

## ИНЖЕНЕРНАЯ КРИОЛОГИЯ

УДК 551.34 (092)  
DOI: 10.15372/KZ20250106  
EDN: YHQQWW

## ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В РАСПОЛОЖЕННОЙ РЯДОМ С ФУНДАМЕНТОМ СКВАЖИНЕ

Л.Н. Хрусталеv\*, Л.В. Емельянова

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

\*Автор для контакта; e-mail: lev\_kh@rambler.ru

Показаны возможности использования результатов наблюдений за температурой многолетнемерзлых грунтов для осуществления краткосрочного прогноза их температурного режима методом экстраполяции и оценки на основе этого прогноза устойчивости свайного фундамента. Наблюдение за температурой грунтов проводилось на всю глубину погружения свайного фундамента, включая один датчик температуры, расположенный под нижним концом сваи. Обработка результатов наблюдений осуществлена по предлагаемой методике с помощью трех компьютерных программ, ссылки на которые в интернете даны в настоящей статье.

**Ключевые слова:** температурные наблюдения, многолетнемерзлый грунт, прогноз, устойчивость, методика обработки.

**Ссылка для цитирования:** Хрусталеv Л.Н., Емельянова Л.В. Прогноз устойчивости свайного фундамента по результатам температурных наблюдений в расположенной рядом с фундаментом скважине // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 1, с. 66–73. DOI: 10.15372/KZ20250106. EDN: YHQQWW.

## FORECAST OF PILE FOUNDATION STABILITY BASED ON THE RESULTS OF TEMPERATURE OBSERVATIONS IN A NEARBY BOREHOLE

L.N. Khrustalev\*, L.V. Emelyanova

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology,  
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

\*Corresponding author; e-mail: lev\_kh@rambler.ru

The possibilities of using the results of permafrost temperature measurements for a short-term forecast of permafrost temperature regime by the extrapolation method and assessment of the stability of the pile foundation on the basis of this forecast are considered. The soil temperature has been monitored over the entire depth of the pile foundation, including one temperature sensor located under the lower end of the pile. The processing of the results of temperature measurements has been carried out according to the outlined methodology using three computer programs, links to which on the Internet are given in this article.

**Keywords:** temperatures observations, permafrost soil, forecast, stability, processing technique.

## ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость фундаментов на многолетнемерзлых грунтах (ММГ), как известно, оценивается на стадии проектирования на основе прогноза температуры ММГ, осуществляемого с помощью аналитического или численного решения задачи теплопроводности с фазовыми превращениями воды в грунте (задача Стефана). Точность решения такой задачи зависит от точности задания граничных условий, которые включают тепловое воздействие окружающей среды и сооружений на

грунтовое основание фундаментов. Однако многие реальные факторы в аналитических и численных решениях не учитываются, например, термические сопротивления снежного и растительного покровов, тепловое влияние грунтовых вод. Это приводит к ошибкам при проектировании, которые можно выявить с помощью геотехнического мониторинга. Одной из главных задач геотехнического мониторинга является контроль за динамикой во времени температурных полей ММГ в ос-

новании сооружений. Чтобы предотвратить аварии, необходимо знать прогнозные значения температуры ММГ, которые можно получить экстраполяцией прошлого и настоящего температурного режима ММГ на его будущее. По мнению авторов, это более оперативный путь, чем калибровка математических моделей для их использования при прогнозировании. Как известно, задача Стефана не имеет обратного решения (по результатам ее решения нельзя получить начальные и граничные условия). Поэтому для калибровки используется прямое решение, в котором интуитивно подбирают начальные и граничные условия с целью получить адекватный результат.

Как следствие, первой задачей статьи была разработка достаточно точного метода экстраполяции температурных полей ММГ во времени, т. е. нахождение адекватной экстраполяционной функции и оптимального периода упреждения (прогноза).

Вторая задача состояла в математической обработке полученного прогнозного температурного поля ММГ с целью определения расчетных параметров для оценки устойчивости свайного фундамента. Она включает вычисление средней температуры ММГ вблизи боковой поверхности сваи и под ее нижнем концом, а также мощности талого слоя грунта над ММГ и слоя сезонного промерзания.

Наконец, третьей задачей являлся расчет устойчивости свайного фундамента под действием полезной нагрузки, а также сил пучения. При этом рассчитывались коэффициенты запаса на воздействие полезной нагрузки – отношение несущей способности сваи к полезной нагрузке, и на действие сил пучения – отношение сил, удерживающих сваю от выпучивания, к силам пучения.

