

Клавдия Анатольевна СПАСЕННИКОВА¹
Геннадий Владимирович АНИКИН²

УДК: 624.139

СТОХАСТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ГРУНТА С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕНА *

¹ кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
Институт криосферы Земли, Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН
kspasennikova@gmail.com

² кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник,
Институт криосферы Земли, Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН
anikin@ikz.ru

Аннотация

В настоящее время активное освоение природных и энергетических ресурсов Арктической зоны тесно связано со строительством дорог на грунтовых основаниях криолитозоны и сопровождается активным изменением естественного теплового режима многолетнемерзлых пород.

Для предотвращения деформации дорог авторами разработана методика расчета теплофизических свойств грунтов, которая может быть использована при проектировании.

Ранее авторами была решена задача Стефана с учетом случайных изменений граничных условий на верхней границе расчетной области.

В данной работе методом стохастического прогнозирования проводится моделирование состояния грунта под насыпью автодорожного полотна, учитывающее дополнительно стохастичность таких параметров задачи, как солнечная радиация, инфракрасное излучение Земной поверхности и атмосферы.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00068 мол_а.

Цитирование: Спасенникова К. А. Стохастическое прогнозирование состояния грунта с учетом радиационного теплообмена / К. А. Спасенникова, Г. В. Аникин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 1. С. 27-40.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-27-40

Рассматриваются 48 случайных траекторий таких величин, как скорость ветра, температура атмосферы, высота снежного покрова, полученных путем усреднения архивных данных метеостанции «Игарка». Солнечная радиация и инфракрасное излучение Земной поверхности и атмосферы были получены путем усреднения данных NASA. Для каждой случайной траектории были вычислены температурные поля в расчетной области под дорогой и определена вероятность нахождения грунта в талом состоянии.

Ключевые слова

Температурное поле, стохастическое прогнозирование, грунт, метод Монте-Карло, инфракрасное излучение, солнечная радиация.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-27-40

Введение

Цель работы — провести стохастическое прогнозирование состояния грунта с учетом радиационного теплообмена.

На сегодняшний день задача прогнозирования состояния грунтов под автомобильным полотном в Арктике, несомненно, является актуальной и своевременной. Ранее авторами были рассмотрены такие объекты, как резервуары с нефтью, здания. Разработанный в процессе исследования данных объектов метод с учетом случайности радиационных величин в данной работе применен для анализа состояния грунтов под дорожным полотном. При этом в процессе расчетов применены как теплофизические методы, так и метод Монте-Карло.

Основная часть

Рассматривается дорожное полотно, представленное на рис. 1.

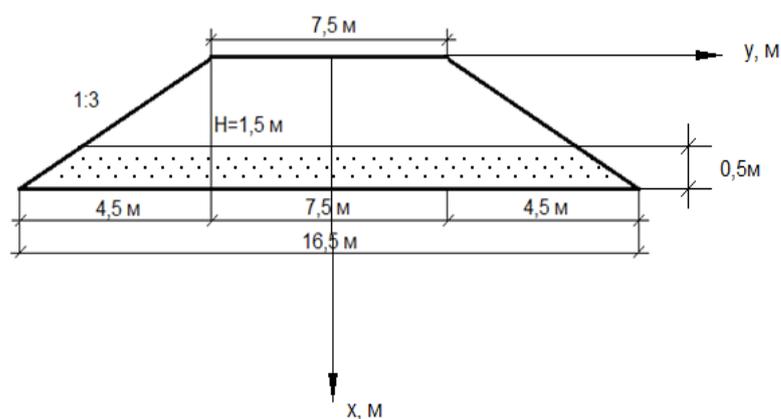


Рис. 1. Разрез полотна дороги

Fig. 1. Section of the road

Методика расчета и граничные условия, приведенные в данной статье, ранее предлагались в работах [1-9, 11].

На верхней границе расчетной области имеем:

$$q_r + q_c = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (1.1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности грунта; x — глубина.

Тепловой обмен между грунтом и атмосферой зависит от радиационного воздействия и конвективного теплообмена.

Тепловой поток, обусловленный радиацией равен:

$$q_r = R(1 - A) - \epsilon \sigma T_s^4 + P,$$

где R — суммарная прямая и рассеянная солнечная радиация; A — альбедо; σ — постоянная Стефана — Больцмана; T_s — температура поверхности Земли (K); P — мощность инфракрасного излучения, падающего на поверхность; $\epsilon \approx 1$ — коэффициент серости поверхности [10].

