

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.583:624.139

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА ОЖИДАЕМЫХ МЕРЗЛОТНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Л. Н. Хрусталева, Л. В. Емельянова, В. Д. Кауркин

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геол. ф-т,
119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, Россия*

По специальной методике обработки данных на метеорологической станции Марре-Сале (п-ов Ямал) установлено начало антропогенного тренда повышения среднегодовой температуры воздуха (1972 г.) и его величина (0,01 °С/год). Кроме того, определены природные колебания температуры воздуха в будущем. Последние аппроксимированы суммой девяти разнопериодных гармоник с различными амплитудами и фазами, которые в совокупности с антропогенным трендом предсказывают будущую среднегодовую температуру воздуха. Природные и антропогенные изменения среднегодовой температуры воздуха приводят к изменению температуры многолетнемерзлых пород и деградации мерзлых толщ. Степень деградации многолетнемерзлых пород к 2050 г. достигнет 1 %, а температура грунта повысится на 1,4 °С. В результате повышения температуры грунта подавляющее большинство сооружений, которые планируется возвести в ближайшем будущем, будет деформировано. По нашим расчетам 99,8 % всех построенных в 2003 г. зданий выработают свою надежность к 2050 г., что будет сопровождаться их массовыми деформациями и разрушениями.

Среднегодовая температура воздуха, природные и антропогенные изменения, температура многолетнемерзлых пород, надежность сооружений

IMPROVEMENT OF THE PREDICTION METHOD OF THE EXPECTED
GEOCRYOLOGY-CLIMATIC CHANGES IN THE NORTH OF WEST SIBERIA

L. N. Khrustalev, L. V. Emelianova, V. D. Kaurkin

Moscow State University, Department of Geology, 119992, Moscow, Leninskiye Gory, Russia

The beginning of anthropogenous trend of the mean annual air temperature rise (1972) and its value (0.01 °C/year) have been determined on the basis of special procedure of data processing at the meteorological station Marre Sale (Yamal peninsula). Future natural fluctuations of the air temperature have also been determined. They were approximated by the sum of nine harmonics with different periods, amplitudes, and phases. The anthropogenous trend and these harmonics make it possible to predict the future mean annual air temperature. Natural and anthropogenous changes of the mean annual air temperature cause a rise of the permafrost temperature and degradation of permafrost. By the late 2050, the degradation of permafrost will reach 1 % and soil temperature will increase by 1.4 °C. As the result of the soil temperature rise, most of constructions, which are to be built in the near future, will be deformed. According to our calculations, 99.8 % of buildings, which are to be built in 2003, will exhaust their reliability, will be deformed and destroyed by 2050.

Mean annual air temperature, natural and anthropogenous changes, permafrost temperature, reliability of constructions

ВВЕДЕНИЕ

По данным метеорологических наблюдений установлено, что с середины 60-х годов XX столетия на планете происходит устойчивое повышение средней годовой температуры воздуха. Это потепление можно объяснить естественно-исторической динамикой климата, связанной с общепланетарными геофизическими процессами, и влиянием на климат хозяйственной деятельности человека (антропогенного фактора), обусловленным выбросом в атмосферу углекислого газа, метана, закиси

азота и других газов, создающих парниковый эффект. Считается, что антропогенное влияние на температуру воздуха стало практически заметным начиная с 1970 г., и ожидается, что к середине XXI столетия оно вызовет повышение средней годовой температуры воздуха, которое составит от 1,5 до 7,0 °С, при этом антропогенный рост температуры будет происходить по линейному закону [Борзенкова и др., 1987; Борисенко, 1990; Haigh, Pyle, 1982; Lacic, 1981; Manabi, Wetherald, 1980].

Оценить антропогенное влияние на температуру воздуха можно, сопоставляя данные температурных наблюдений до и после 1970 г. [Хрусталева и др., 2000]. Получение такой информации — первая задача настоящей статьи.

Как известно, повышение температуры воздуха на территории криолитозоны часто сопровождается повышением температуры многолетнемерзлых пород (ММП) и активизацией мерзлотных процессов [Павлов, 1997]. В некоторых случаях отмечается многолетнее оттаивание и опускание верхней границы ММП, а также связанные с этим осадки дневной поверхности и преобразование рельефа местности. Кроме того, деградация мерзлых толщ (повышение их температуры и уменьшение мощности) приводит к изменениям растительных ассоциаций, почвы, животного мира, а также к разрушению построенных сооружений и, в конечном итоге, к изменению среды обитания человека. В связи с чем прогноз деградации мерзлых толщ имеет большое научное и практическое значение. Составление такого прогноза для территории п-ова Ямал — вторая рассматриваемая нами задача.