#### Экстраполяция во времени данных температурных наблюдений

Прогнозные расчеты температурных полей ММГ по фактической температуре грунта составляют задачу экстраполяции во времени на дискретном множестве моментов замеров. При этом возникает обратная задача Стефана, которая, как отмечалось выше, в математическом отношении некорректна и не имеет однозначного решения. Выходом из этой ситуации является компромиссный подход, при котором физическая сущность задачи служит основанием для отыскания класса опорных функций, позволяющих найти наилучшую экстраполяционную функцию путем сравнительно простых вычислений. Для его реализации авторы использовали приближенный метод вычисления температурных полей в основаниях сооружений, названный методом эквивалентной температуры [Хрусталева, 1971]. Идея его состоит в сведении трехмерной задачи Стефана к совокуп-

ности одномерных задач. Опуская подробности, которые можно найти в цитируемой монографии, запишем зависимость температуры ( $T$ ) от времени ( $\tau$ ):

$$T = cE(\tau) + d; \quad (1)$$

$$E(\tau) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{a\tau}}\right), \quad (2)$$

где  $c, d$  – неизвестные параметры, связанные со значениями эквивалентной и начальной температуры, °С;  $y$  – глубина расположения расчетной точки, м;  $a$  – коэффициент теплопроводности грунта, м<sup>2</sup>/°С;  $\operatorname{erf}(u)$  – интеграл вероятностей, табулированная функция.

Для неизвестных параметров значения температуры грунта, измеренные во многих точках в определенные моменты времени, составляют следующую систему уравнений:

$$c_i E_{ij} + d_i = T_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

где  $n$  – количество точек замеров температуры грунта в скважине;  $m$  – количество замеров температуры грунта во времени, разделенных периодом, равным кратному количеству лет;  $E_{ij}$  – значение функции (2) в точке  $y_i$  в момент времени  $\tau_j$ .

Измеренные значения температуры грунта (в районе теплового влияния сооружения) искажены погрешностями измерений, техногенными и естественными случайными отклонениями. Поэтому при  $m > 2$  система уравнений (3) оказывается несовместной и предполагает только приближенные решения. Однако, если для неизвестных параметров  $c$  и  $d$  принять в расчет два последних по времени замера температуры, эта система уравнений имеет строгое аналитическое решение, а именно:

$$\begin{cases} c_i E_{i,m-1} + d_i = T_{i,m-1}, \\ c_i E_{i,m} + d_i = T_{i,m}; \end{cases} \quad (4)$$

$$c_i = (T_{i,j} - T_{i,m-1}) / (E_{i,j} - E_{i,m-1}); \quad (5)$$

$$d_i = T_{i,m} - c_i E_{i,m}. \quad (6)$$

Подставляя (5) и (6) в (1), получим искомую экстраполяционную функцию:

$$T_{i,k} = c_i E_{i,k} + d_i, \quad k > m. \quad (7)$$

Расчет по формуле (7) может производиться в автоматическом режиме. Для этого авторы разработали компьютерную программу – макрос А (см. Приложение).

#### Определение расчетных параметров для оценки устойчивости свайного фундамента

Прогнозные значения температуры грунта в контрольной скважине определяются следующим образом.

Сначала определяется номер датчика (отсчитываемый от поверхности грунта), где установлена положительная температура –  $n1$ , затем номер последнего датчика, расположенного выше датчика  $n1$ , где установлена отрицательная температура –  $n2$ . Далее интерполяцией получают два важных параметра – глубину оттаивания грунта  $H$  на момент прогноза температуры грунта и глубину сезонного промерзания грунта  $D_f$ :

$$H = Y_{n1+1} - (Y_{n1+1} - Y_{n1})(T_{n1} - T_{bf}) / (T_{n1} - T_{n1+1}),$$

$$D_f = Y_{n2} + (Y_{n2+1} - Y_{n2})(T_{bf} - T_{n2}) / (T_{n2+1} - T_{n2}),$$

где  $Y_i$  – глубина расположения  $i$ -го датчика температуры, м;  $T_i$  – температура грунта, показываемая  $i$ -м датчиком температуры, °С;  $T_{bf}$  – температура промерзания–оттаивания грунта, °С.

Далее подсчитывается средняя температура многолетнемерзлого грунта ( $T_e$ ) по датчикам, расположенным в интервале глубин от  $H$  до  $L$  (глубина погружения сваи в грунт, м) и интерполяцией вычисляется температура около нижнего конца сваи ( $T_z$ ) в момент прогноза:

$$T_z = (L - Y_{n1})(T_{n1+1} - T_{n1}) / (Y_{n1+1} - Y_{n1}) + T_{n1}.$$

Расчет указанных параметров можно производить в компьютерной программе, составленной авторами – макрос В (см. Приложение).

#### Расчет устойчивости свайного фундамента по значениям прогнозной температуры

Расчет устойчивости свайного фундамента включает проверку двух предельных условий – по несущей способности и по пучению.

Рассмотрим их последовательно.

