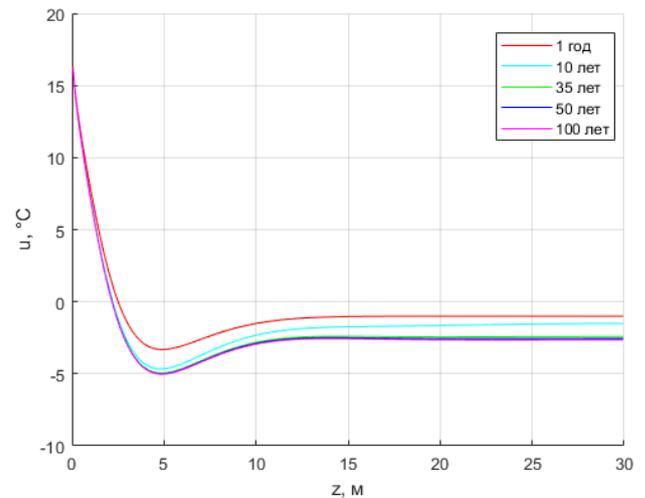


Рис. 1. График распределения температуры грунта в июне и октябре в 1 год и через 10, 35, 50, 100 лет.

Из полученных графиков (Рис. 1) видно, что после 1 года распределение температуры в обоих случаях смещается от начального условия ( $-1^\circ\text{C}$ ). Через 50 лет графики начинают совпадать с достаточной точностью, т.е. зависимость температуры грунта от времени вышла на нестационарный периодический режим, при этом значение температуры на глубине 30 м равно  $-2,6^\circ\text{C}$ .

Объединим полученные графики нестационарного периодического режима для обоих месяцев на одном рисунке.

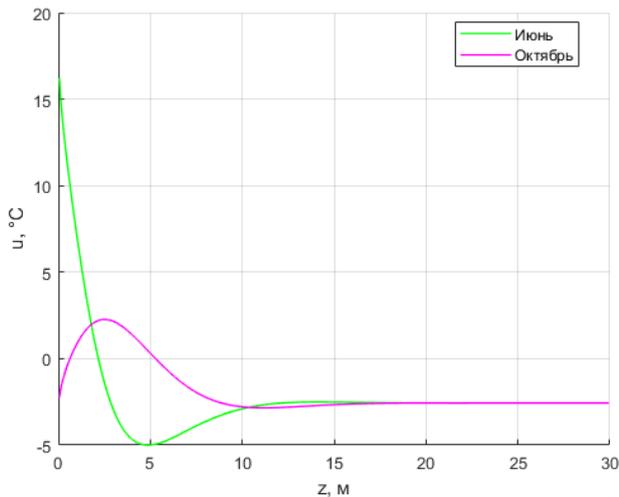


Рис. 2. График распределения температуры грунта в июне и октябре.

Из рис. 2 видно, что ниже 17-17,5 м указанные зависимости совпадают.

Далее построим графики распределения температуры для каждого месяца в течение одного года.