Выражение для конвективного теплового потока [13] при учете, что скорость ветра измеряется на высоте 10 м, имеет вид:

$$q_c = \frac{\rho c_p (\alpha_0 \kappa)^2 v(10) (t(z) - t(0))}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}, \quad (1.2)$$

где ρ — плотность воздуха; c_p — удельная теплоемкость воздуха; $\alpha_0 = 1,25$; $\kappa = 0,4$; $v(z)$ — скорость ветра на высоте z от поверхности; $t(z)$ — температура воздуха на высоте z ; $t(0)$ — температура воздуха вблизи поверхности снега или грунта; z — высота, на которой измеряется температура воздуха; z_0 — параметр, учитывающий шероховатость поверхности. Для снега [10] $z_0 = 0,001$ м, $A = 0,75$; для грунта $z_0 = 0,02$ м, $A = 0,25$.

Выражение (1.1) записывается в виде:

$$q_s = q_r + q_c = \alpha_s (t_a - t_s) + R(1 - A) - \epsilon \sigma T_s^4 + P, \quad (1.3)$$

где q_s — суммарный тепловой поток на верхней границе расчетной области; t_a — температура воздуха ($t_a = t(z)$ в выражении (1.2)); t_s — температура поверхности в градусах Цельсия ($t_s = T_s - 273,15$); α_s — коэффициент теплоотдачи поверхности, который в соответствии с выражением (1.2) задается следующим выражением:

$$\alpha_s = \frac{\rho c_p (\alpha_0 \kappa)^2 v(10)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}. \quad (1.4)$$

С другой стороны, имеем следующее выражение:

$$q_s = \lambda_i \frac{t_s - t_1}{L_i}, \quad (1.5)$$

где λ_i — коэффициент теплопроводности снега; L_i — толщина снежного покрова; t_1 — температура поверхности грунта (когда снега нет $t_1 = t_s$). Имеем также следующее соотношение:

$$\sigma T_S^4 = \sigma(T_0 + t_S)^4 = \sigma T_0^4 + 4\sigma T_0^3(t_S - t_a) + 4\sigma T_0^3 t_a, \quad (1.6)$$

где $T_0 = 273,15$ °С, в выражении (1.6) произведено разложение в ряд Тейлора вблизи T_0 . Подставляя (1.5) и (1.6) в (1.3), получаем:

$$q_S = (\alpha_S + 4\epsilon\sigma T_0^3) \left(t_a - t_1 - q_S \frac{L_i}{\lambda_i} \right) + \\ + R(1 - A) + P - \epsilon\sigma T_0^4 - \epsilon 4\sigma T_0^3 t_a, \quad (1.7)$$

откуда получаем окончательное выражение для q_S :

$$q_S = \frac{(\alpha_S + 4\epsilon\sigma T_0^3)(t_a - t_1)}{1 + (\alpha_S + 4\epsilon\sigma T_0^3) \frac{L_i}{\lambda_i}} + \frac{R(1 - A) + P - \epsilon\sigma T_0^4 - \epsilon 4\sigma T_0^3 t_a}{1 + (\alpha_S + 4\epsilon\sigma T_0^3) \frac{L_i}{\lambda_i}}. \quad (1.8)$$

Граничное условие третьего рода на верхней поверхности расчетной области записывается следующим образом:

$$\lambda \frac{t(i_0(j, k), j, k, n) - t(i_0(j, k) + 1, j, k, n)}{h_x} = \\ = k_x(t_x - t(i_0(j, k), j, k, n)) + b_x. \quad (1.9)$$

Из (1.9) получаем граничное условие на верхней границе:

$$t(i_0(j, k), j, k, n) = \frac{\frac{\lambda t(i_0(j, k) + 1, j, k, n)}{h_x} + k_x t_x + b_x}{k_x + \frac{\lambda}{h_x}}. \quad (1.10)$$

Сравнивая (1.9) с (1.8) получаем за пределами дороги:

$$t_x = t_a; \\ k_x = \frac{(\alpha_S + 4\epsilon\sigma T_0^3)(t_a - t_1)}{1 + (\alpha_S + 4\epsilon\sigma T_0^3) \frac{h_i}{\lambda_i}}; \\ b_x = \frac{R(1 - A) + P - \epsilon\sigma T_0^4 - \epsilon 4\sigma T_0^3 t_a}{1 + (\alpha_S + 4\epsilon\sigma T_0^3) \frac{h_i}{\lambda_i}}.$$

В нашем случае дорога не заснежена, поэтому на поверхности дороги параметры t_x , k_x , b_x определяются так же, но при $h_i = 0$. Здесь h_i и λ_i — толщина снега и коэффициент теплопроводности снега с номером i .