**Проверка предельных условий по несущей способности.** Контроль за устойчивостью свайного фундамента в этом случае сводится к проверке значения коэффициента запаса по несущей способности ( $k_u$ ), который в период эксплуатации фундамента всегда должен быть больше единицы, т. е.

$$k_u = F_u / (F_v + F_g) > 1,$$

где  $F_u$  – несущая способность сваи, кН;  $F_v$  – полезная нагрузка на сваю, кН;  $F_g$  – сила трения оттаявшего грунта о боковую поверхность сваи, кН. Кроме того, имеем

$$F_u = F_{u,T} + F_{u,b},$$

$$F_{u,T} = \gamma_c R s_p,$$

$$F_{u,b} = \gamma_c \gamma_{ca} R_{af} u_p (L - H),$$

$$F_g = 0.8 \gamma_{cf} f_c u_p (H - D_f),$$

где  $F_{u,T}$ ,  $F_{u,b}$  – несущая способность нижнего конца и боковой поверхности сваи соответственно, кН;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принимается по данным таблицы 7.2 [СП 25.13330.2020], безразмерный;  $\gamma_{ca}$  – коэффициент, учитывающий материал сваи, принимается для бетона равным 1, для стали – 0.7; для дерева – 0.9;  $R$  – расчетное давление на мерзлый грунт под нижним концом сваи, кПа;  $s_p$  – площадь нижнего конца сваи, м<sup>2</sup>;  $R_{af}$  – расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу на боковой поверхности смерзания в пределах длины сваи, находящейся в мерзлом грунте, кПа;  $u_p$  – периметр сваи, м;  $L$  – глубина погружения сваи в грунт, м;  $H$  – мощность оттаявшего слоя, расположенного над многолетнемерзлым грунтом, м; параметры  $R$  и  $R_{af}$  определяются по данным, приведенным в таблицах В1 и В3 приложения В [СП 25.13330.2020], в зависимости от расчетных значений температуры грунта около нижнего конца сваи  $T_z$  и ее боковой поверхности  $T_e$ ;  $\gamma_{cf}$  – коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности сваи определяется по таблице 7.4 [СП 24.13330.2021] в зависимости от способа погружения сваи, безразмерный;  $f_c$  – расчетные сопротивления талого грунта по боковой поверхности сваи, кПа, принимаются по данным таблицы 7.3 [СП 24.13330.2021];  $D_f$  – глубина сезонного промерзания грунта, м.

#### Проверка предельных условий по пучению.

Контроль устойчивости свайного фундамента в этом случае сводится к проверке значения коэффициента запаса по пучению  $k_f$ . Имеем

$$k_f = F_y / F_f > 1,$$

$$F_y = F_v + F_g + F_{u,b},$$

$$F_f = \gamma_{ca} \gamma_c \tau_{fh} u_p D_f,$$

где  $F_y$ ,  $F_f$  – сила, удерживающая сваю от выпучивания (зависящая от температуры), и сила пучения соответственно, кН;  $\tau_{fh}$  – удельная касательная сила пучения, кПа, принимается по данным таблицы 7.8 [СП 25.13330.2020].

Для расчета в автоматическом режиме прогноза устойчивости свайного фундамента была составлена компьютерная программа – макрос С (см. Приложение).

В завершение раздела следует указать, что описанная методика, как и подавляющее большинство методик по аналитическому расчету температурных полей, чаш и ореолов оттаивания в основании сооружений, исходит из того, что грунты однородны. В случае слоистого залегания грунтов в расчет принимаются осредненные грунтовые характеристики. Осреднение производится в пределах глубины осреднения по формуле для коэф-

фициентов теплопроводности грунта и по формуле для осреднения остальных характеристик ММГ:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} h_i},$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n A_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i},$$

где  $\lambda_i$ ,  $A_i$  – численные значения грунтовых характеристик  $i$ -го слоя;  $h_i$  – толщина  $i$ -го слоя;  $n$  – число  $i$ -х слоев в пределах глубины осреднения.

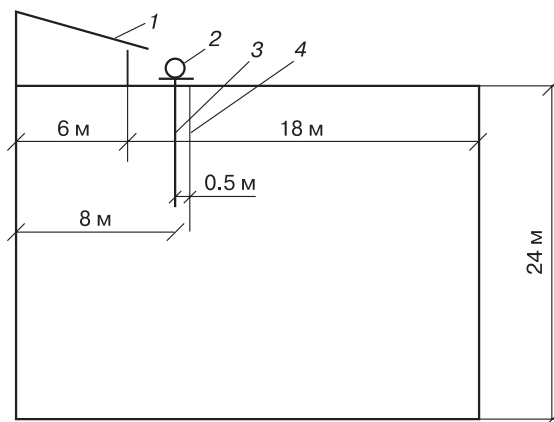
В качестве глубины осреднения принимается глубина расположения последнего принятого в расчет датчика температуры в контрольной скважине.