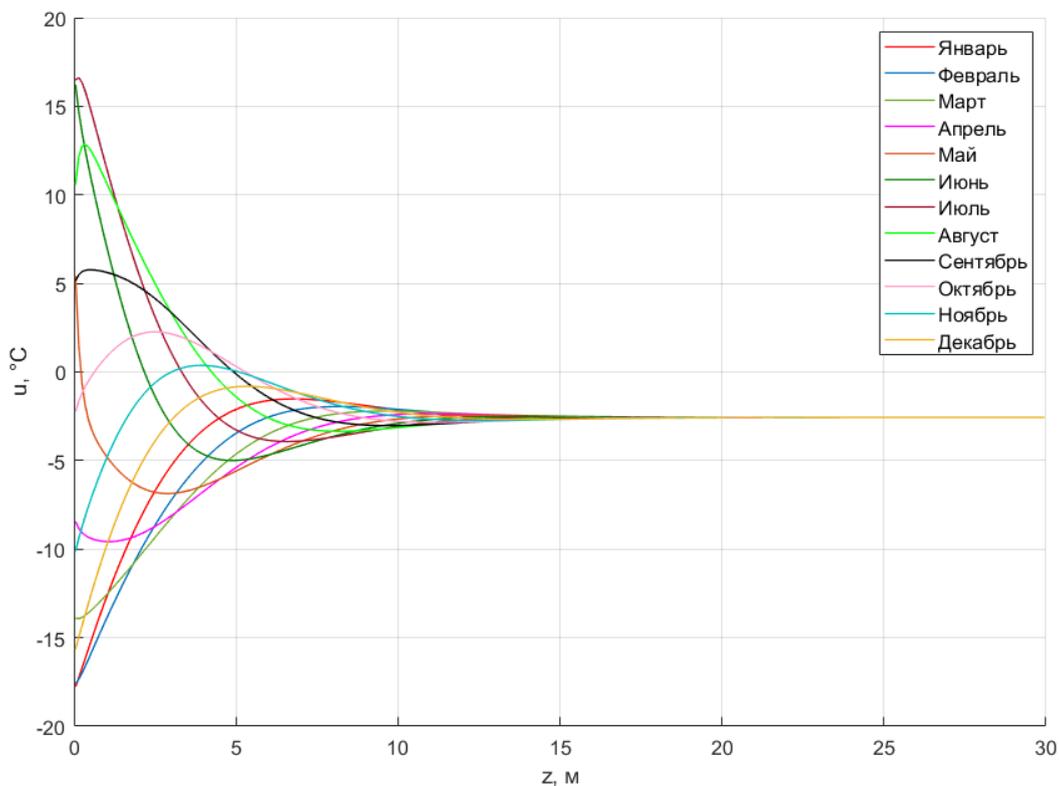


Рис. 3. Нестационарные периодические режимы температуры грунта для каждого месяца.

Из рис. 3 видно, что глубина сезонного оттаивания и промерзания грунта (active-layer) составляет примерно 5 метров, далее начинается вечная мерзлота. При этом максимальная глубина оттаивания достигается в декабре. Для сравнения, в Таблице 1 положительные температуры были зафиксированы не ниже отметки в 3,2 метра. Подобная разница объясняется тем, что температуры грунта вблизи метеостанции измерялись под слоем снега. Глубина нулевых амплитуд (zero annual amplitude) соответствует 17 метрам [14].

При дальнейшем погружении в толщу земли сезонные колебания температуры стабилизируются, температура грунта становится равной минус 2,6°С.

У поверхности земли температура меняется в диапазоне от -18 до 16,5°С, на глубине 5 м в диапазоне от -6 до 0,5°С, на глубине 10 м от -3 до -2°С.

#### V. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ С УЧЕТОМ ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Смоделируем влияние глобального потепления на температурный режим вечномерзлых грунтов. Первая модель RCP2.6 соответствует сценарию, по которому выбросы CO<sub>2</sub> 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 [15].

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) [3,16].

В сценарии RCP2.6 прогнозируется на 2080 год рост средней температуры января на  $3,4^{\circ}\text{C}$ , а июля – на  $1,9^{\circ}\text{C}$ . В более негативном сценарии RCP8.5 зимние температуры повышены на  $9,1^{\circ}\text{C}$ , а летние – на  $5,7^{\circ}\text{C}$ .

Рассмотрим модель сценария RCP2.6 и спрогнозируем изменение распределения температуры в толще грунта.