По метеорологическим данным метеостанции «Игарка» было рассчитано распределение вероятностей по скорости ветра, температуре, толщине снежного покрова для каждого из двенадцати месяцев года [2]. По данным NASA [12] были рассчитаны распределения вероятностей солнечной радиации и инфракрасного излучения Земной поверхности и атмосферы.

Таблица 1

Параметры распределений
для каждого месяца

Table 1

Distribution parameters for each
month

Параметр Месяц	\bar{t} , °C	σ_t , °C	α_v	λ_v	\bar{h} , м	σ_h , м	α_r	λ_r	\bar{P} , Вт/м ²	σ_P , Вт/м ²
Янв.	-26,20	10,80	1,61	0,54	0,70	0,21	0,70	0,45	192,98	20,67
Фев.	-27,00	9,88	1,54	0,60	0,79	0,19	2,49	0,13	199,15	19,46
Март	-17,30	10,20	1,91	0,64	0,86	0,19	4,71	0,07	214,05	21,36
Апр.	-8,12	9,24	2,40	0,75	0,79	0,20	7,63	0,06	225,32	25,42
Май	-0,66	6,34	3,66	1,06	0,48	0,22	12,74	0,06	257,67	24,74
Июнь	11,20	5,99	4,54	1,39	0	0	9,87	0,04	308,06	30,01
Июль	15,80	5,18	2,15	0,91	0	0	8,92	0,04	334,55	26,18
Авг.	11,30	4,41	2,68	0,94	0	0	6,67	0,04	324,95	24,67
Сен.	6,60	4,86	2,77	0,88	0	0	7,10	0,08	280,92	27,09
Окт.	-4,20	7,29	2,84	0,87	0,12	0,10	3,76	0,11	243,20	25,14
Нояб.	-19,10	11,13	1,58	0,59	0,35	0,13	1,44	0,28	211,45	22,88
Дек.	-24,40	11,40	2,18	0,70	0,53	0,17	0	0	199,17	23,17

Стоит отметить, что температура воздуха, толщина снежного покрова и инфракрасное излучение поверхности достоверно описываются нормальным распределением, а скорость ветра и радиация — гамма-распределением. Оптимальные параметры распределений для приведенных выше величин по месяцам, при которых теоретические распределения достаточно точно описывают архивные данные, приведены в таблице 1 (где \bar{t} , σ_t — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение температуры; α_v , λ_v — параметры гамма-распределения скорости ветра; \bar{h} , σ_h — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение толщины снежного покрова; α_r , λ_r — параметры гамма-распределения

радиации; \bar{P} , σ_p — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение инфракрасного излучения). Формулы расчета для параметров приведены в [2].

Распределения вероятностей по скорости ветра, температуре, толщине снежного покрова для каждого из двенадцати месяцев года подробно описаны в работе [6]. Аналогично рассчитывались распределения солнечной радиации и инфракрасного излучения Земной поверхности и атмосферы.

С помощью генератора псевдослучайных чисел генерируем 48 случайных траекторий продолжительностью 13 месяцев каждая, включая изменения солнечной радиации, инфракрасного излучения, скорости ветра, температуры воздуха, толщины снежного покрова.

Выделим линию, проходящую через центр дороги и перпендикулярную ей, и обозначим ее как линию № 1. Вычислим температуры на данной линии в точках, задающихся координатами: $x = x_j$ ($0 \leq j \leq 11$) м, $y = 50$ м, $z = 50$ м.

Выделим линию, параллельную поверхности, но перпендикулярную насыпи дороги, и обозначим ее как линию № 2. Вычислим температуры на данной линии в точках, задающихся координатами: $x = 2$ м, $y = y_i$ ($0 \leq i \leq 23$) м, $z = 50$ м (см. рис. 1).

Значения x_j приведены в таблице 2, а величины y_i — в таблице 3.