### Получение данных для верификации экстраполяционного метода и для примера расчета

Сопоставление результатов прогноза с данными натурных наблюдений заменяется условным сопоставлением с данными математического моделирования температурного поля ММГ в основании опоры надземного газопровода, расположенного от здания на расстоянии 2 м, поскольку моделирование позволяет получить достаточно точную картину температурного поля грунта в конкретных условиях задачи.

Математическое моделирование, основанное на решении задачи Стефана, было реализовано в программе “WARM” [Программа..., 1994]. Алгоритм этой программы включает метод конечных разностей с применением метода балансов и энтальпийную формулировку задачи [Основы..., 1999].

**Постановка задачи.** Рассматривалась двумерная расчетная область размером 24 × 24 м, с разбивкой на блоки по горизонтали и вертикали через 1 м. С правой стороны расчетной области от 0 до 6 м находится здание (половина). Опора (длиной 10 м) надземного газопровода расположена на расстоянии 8 м от левой границы, а температурная скважина – на 8.5 м от нее и от опоры газопровода на 0.5 м с заглублением до 10.5 м. Расчетная схема модели показана на рисунке.



Расчетная схема модели (модель двумерная).

1 – здание (половина); 2 – надземный газопровод; 3 – опора надземного газопровода; 4 – температурная скважина. Разбивка на блоки по горизонтали и вертикали через 1 м.

**Граничные условия.** На нижней и боковых границах расчетной области задавались граничные условия второго рода с нулевым тепловым потоком. На верхней границе были приняты условия первого рода (под зданием) и третьего рода (вне контура здания). Таким образом, на границе под зданием (от 0 до 6 м) была назначена постоянная температура +20 °С. Вне здания (от 6 до 24 м) было задано граничное условие третьего рода: температура атмосферного воздуха и коэффициент теплообмена между дневной поверхностью и атмосферным воздухом (табл. 1).

К значению температуры воздуха из табл. 1 вводилась поправка на глобальное потепление с момента начала моделирования в виде линейного тренда температуры, равная 0.05 °С/год.

**Начальные условия.** Во всей расчетной области начальная постоянная температура ММГ принималась равной –3.0 °С.

**Грунтовые характеристики.** Грунт – супесь по всей расчетной области с постоянными свойствами. Теплопроводность талого грунта 1.28 Вт/(м·°С) и мерзлого 1.65 Вт/(м·°С). Теплоемкость талого грунта 599 Вт·ч/(м³·°С) и мерзлого 458 Вт·ч/(м³·°С). Теплота фазового перехода 25 250 Вт·ч/м³, температура начала фазового перехода воды равна –0.1 °С.

Таблица 1. Граничное условие третьего рода за пределами здания

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$T_{air}$	-42.0	-35.6	-22.0	-6.8	6.2	15.6	18.8	14.9	6.1	-7.9	-28.2	-39.5
$\alpha$	0.66	0.66	0.62	1.14	3.63	3.60	3.51	3.44	3.37	2.13	0.94	0.81

Примечание.  $T_{air}$  – температура атмосферного воздуха, °С;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена между дневной поверхностью и атмосферным воздухом, Вт/(м²·°С).

Таблица 2. Результаты численного моделирования температурного режима грунта в местах расположения датчиков измерения температуры по программе "WARM"