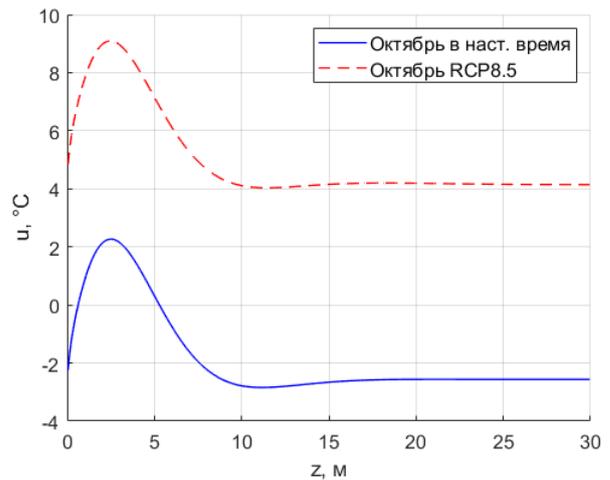
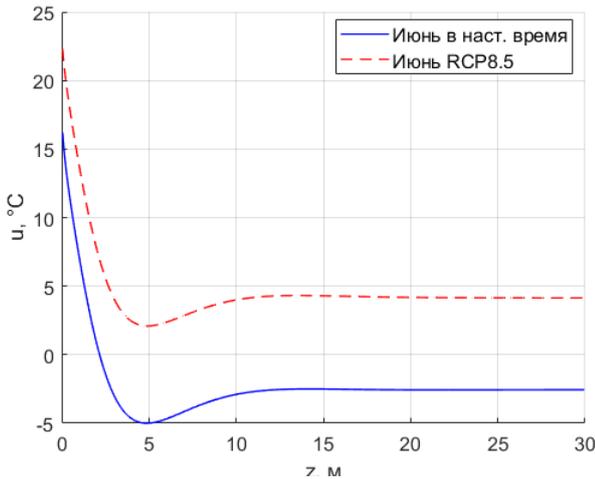


Рис. 4. Прогнозные графики распределения температуры в июне и октябре 2080 года для умеренного сценария RCP2.6.

Наш прогноз демонстрирует (рис. 4) прогрев всех глубин на  $2,5^{\circ}\text{C}$  как в июне, так и в октябре.

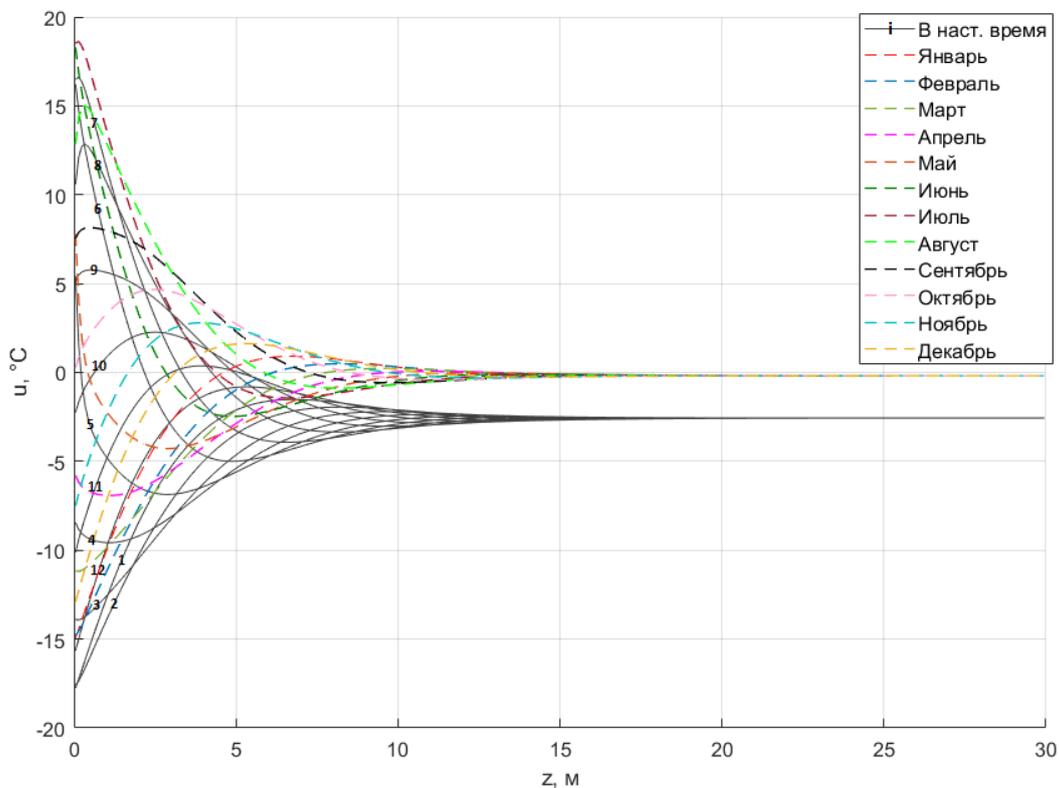


Рис. 5. Графики нестационарных периодических режимов температур грунта в настоящее время(серые) и прогнозные для умеренного сценария RCP2.6 на 2080 год(цветные).