Таблица 2

Table 2

Значения узловых точек x_j (м)The values of the node points x_j (m)

j	0	1	2	3	4	5
x_j	0,7	1,2	1,7	2,2	2,7	3,2
j	6	7	8	9	10	11
x_j	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2

Таблица 3

Table 3

Значения узловых точек y_i (м)The values of the node points y_i (m)

i	0	1	2	3	4	5
y_i	17	20	23	26	29	32
i	6	7	8	9	10	11
y_i	35	38	41	44	47	50
i	12	13	14	15	16	17
y_i	53	56	59	62	65	68
i	18	19	20	21	22	23
y_i	71	74	77	80	83	86

Рассчитаем вероятность нахождения грунта в талом состоянии на линиях № 1 и № 2. На линии № 1 формула для нахождения вероятности задается следующим выражением [3]:

$$Wc_j = 100\% \cdot \int_{T_{bf}}^{+\infty} \frac{\exp\left(-\frac{(t - \bar{t}c_j)^2}{2\bar{\sigma}c_j^2}\right)}{\bar{\sigma}c_j\sqrt{2\pi}} dt, \quad (2.1)$$

где t — значения температур (в интервале от T_{bf} до $+\infty$ °C), вероятность нахождения которой находим в узле j ; $\bar{t}c_j$, $\bar{\sigma}c_j$ — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение температуры грунта в узле j .

$$\bar{t}c_j = \sum_{k=1}^{48} \frac{tc_{k,j}}{48}, \quad \bar{\sigma}c_j = \sqrt{\sum_{k=1}^{48} \frac{(tc_{k,j} - \bar{t}c_j)^2}{48}},$$

где $tc_{k,j}$ — значение температуры в точке с номером j на линии № 1 для варианта развития событий с номером k .

Формула для нахождения вероятности обнаружить температуру больше T_{bf} на линии № 2 идентична, за исключением буквенных обозначений [3]:

$$Wm_i = 100\% \cdot \int_{T_{bf}}^{+\infty} \frac{\exp\left(-\frac{(t - \bar{t}m_i)^2}{2\bar{\sigma}m_i^2}\right)}{\bar{\sigma}m_i\sqrt{2\pi}} dt, \quad (2.2)$$

$$\bar{t}m_i = \sum_{k=1}^{48} \frac{tm_{k,i}}{48}, \quad \bar{\sigma}m_i = \sqrt{\sum_{k=1}^{48} \frac{(tm_{k,i} - \bar{t}m_i)^2}{48}},$$

где $tm_{k,i}$ — значение температуры в точке с номером i на линии № 2 для варианта развития событий с номером k ; t — значения температур (в интервале от T_{bf} до $+\infty$ °C), вероятность нахождения которой находим в узле i ; $\bar{t}m_i$, $\bar{\sigma}m_i$ — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение температуры грунта в узле i .

Проведя вычисления по формулам (2.1) и (2.2), получаем таблицу 4 для Wc_j и таблицу 5 для Wm_i .

Таблица 4

Вероятность нахождения грунта в талом состоянии на конец сентября расчетного года, на линии № 1 (%)

Table 4

The probability values to find the ground in the thawed state at the end of September of the accounting year, on line no 1 (%)

j	0	1	2	3	4	5
Wc_j (%)	97,08	95,34	82,30	38,06	5,48	0,16
j	6	7	8	9	10	11
Wc_j (%)	0	0	0	0	0	0

Таблица 5

Вероятность нахождения грунта
в талом состоянии на конец
сентября расчетного года,
на линии № 2 (%)

<i>i</i>	0	1	2	3	4	5
Wm_i (%)	95,99	95,99	95,99	95,99	95,99	95,99
<i>i</i>	6	7	8	9	10	11
Wm_i (%)	95,99	95,97	95,60	87,45	19,19	5,94
<i>i</i>	12	13	14	15	16	17
Wm_i (%)	5,48	5,99	19,29	87,62	95,66	95,99
<i>i</i>	18	19	20	21	22	23
Wm_i (%)	96,00	95,99	95,99	95,99	95,99	95,99

Table 5

The probability values to find
the ground in the thawed state
at the end of September
of the accounting year, on line no 2 (%)

Из таблиц видно, что вероятность найти грунт в талом состоянии составляет порядка 5%.