У, м	Температура грунта по месяцам, °С											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>1990 год</i>												
0.5	-9.03	-9.72	-8.05	-6.10	-2.33	-0.10	2.58	10.31	8.66	4.23	-0.10	-0.10
1.5	-0.10	-0.10	-0.10	-3.10	-1.76	-0.28	-0.10	-0.10	3.17	3.36	1.44	0.84
2.5	0.66	0.43	0.38	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.04	2.24	1.60	1.15
3.5	0.62	0.47	0.42	-0.02	-0.10	-0.10	-0.10	0.34	0.51	1.22	1.09	1.05
4.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.63
5.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.24	-0.29	-0.21	-0.12	-0.10	-0.10	-0.10
6.5	-0.32	-0.31	-0.30	-0.34	-0.42	-0.49	-0.53	-0.48	-0.41	-0.37	-0.34	-0.32
7.5	-0.51	-0.49	-0.47	-0.50	-0.58	-0.65	-0.69	-0.67	-0.62	-0.58	-0.54	-0.51
8.5	-0.69	-0.66	-0.64	-0.64	-0.69	-0.76	-0.81	-0.81	-0.78	-0.74	-0.71	-0.67
9.5	-0.86	-0.83	-0.80	-0.79	-0.81	-0.86	-0.91	-0.93	-0.91	-0.88	-0.85	-0.82
10.5	-1.01	-0.98	-0.95	-0.93	-0.94	-0.97	-1.00	-1.02	-1.02	-1.01	-0.98	-0.95
<i>1991 год</i>												
0.5	-8.84	-9.72	-7.99	-5.93	-2.24	-0.10	2.89	10.37	8.91	4.37	-0.10	-0.10
1.5	-0.10	-0.10	-0.10	-2.91	-1.68	-0.27	-0.10	-0.10	3.92	3.68	1.57	0.90
2.5	0.77	0.52	0.46	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	2.00	2.51	1.81	1.26
3.5	0.88	0.70	0.64	0.45	0.00	-0.01	0.21	0.54	1.23	1.65	1.49	1.18
4.5	0.58	0.50	0.46	0.34	0.06	-0.03	0.13	0.36	0.66	0.89	0.88	0.77
5.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
6.5	-0.27	-0.14	-0.11	-0.13	-0.20	-0.27	-0.27	-0.23	-0.17	-0.12	-0.10	-0.10
7.5	-0.47	-0.36	-0.32	-0.32	-0.38	-0.44	-0.46	-0.44	-0.40	-0.36	-0.33	-0.31
8.5	-0.64	-0.56	-0.52	-0.49	-0.52	-0.58	-0.61	-0.61	-0.58	-0.55	-0.52	-0.49
9.5	-0.79	-0.74	-0.70	-0.66	-0.67	-0.70	-0.74	-0.75	-0.74	-0.71	-0.68	-0.66
10.5	-0.92	-0.89	-0.85	-0.81	-0.80	-0.82	-0.85	-0.86	-0.86	-0.85	-0.82	-0.80
<i>1992 год</i>												
0.5	-8.64	-9.72	-7.87	-5.87	-2.17	-0.10	3.20	10.43	9.14	4.50	-0.10	-0.10
1.5	-0.10	-0.10	-0.10	-2.83	-1.61	-0.24	-0.10	-0.10	4.32	3.93	1.64	0.94
2.5	0.83	0.55	0.48	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.98	2.30	2.65	1.91	1.33
3.5	0.97	0.77	0.69	0.50	0.45	0.22	0.31	0.88	1.45	1.81	1.63	1.32
4.5	0.67	0.57	0.52	0.46	0.36	0.19	0.23	0.56	0.94	1.17	1.18	1.05
5.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.21	0.45	0.59	0.63	0.60
6.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
7.5	-0.30	-0.29	-0.28	-0.29	-0.32	-0.36	-0.37	-0.37	-0.34	-0.32	-0.30	-0.29
8.5	-0.47	-0.45	-0.43	-0.43	-0.46	-0.50	-0.53	-0.54	-0.52	-0.49	-0.47	-0.45
9.5	-0.63	-0.60	-0.58	-0.57	-0.58	-0.62	-0.65	-0.66	-0.65	-0.63	-0.61	-0.59
10.5	-0.78	-0.74	-0.72	-0.70	-0.70	-0.72	-0.74	-0.76	-0.76	-0.75	-0.73	-0.71
<i>1993 год</i>												
0.5	-8.50	-9.71	-7.86	-5.77	-2.07	-0.10	3.49	10.50	9.34	4.63	-0.10	-0.10
1.5	-0.10	-0.10	-0.10	-2.76	-1.54	-0.22	-0.10	-0.10	4.61	4.14	1.69	0.96
2.5	0.89	0.60	0.53	-0.10	-0.10	-0.10	0.57	1.15	2.51	2.76	1.97	1.37
3.5	1.10	0.87	0.79	0.60	0.53	0.51	0.70	1.11	1.59	1.89	1.70	1.37
4.5	0.93	0.81	0.74	0.67	0.60	0.57	0.61	0.82	1.04	1.25	1.24	1.11
5.5	0.55	0.49	0.45	0.42	0.33	0.29	0.31	0.41	0.54	0.66	0.69	0.66
6.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
7.5	-0.28	-0.27	-0.26	-0.27	-0.30	-0.33	-0.35	-0.25	-0.20	-0.16	-0.13	-0.11
8.5	-0.43	-0.41	-0.40	-0.40	-0.42	-0.47	-0.49	-0.43	-0.40	-0.36	-0.33	-0.30
9.5	-0.57	-0.55	-0.53	-0.52	-0.53	-0.57	-0.59	-0.58	-0.55	-0.53	-0.50	-0.47
10.5	-0.69	-0.67	-0.66	-0.64	-0.64	-0.66	-0.68	-0.69	-0.67	-0.66	-0.63	-0.61