Как мы видим (Рис. 5), нестационарный периодический температурный режим сместился на  $2,5^{\circ}\text{C}$  в сторону тепла, приняв значение  $-0,14^{\circ}\text{C}$ .

Глубина сезонного оттаивания и промерзания увеличилась с 5 до 13 м.

У поверхности земли температура меняется в диапазоне от  $-15$  до  $19^{\circ}\text{C}$  (было от  $-18$  до  $16,5^{\circ}\text{C}$ ), на глубине 5 м в диапазоне от  $-3$  до  $3^{\circ}\text{C}$  (было от  $-6$  до  $0,5^{\circ}\text{C}$ ), на глубине 10 м от  $-0,7$  до  $0,3^{\circ}\text{C}$  (было от  $-3$  до  $-2^{\circ}\text{C}$ ).

Теперь обратимся к модели негативного сценария RCP8.5 и спрогнозируем изменение распределения температуры в толще грунта.

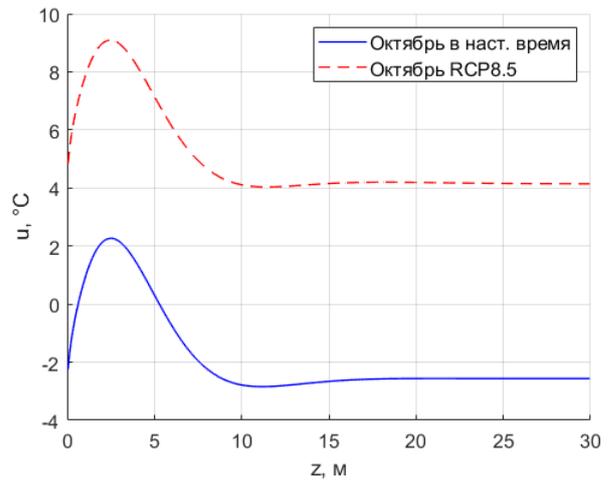
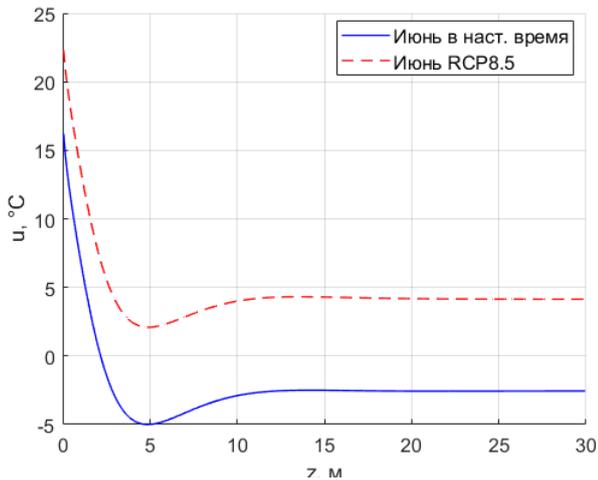


Рис. 6. Прогнозные графики распределения температуры в июне и октябре 2080 года для негативного сценария RCP8.5.

Наш прогноз демонстрирует (Рис. 6) прогрев всех глубин приблизительно на  $7^{\circ}\text{C}$  как в июне, так и в октябре.