Далее приводится график сравнения температур для трех вариантов: 1) с минимальными температурами, 2) усредненный по всем вариантам, 3) с максимальными температурами.

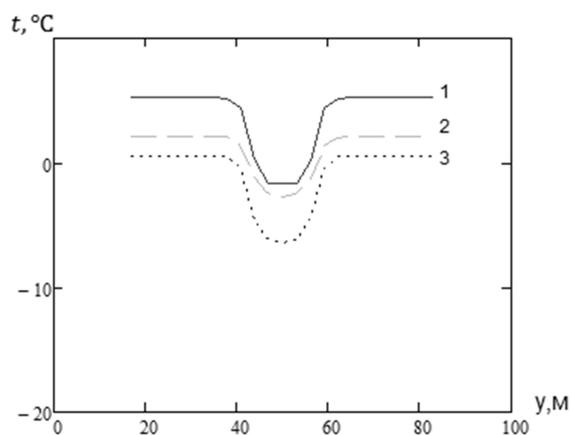


Рис. 2. Сравнение температур под автодорожным полотном:
1 — для варианта с максимальными температурами,
2 — усредненный по всем вариантам,
3 — для варианта с минимальными температурами

Fig. 2. Comparison of temperatures under the roadway:
1 — for the warmest variant,
2 — averaged over all options,
3 — for the coldest variant

Температурное поле для варианта с минимальными температурами и для варианта с максимальными температурами вырезанной части расчетной области шириной 20 м для наглядности приведены на рис. 3.

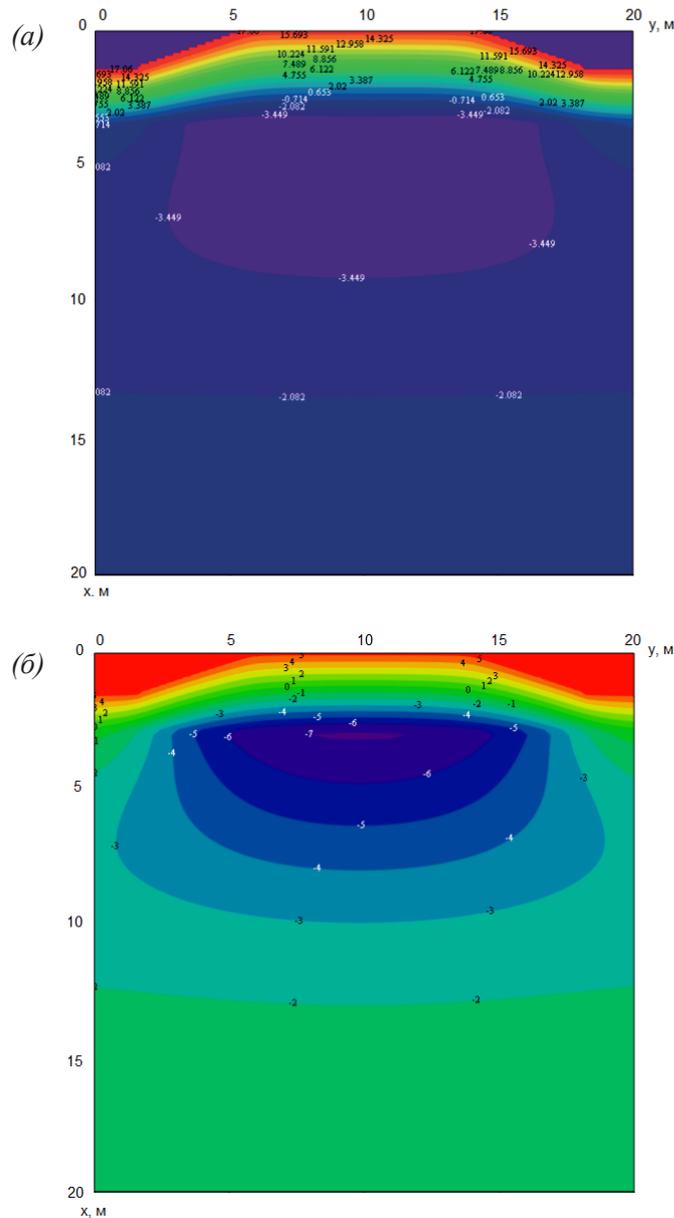


Рис. 3. Температурные поля:
 а — для варианта с максимальными температурами (9); б — для варианта с минимальными температурами (7)

Fig. 3. Temperature fields:
 а — for the warmest variant (9); б — for the coldest version (7)

Заключение

Авторами впервые проведено математическое моделирование теплообмена под дорожным полотном, построенным на вечной мерзлоте, учитывающее дополнительно стохастичность таких параметров задачи, как солнечная радиация и инфракрасное излучение Земной поверхности и атмосферы.