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<i>1994 год</i>												
0.5	-8.38	-9.71	-7.80	-5.69	-1.98	-0.10	3.73	10.55	9.44	4.71	-0.10	-0.10
1.5	-0.10	-0.10	-0.10	-2.71	-1.43	-0.21	-0.10	-0.10	4.75	4.24	1.72	0.98
2.5	0.92	0.62	0.55	-0.10	-0.10	-0.09	0.70	1.19	2.62	2.84	2.02	1.41
3.5	1.14	0.91	0.82	0.63	0.56	0.55	0.81	1.17	1.68	1.98	1.78	1.44
4.5	0.98	0.86	0.79	0.72	0.66	0.63	0.70	0.88	1.15	1.36	1.37	1.23
5.5	0.60	0.55	0.51	0.48	0.45	0.38	0.39	0.49	0.74	0.88	0.93	0.89
6.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.02	0.34	0.42	0.47	0.48
7.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.14	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
8.5	-0.28	-0.27	-0.26	-0.26	-0.27	-0.29	-0.31	-0.33	-0.30	-0.29	-0.28	-0.27
9.5	-0.43	-0.42	-0.40	-0.39	-0.40	-0.42	-0.44	-0.46	-0.45	-0.44	-0.42	-0.41
10.5	-0.57	-0.55	-0.54	-0.52	-0.52	-0.53	-0.55	-0.57	-0.57	-0.56	-0.55	-0.53
<i>1995 год</i>												
0.5	-8.27	-9.70	-7.77	-5.62	-1.94	-0.10	3.98	10.6	9.53	4.79	-0.10	-0.10
1.5	-0.10	-0.10	-0.10	-2.65	-1.37	-0.12	-0.10	-0.10	4.86	4.34	1.76	1.00
2.5	0.96	0.65	0.57	-0.10	-0.10	0.31	0.76	1.22	2.71	2.90	2.06	1.44
3.5	1.21	0.98	0.88	0.70	0.61	0.68	0.90	1.24	1.76	2.05	1.84	1.49
4.5	1.10	0.97	0.89	0.82	0.75	0.74	0.82	1.00	1.23	1.43	1.43	1.29
5.5	0.83	0.77	0.72	0.68	0.63	0.61	0.62	0.70	0.81	0.93	0.98	0.94
6.5	0.46	0.43	0.41	0.39	0.34	0.30	0.30	0.34	0.40	0.47	0.51	0.51
7.5	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
8.5	-0.26	-0.25	-0.24	-0.24	-0.25	-0.28	-0.29	-0.29	-0.29	-0.28	-0.27	-0.26
9.5	-0.39	-0.37	-0.36	-0.36	-0.37	-0.39	-0.41	-0.42	-0.41	-0.40	-0.39	-0.38
10.5	-0.51	-0.49	-0.48	-0.47	-0.47	-0.48	-0.50	-0.51	-0.51	-0.51	-0.50	-0.49

Примечание. У – глубина расположения датчика температуры, м.

**Конструкция опоры газопровода.** Опора состоит из одной сваи, представляющей собой стальную трубу с внешним диаметром 0.3 м. Глубина погружения сваи в грунт 10 м. Вертикальная нагрузка на верхний конец сваи составляет 200 кН.

**Контрольная температурная скважина.** Температурная скважина расположена на расстоянии 2.5 м от здания и 0.5 м от опоры газопровода. Датчики температуры находятся на глубинах от 0.5 до 10.5 м с шагом 1 м.

Результаты моделирования – значения температуры в местах расположения датчиков измерения температуры (8.5 м от левого края расчетной области и до глубины 10.5 м) через 10, 11, ..., 15 лет с начала моделирования приведены в табл. 2.

#### Верификация экстраполяционного метода прогноза температуры

Сопоставление данных расчета прогноза температуры ММГ по экстраполяционной методике с помощью макроса А (см. Приложение) с данными численного математического моделирования в качестве натуральных наблюдений по программе “WARM” [Программа..., 1994] приведены в табл. 3. Из анализа данных табл. 3 следует, что ошибка

прогноза (по макросу А) при шаге упреждения 1 год не превышает 0.2 °С. Однако с увеличением шага упреждения ошибка растет практически по линейному закону. Так, уже при шаге прогнозирования 2 года ошибка превышает 0.3 °С, а при шаге 4 года приближается к 0.6 °С. Отсюда следует, что при геотехническом мониторинге предпочтительнее принять упреждение 1 год, при котором совпадение данных математического моделирования (“WARM”) и прогноза (макрос А) температуры ММГ можно считать вполне удовлетворительным.

#### Пример прогноза устойчивости свайного фундамента

Прогноз устойчивости производился для опоры газопровода (см. рисунок). В целях сокращения объема статьи прогноз был сделан только для одного года – 1992-го. Последующий по годам прогноз выполнялся аналогично.