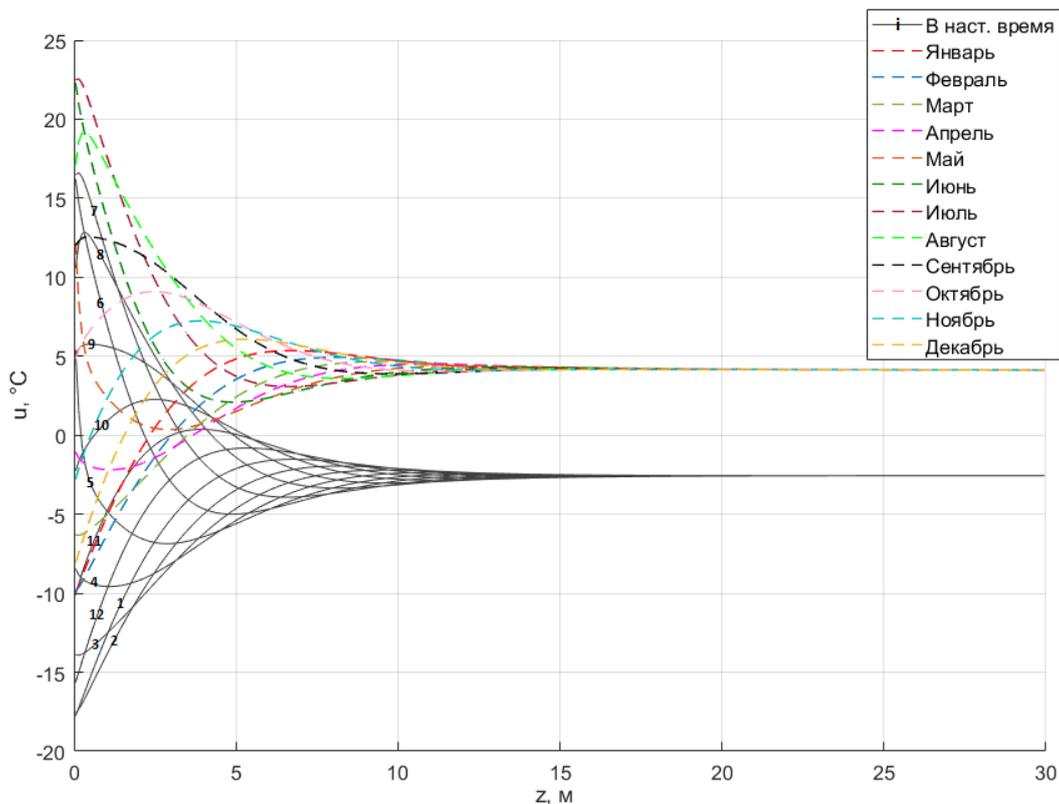


Рис. 7. Графики нестационарных периодических режимов температур грунта на текущий момент(серые) и прогнозные для негативного сценария RCP8.5 на 2080 год(цветные).

Нестационарный периодический температурный режим, изображенный на Рис. 7, сместился на  $7^{\circ}\text{C}$  в сторону потепления, достигнув  $4,5^{\circ}\text{C}$ .

Глубина сезонного оттаивания и промерзания увеличилась с 5 до 30 м и глубже.

У поверхности температура земли меняется в диапазоне от  $-10$  до  $22,5^{\circ}\text{C}$  (было от  $-18$  до  $16,5^{\circ}\text{C}$ ), на глубине 5 м в диапазоне от  $1,5$  до  $7^{\circ}\text{C}$  (было от  $-6$  до  $0,5^{\circ}\text{C}$ ), на глубине 10 м от  $3,8$  до  $4,7^{\circ}\text{C}$  (было от  $-3$  до  $-2^{\circ}\text{C}$ ).

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была построена модель температурного режима грунта г. Якутска в настоящее время. Построены графики температур для каждого месяца и определены глубины сезонного оттаивания (промерзания) и глубины нулевых колебаний. Составлены прогностические модели двух сценариев глобального потепления и проанализированы полученные результаты.

Результаты расчетов демонстрируют значительные изменения в температурном режиме грунта при реализации обоих сценариев и, как следствие, серьезное сокращение площади вечной мерзлоты [16]. Негативный сценарий показал полное исчезновение вечной мерзлоты на глубинах ниже 30 м, что может быть фатальным для большинства сооружений, возведенных на вечномёрзлых грунтах [17-18]. Поскольку большая часть обмена энергией, влагой и газами между атмосферными и наземными системами происходит через активный слой, то его увеличение, скорее всего, окажет важное влияние на геоморфологические, гидрологические и биологические процессы [19]. Из-за оттаивания почв в атмосферу выбрасывается большое количество парниковых газов, ранее запертых в вечной мерзлоте [20-21]. Положительным эффектом будет увеличение экологического потенциала региона в обоих случаях, что повысит потенциал его населенности [3,22].