Получено 48 трехмерных температурных полей и вычислена вероятность нахождения грунта в талом или мерзлом состоянии на линии, перпендикулярной поверхности дороги, и линии, параллельной поверхности дороги и направленной поперек проезжей части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникин Г. В. Компьютерное моделирование системы охлаждения грунта под резервуаром с нефтью / Г. В. Аникин, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2012. Том 16. № 2. С. 60-64.
2. Аникин Г. В. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов / Г. В. Аникин, С. Н. Плотников, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2011. Том 15. № 1. С. 33-39.
3. Аникин Г. В. Метод стохастического прогнозирования нахождения температуры грунтов с помощью систем «ГЕТ» / Г. В. Аникин, К. А. Спасенникова, С. Н. Плотников, А. А. Ишков // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 1. С. 35-40. DOI: 10.1007/s11204-017-9435-7
4. Аникин Г. В. Стохастическое прогнозирование состояния грунтов под объектами, построенными на вечной мерзлоте / Г. В. Аникин, С. Н. Плотников, А. А. Вакулин, К. А. Спасенникова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетик. 2013. № 7. С. 46-53.
5. Аникин Г. В. Усовершенствование метода стохастического прогнозирования работы горизонтальной естественно-действующей трубчатой системы / Г. В. Аникин, К. А. Спасенникова, А. А. Ишков, С. Н. Плотников // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 6. С. 30-34.
6. Долгих Г. М. Сравнение экспериментальных данных и численного моделирования работы охлаждающей системы «ГЕТ» на примере пожарного депо Ванкорского месторождения / Г. М. Долгих, С. Н. Окунев, Г. В. Аникин, К. А. Спасенникова, К. В. Залесский // Криосфера Земли. 2014. Том 18. № 1. С. 65-69.
7. Долгих Г. М. Статистическое моделирование работы системы «ГЕТ», установленной в основании нефтяного резервуара / Г. М. Долгих, Г. В. Аникин, И. П. Рило, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2015. Том 19. № 1. С. 70-77.
8. Долгих Г. М. Численный расчет нестационарных температурных полей в системе «резервуар с нефтью — сезонное охлаждающее устройство» / Г. М. Долгих, С. Н. Окунев, Г. В. Аникин, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2013. Том 17. № 3. С. 70-75.
9. Мельников В. П. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений / В. П. Мельников,

- А. А. Мельникова, Г. В. Аникин, К. С. Иванов, К. А. Спасенникова // Криосфера Земли. 2014. Том 18. № 3. С. 82-90.
10. Павлов А. В. Энергообмен в ландшафтной сфере Земли / А. В. Павлов. Новосибирск: Наука. 1984. 256 с.
 11. Спасенникова К. А. Компьютерное моделирование тепломассопереноса в грунтах под сооружениями, построенными на вечной мерзлоте с использованием сезонных охлаждающих устройств: автореф. дисс. ... к. т. н. / К. А. Спасенникова. Тюмень, 2015, 19 с.
 12. Atmospheric Science Data Center: Processing, archiving and distributing Earth science data at the NASA Langley Research Center. URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov> (дата обращения: 29.05.2018).
 13. Foken T. Micrometeorology / T. Foken. Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. 308 p.

Klavdiia A. SPASENNIKOVA¹

Gennady V. ANIKIN²

UDC 624.139

STOCHASTIC FORECASTING OF SOIL CONDITION TAKING INTO ACCOUNT RADIATIVE HEAT TRANSFER*

¹ Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher, Institute of Earth Cryosphere,
Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
kspasennikova@gmail.com

² Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Institute of Earth Cryosphere,
Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
anikin@ikz.ru

Abstract

The current active development of natural and energy resources of the Arctic zone is closely connected with the construction of roads on soil grounds of the permafrost zone. It is accompanied by an active change in the natural thermal regime of permafrost.

To prevent road deformation, the authors have developed a calculation method that allows predicting temperature changes in soils with sufficient accuracy when designing objects located in permafrost conditions.