В качестве исходных параметров принимались данные, указанные в постановке задачи по моделированию температурных полей ММГ, а также сами температурные поля, полученные в результате численного моделирования по программе “WARM” (см. табл. 2). Расчет производился по-

Таблица 3. Погрешность прогноза температуры грунта по экстраполяционной методике

Упрежде- нение	1 год			2 года			3 года			4 года		
	01.10.1992 г.			01.10.1993 г.			01.10.1994 г.			01.10.1995 г.		
У, м	$T_{\text{mod}}$	$T_{\text{pr}}$	$T_{\text{mod}} - T_{\text{pr}}$	$T_{\text{mod}}$	$T_{\text{pr}}$	$T_{\text{mod}} - T_{\text{pr}}$	$T_{\text{mod}}$	$T_{\text{pr}}$	$T_{\text{mod}} - T_{\text{pr}}$	$T_{\text{mod}}$	$T_{\text{pr}}$	$T_{\text{mod}} - T_{\text{pr}}$
0.5	4.50	4.49	0.01	4.63	4.60	0.03	4.71	4.70	0.01	4.79	4.79	0.00
1.5	3.93	3.96	-0.03	4.14	4.21	-0.07	4.24	4.44	-0.20	4.34	4.64	-0.30
2.5	2.65	2.75	-0.10	2.76	2.96	-0.20	2.84	3.15	-0.31	2.90	3.32	-0.42
3.5	1.81	2.03	-0.22	1.89	2.37	-0.48	1.98	2.67	-0.69	2.05	2.95	-0.90
4.5	1.17	1.76	-0.59	1.25	2.54	-1.29	1.36	3.24	-1.88	1.43	3.87	-2.44
5.5	0.59	-0.10	0.69	0.66	-0.10	0.76	0.88	-0.10	0.98	0.93	-0.10	1.03
6.5	-0.10	0.10	-0.20	-0.10	0.30	-0.40	0.42	0.47	-0.05	0.47	0.63	-0.16
7.5	-0.32	-0.17	-0.15	-0.16	0.01	-0.17	-0.10	0.16	-0.26	-0.10	0.30	-0.40
8.5	-0.49	-0.38	-0.11	-0.36	-0.23	-0.13	-0.29	-0.10	-0.19	-0.28	0.02	-0.30
9.5	-0.63	-0.56	-0.07	-0.53	-0.43	-0.10	-0.44	-0.31	-0.13	-0.40	-0.20	-0.20
10.5	-0.75	-0.71	-0.04	-0.66	-0.58	-0.08	-0.56	-0.47	-0.09	-0.51	-0.37	-0.14
Среднее	-	-	0.20	-	-	0.34	-	-	0.44	-	-	0.57

Примечание. Шаг наблюдений 1 год (1990–1991). У – глубина расположения датчика температуры, м;  $T_{\text{mod}}$ ,  $T_{\text{pr}}$  – температура грунта, модельная, в качестве натуральных наблюдений (“WARM”) и прогнозная (макрос А, см. Приложение) соответственно, °С;  $T_{\text{mod}} - T_{\text{pr}}$  – погрешность прогноза, °С (указана в абсолютных единицах).

следовательно по макросам А, В, С (см. Приложение). При этом входными параметрами последующего макроса являются выходные параметры предыдущего. Результаты прогноза устойчивости свайного фундамента приведены в табл. 4.

Из анализа данных табл. 4 следует, что свайная опора во все месяцы 1992 г. имеет коэффици-

енты запаса больше единицы и, следовательно, сохраняет устойчивость. Причем к такому выводу наблюдатель приходит раньше на год – в 1991-м. Это важно, поскольку при ином результате в резерве остается год для того, чтобы исправить положение (например, использовать искусственное охлаждение основания опоры).

Таблица 4. Результаты прогноза устойчивости свайного фундамента

Январь						Июль					
$F_v$	200	$F_u$	276.07	$K_u$	1.38	$F_v$	200	$F_u$	340.68	$K_u$	1.70
$F_y$	326.78	$F_f$	145.14	$K_f$	2.25	$F_y$	326.78	$F_f$	0	$K_f$	$\infty$
Февраль						Август					
$F_v$	200	$F_u$	285.54	$K_u$	1.43	$F_v$	200	$F_u$	354.28	$K_u$	1.77
$F_y$	326.78	$F_f$	145.14	$K_f$	2.25	$F_y$	326.78	$F_f$	0	$K_f$	$\infty$
Март						Сентябрь					
$F_v$	200	$F_u$	287.31	$K_u$	1.44	$F_v$	200	$F_u$	346.65	$K_u$	1.73
$F_y$	326.78	$F_f$	145.14	$K_f$	2.25	$F_y$	326.78	$F_f$	0	$K_f$	$\infty$
Апрель						Октябрь					
$F_v$	200	$F_u$	298.46	$K_u$	1.49	$F_v$	200	$F_u$	336.94	$K_u$	1.68
$F_y$	326.78	$F_f$	178.13	$K_f$	1.83	$F_y$	326.78	$F_f$	0	$K_f$	$\infty$
Май						Ноябрь					
$F_v$	200	$F_u$	308.20	$K_u$	1.54	$F_v$	200	$F_u$	272.89	$K_u$	1.36
$F_y$	326.78	$F_f$	178.13	$K_f$	1.83	$F_y$	326.78	$F_f$	85.77	$K_f$	3.81
Июнь						Декабрь					
$F_v$	200	$F_u$	329.11	$K_u$	1.65	$F_v$	200	$F_u$	264.88	$K_u$	1.32
$F_y$	326.78	$F_f$	85.77	$K_f$	3.81	$F_y$	326.78	$F_f$	85.77	$K_f$	3.81