## 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] 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.
- [3] 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.
- [4] Boike, J., Grau, T., Heim, B., Günther, F., Langer, M., Muster, S., Gouttevin, I. and Lange, S. "Satellite-derived changes in the permafrost landscape of central Yakutia, 2000–2011: Wetting, drying, and fires." *Global and Planetary Change* 139 (2016): 116-127.
- [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] Федотов А.А., Храпов П.В., Тарасюк Ю.В. Моделирование динамики температурного поля грунтов вокруг магистральных газопроводов в криолитозоне. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020. Т. 8. № 2. С. 7-13.
- [7] РСН 67–87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномёрзлых грунтов численными методами. М.: Госстрой РСФСР, 1987. 40 с.
- [8] Метеорологический центр в г. Якутск. Индекс WMO: 24959 // *Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД)*. URL: <http://meteo.ru/>
- [9] Балобаев В. Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. – Наука. Сиб. отд-ние, 1991.
- [10] Заключение экспертизы инженерных изысканий от 15.12.2016 г. URL: <http://novostroyki-ykt.ru/2704-266-kvartirnyy-zhiloy-dom-s-nezhilyimi-pomescheniyami-3-1-v-kvartale-203-gyakutska.html>
- [11] СНиП 2.02.04-88 Строительные нормы и правила. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М.: Государственный строительный комитет СССР, 1990. 55 с.
- [12] 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*. Innova-tive Research, Inc. 1991.).
- [13] Крылов Д.А., Сидняев Н.И., Федотов А.А. Математическое моделирование распределения температурных полей // *Математическое моделирование*. 2013. Т. 25. № 7. С. 3–27.
- [14] Biskaborn B. K. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nature communications*. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 264.
- [15] "Representative Concentration Pathways (RCPs)". IPCC. URL: <https://www.iiasa.ac.at/>
- [16] 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.
- [17] Сидняев Н.И., Мельникова Ю.С., Храпов П.В., Гласко А.В. Влияние температурного режима криолитозоны на надежность оснований. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2012. № 3. С. 81-88.
- [18] Крылов Д.А., Федотов А.А. Температурный режим вечномёрзлого грунта под зданием со свайным фундаментом // *Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Естественные науки»*. 2013. № 3. С. 106–116.
- [19] Stendel M., Christensen J. H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM // *Geophysical Research Letters*. – 2002. – Т. 29. – №. 13. – С. 10-1-10-4.
- [20] Zimov S. A., Schuur E. A. G., Chapin III F. S. Permafrost and the global carbon budget // *Science(Washington)*. – 2006. – Т. 312. – №. 5780. – С. 1612-1613.
- [21] Turetsky M. R. et al. Permafrost collapse is accelerating carbon release. – 2019.
- [22] Tchebakova N. M. et al. Agroclimatic potential across central Siberia in an altered twenty-first century // *Environmental Research Letters*. – 2011. – Т. 6. – №. 4. – С. 045207.

# Forecast of the soil temperature in permafrost in response of climate warming

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 ground temperature in the region of Yakutsk. To determine the parameters of the mathematical model, data from the meteorological station and expertise of geotechnical surveys were used. Simulation of the soil temperature distribution was carried out until the moment of reaching the non-stationary periodic mode. For the numerical solution of the problem, the finite volume method (FVM) was used. The calculations were started on the January 1st of the first year of observation of the soil temperature. In order to analyze the temperature field, graphs of the temperature dependence on the depth were constructed for June and October of the 1st, 10th, 35th, 50th and 100th years. 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 30 m. Then the temperature distribution of each month were simulated and the depth of active-layer was found to be 5 m, as well as the depth of zero annual amplitudes equal to 17 m. Temperature ranges were set: for the surface from -18 to 16.5°C; for 5 m from -6 to 0.5°C and for 10 m from -3 to -2°C. The forecast of the soil temperature distribution for 2080 was modeled according to two scenarios of the Representative Concentration Pathway of global warming: moderate RCP2.6 and negative RCP8.5. The RCP2.6 Scenario showed the preservation of permafrost with an increase of active-layer by more than 2 times, as well as an increase of soil temperature by an average of 2.5°C. The results of calculations for the RCP8.5 scenario indicate the complete disappearance of permafrost at depths of 30 m and beyond, which will lead to soil destabilization in the considered area.