Previously, the authors solved Stefan's problem taking into account random changes in meteorological characteristics, such as wind speed, atmosphere temperature, and snow cover height.

In this paper, stochastic forecasting is used to simulate the ground state under the embankment of a roadway, taking into account the stochasticity of such parameters of the problem as solar and infrared radiation of the Earth's surface and the atmosphere.

The authors consider 48 variants of the development of events throughout the year, each of which is generated using the Monte Carlo method based on the distribution of meteorological

* The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No 18-38-00068 мол_а)

Citation: Spasennikova K. A., Anikin G. V. 2019. "Stochastic forecasting of soil condition taking into account radiative heat transfer". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 1, pp. 27-40.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-27-40

characteristics: wind speed, atmospheric temperature, and snow cover height, obtained by averaging the archival data of the Igarka meteorological station. Solar radiation and infrared radiation of the Earth's surface and atmosphere were obtained by averaging the NASA data. For each version of the situation in the future, the temperature fields in the calculated area under the road were calculated. The probability of finding ground in the thawed state at arbitrary points of the calculated region is calculated.

Keywords

Temperature field, stochastic prediction, soil, Monte Carlo method, infrared radiation, solar radiation.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-27-40

REFERENCES

1. Anikin G. V., Spasennikova K. A. 2012. "Computer modeling of the soil cooling system under a tank with oil". *Kriosfera Zemli*, vol. 16, no 2, pp. 60-64. [In Russian]
2. Anikin G. V., Plotnikov S. N., Spasennikova K. A. 2011. "Computer simulation of heat and mass transfer in systems of horizontal cooling of soils". *Kriosfera Zemli*, vol. 15, no 1, pp. 33-39. [In Russian]
3. Anikin G. V., Spasennikova K. A., Plotnikov S. N., Ishkov A. A. 2017. "The method of stochastic prediction of the temperature of soils using the 'GET' systems". *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, no 1, pp. 35-40. DOI: 10.1007/s11204-017-9435-7 [In Russian]
4. Anikin G. V., Plotnikov S. N., Vakulin A. A., Spasennikova K. A. 2013. "Stochastic forecasting of the state of soils under objects built on permafrost". *Tyumen State University Herald*, no 7, pp. 46-53. [In Russian]
5. Anikin G. V., Spasennikova K. A., Ishkov A. A., Plotnikov S. N. 2017. "Improvement of the method of stochastic prediction of horizontal natural-acting tubular system operation". *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, no 6, pp. 30-34. [In Russian]
6. Dolgikh G. M., Okunev S. N., Anikin G. V., Spasennikova K. A., Zalessky K. V. 2014. "Comparison of experimental data and numerical simulation of the cooling system 'GET' on the example of the fire station depot of the Vankor field". *Kriosfera Zemli*, vol. 18, no 1, pp. 65-69. [In Russian]
7. Dolgikh G. M., Anikin G. V., Rilo I. P., Spasennikova K. A. 2015. "Statistical modeling of the 'GET' system installed at the base of the oil reservoir". *Kriosfera Zemli*, vol. 19, no 1, pp. 70-77. [In Russian]
8. Dolgikh G. M., Okunev S. N., Anikin G. V., Spasennikova K. A. 2013. "Numerical calculation of non-stationary temperature fields in the system 'reservoir with oil-seasonal cooling device'". *Kriosfera Zemli*, vol. 17, no 3, pp. 70-75. [In Russian]
9. Melnikov V. P., Melnikova A. A., Anikin G. V., Ivanov K. S., Spasennikova K. A. 2014. "Engineering solutions in construction on permafrost in terms of improving the energy efficiency of buildings". *Kriosfera Zemli*, vol. 18, no 3, pp. 82-90. [In Russian]

10. Pavlov A. V. 1984. Energy Exchange in the Landscape Sphere of the Earth. Novosibirsk: Nauka. [In Russian]
11. Spasennikova K. A. 2015. “Computer simulation of heat and mass transfer in soils under the structures built on permafrost using seasonal cooling devices”. Cand. Sci. (Tech.) diss. abstract. Tyumen. [In Russian]
12. Atmospheric Science Data Center: NASA Langley Research Center. Accessed 29 May 2018. <https://eosweb.larc.nasa.gov>
13. Foken T. 2008. Micrometeorology. Berlin; Heidelberg: Springer.