Примечание.  $F_u$ ,  $F_y$ ,  $F_f$  – несущая способность сваи, сила, удерживающая сваю от выпучивания, сила пучения соответственно, кН;  $F_v$  – полезная нагрузка на верхний конец сваи, кН;  $K_u$ ,  $K_f$  – коэффициенты запаса по несущей способности и пучению соответственно.

## ВЫВОДЫ

Предлагаемая методика обработки данных температурного мониторинга ММГ является экспресс-методом, не требующим большого количества исходных данных, которые сложно получить, используя программные комплексы решения задачи Стефана с их калибровкой по данным натурных наблюдений. В связи с этим метод имеет большое значение для оперативного контроля температурного режима ММГ. Он позволяет заблаговременно сигнализировать об авариях сооружения и принимать управляющие решения по их недопущению. Из этого следует необходимость включения предлагаемого экспресс-метода в состав геотехнического мониторинга в криолитозоне.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

## Литература

**Основы** геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, 526 с.

**Программа** расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами "WARM": Свидетельство № 940281 / Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Хрусталева Л.Н., Яковлев С.В. М., РосАПО, 1994, 1 с.

**СП 24.13330.2021.** СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. М., Минстрой России, 2021, 113 с.

**СП 25.13330.2020.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Минстрой России, 2020, 136 с.

**Хрусталева Л.Н.** Температурный режим вечномерзлых грунтов на застроенной территории. М., Наука, 1971, 168 с.

**URL:** <https://disk.yandex.ru/i/pE3IAHgw31G5Lw>

**URL:** <https://disk.yandex.ru/i/W0r5Z2i9guBQLA>

**URL:** <https://disk.yandex.ru/i/Au9FRimdtks9uQ>

## References

Osnovy geokriologii [Fundamentals of Geocryology]. Part 5. Engineering geocryology. E.D. Ershov (ed.). Moscow, Moscow Univ. Press, 1999, 526 p. (in Russian).

Programma rascheta teplovogo vzaimodeistviya inzhenernykh sooruzhenii s vechnomerzlymi gruntami WARM [Program for calculating the thermal interaction of engineering structures with permafrost soils "WARM"]: Certificate No. 940281 / Emelyanov N.V., Pustovoyt G.P., Khrustaleva L.N., Yakovlev S.V. Moscow, RosAPO, 1994, 1 p. (in Russian).

SP 24.13330.2021. SNiP 2.02.03-85. Pile foundations. Moscow, Minstroj Russii, 2021, 113 p. (in Russian).

SP 25.13330.2020. Foundations and foundations on permafrost soils. Moscow, Minstroj Russii, 2020, 136 p. (in Russian).

Khrustaleva L.N. Temperaturnyi rezhim vechnomerzlykh gruntov na zastroennoi territorii [Temperature regime of permafrost soils in built-up areas]. Moscow, Nauka, 1971, 168 p. (in Russian).

**URL:** <https://disk.yandex.ru/i/pE3IAHgw31G5Lw>

**URL:** <https://disk.yandex.ru/i/W0r5Z2i9guBQLA>

**URL:** <https://disk.yandex.ru/i/Au9FRimdtks9uQ>

*Поступила в редакцию 4 июня 2024 г.,  
после доработки – 30 октября 2024 г.,  
принята к публикации 9 ноября 2024 г.*

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Компьютерные программы (макросы) написаны на языке Visual Basic Application с использованием платформы Excel 2007 (VBA Excel). Для их просмотра на листе Excel, соответствующем выбранному макросу, в командной строке следует нажать клавишу "Разработчик" и далее клавишу "Visual Basic". Программы готовы к практическому применению, для чего пользователь должен выполнить две простых операции: заполнить своими исходными данными желтое поле на листе Excel и сделать один клик мышкой на кнопке "Запуск", помещенной в верхней части листа. Результат расчета можно будет прочитать на сером поле этого листа.

Доступ к программам осуществляется по ссылкам:

макрос А – <https://disk.yandex.ru/i/pE3IAHgw31G5Lw>

макрос В – <https://disk.yandex.ru/i/W0r5Z2i9guBQLA>

макрос С – <https://disk.yandex.ru/i/Au9FRimdtks9uQ>