**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.

## REFERENCES

- [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] 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. – S. 203-225.
- [3] 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. – S. 065004.
- [4] Boike, J., Grau, T., Heim, B., Günther, F., Langer, M., Muster, S., Gouttevin, I. and Lange, S. "Satellite-derived changes in the permafrost landscape of central Yakutia, 2000–2011: Wetting, drying, and fires." *Global and Planetary Change* 139 (2016): 116-127.
- [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] Fedotov A.A., Hrapov P.V., Tarasjuk Ju.V. Modelirovanie dinamiki temperaturnogo polja gruntov vokrug magistral'nyh gazoprovodov v kriolitozone. *International Journal of Open Information Technologies*. 2020. T. 8. # 2. S. 7-13.
- [7] RSN 67–87. Inzhenernye izyskaniya dlja stroitel'stva. Sostavlenie prognoza izmenenij temperaturnogo rezhima vechnomerzlyh gruntov chislennymi metodami. M.: Gosstroj RSFSR, 1987. 40 s.
- [8] Meteorologicheskij centr v g. Jakutsk. Indeks WMO: 24959 // *Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut gidrometeorologicheskij informacii (VNIIGMI-MCD)*. URL: <http://meteo.ru/>
- [9] Balobaev V. T. Geotermija merzloj zony litosfery severa Azii. – Nauka. Sib. otd-nie, 1991.
- [10] Zakljuchenie jekspertizy inzhenernyh izyskanij ot 15.12.2016 g. URL: <http://novostroyki-ykt.ru/2704-266-kvartirnyy-zhiloy-dom-s-nezhilymi-pomescheniyami-3-1-v-kvartale-203-gyakutska.html>
- [11] SNiP 2.02.04-88 Stroitel'nye normy i pravila. Osnovaniya i fundamenty na vechnomerzlyh gruntah. M.: Gosudarstvennyj stroitel'nyj komitet SSSR, 1990. 55 c.
- [12] Patankar S.V. Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalah. M.: Izdatel'stvo MJeI. 2003. 312 s. (Perevod s anglijskogo. Patankar S.V. Computation of conduction and duct flow heat transfer. Inno-tive Research, Inc. 1991.).
- [13] Krylov D.A., Sidnjaev N.I., Fedotov A.A. Matematicheskoe modelirovanie raspredelenija temperaturnyh polej // *Matematicheskoe modelirovanie*. 2013. T. 25. # 7. S. 3–27.
- [14] Biskaborn B. K. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nature communications*. – 2019. – T. 10. – #. 1. – S. 264.
- [15] "Representative Concentration Pathways (RCPs)". IPCC. URL: <https://www.iiasa.ac.at/>
- [16] 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. – S. 1877-1900.

- [17] Sidnjaev N.I., Mel'nikova Ju.S., Hrapov P.V., Glasko A.V. Vlijanie temperaturnogo rezhima kriolitozony na nadezhnost' osnovanij. Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin. 2012. # 3. S. 81-88.
- [18] Krylov D.A., Fedotov A.A. Temperaturnyj rezhim vechnomerzlogo grunta pod zdaniem so svajnym fundamentom // Vestnik MGTU im. N.Je.Baumana. Ser. «Estestvennye nauki». 2013. # 3. S. 106–116.
- [19] Stendel M., Christensen J. H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM //Geophysical Research Letters. – 2002. – T. 29. – #. 13. – S. 10-1-10-4.
- [20] Zimov S. A., Schuur E. A. G., Chapin III F. S. Permafrost and the global carbon budget //Science(Washington). – 2006. – T. 312. – #. 5780. – S. 1612-1613.
- [21] Turetsky M. R. et al. Permafrost collapse is accelerating carbon release. – 2019.
- [22] Tchebakova N. M. et al. Agroclimatic potential across central Siberia in an altered twenty-first century //Environmental Research Letters. – 2011. – T. 6. – #. 4. – S. 045207.