В результате повышения температуры ММП подавляющее большинство сооружений, построенных на мерзлых грунтах, деформируется. Оценить количество деформирующихся сооружений можно лишь с позиций вероятностного подхода, поскольку изменение температуры ММП — развивающийся во времени случайный процесс. Такой под-

ход был разработан в 1988 г. [Хрусталева, Пустовойт, 1988]. Его применение в нашем случае позволяет оценить, с какой скоростью будет вырабатываться надежность сооружений в случае глобального потепления климата. Это третья рассматриваемая нами задача.

Изложим решение этих задач последовательно применительно к территории, прилегающей к метеорологической станции (м/ст.) Марре-Сале (п-ов Ямал), по которой имеется многолетний ряд наблюдений за температурой воздуха.

АВТОРЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА

На рис. 1 показан ход среднегодовой температуры воздуха на м/ст. Марре-Сале за период с 1928 по 2001 г. Как видим, температура испытывает значительные циклические колебания. Предположим, что до 1970 г. колебания температуры обусловлены только естественными причинами, а после 1970 г. к ним прибавляется антропогенный фактор, порождающий линейный тренд температуры воздуха. Примем период с 1928 по 1970 г. за базовый и аппроксимируем ход среднегодовой температуры воздуха тригонометрическим рядом вида:

$$T(t) = T_0 + \sum_{j=1}^N A_j \sin [2 \pi t / \tau_j + \varphi_j], \quad (1)$$

где t — время в календарных годах (например, 1951 г.); T_0 — средняя многолетняя температура на

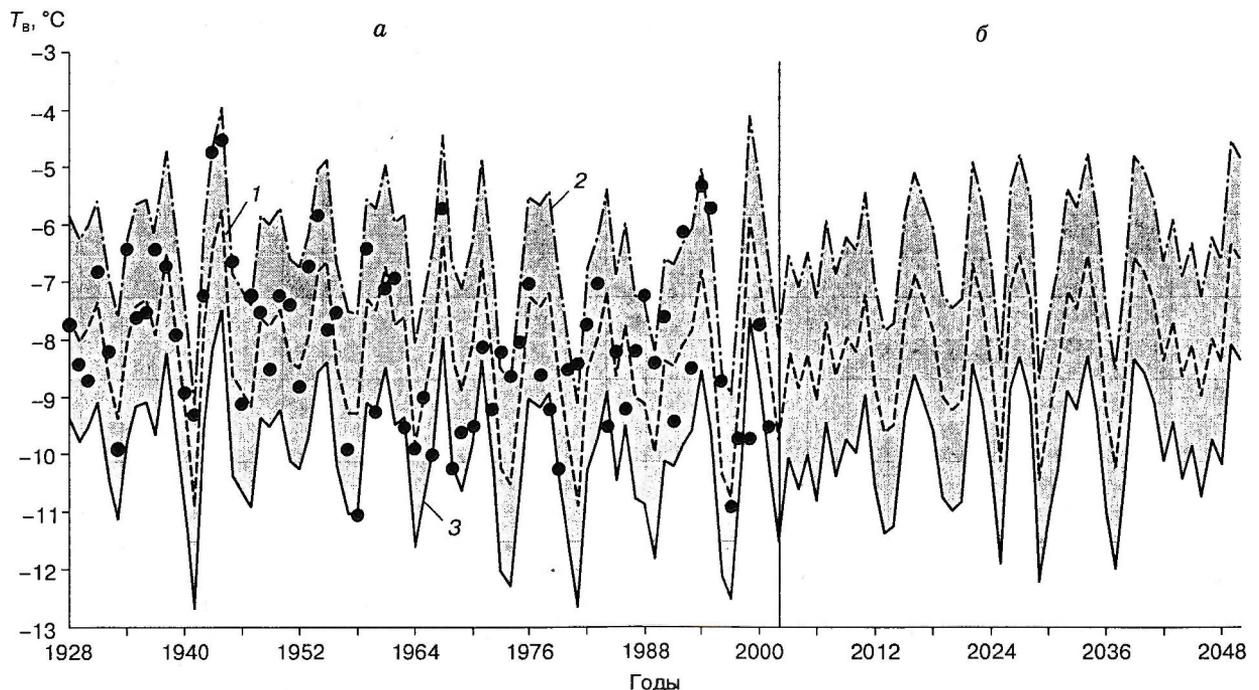


Рис. 1. Ход средней годовой температуры воздуха на м/ст. Марре-Сале.

Точки — наблюдаемый, кривые — вычисленный по формуле (9) ход температуры. 1 — среднее, 2 — максимальное, 3 — минимальное значение температуры; а — период наблюдений, б — период прогноза.

Таблица 1. Параметры тригонометрического ряда

j	τ_j , лет	A_j , °C	φ_j , рад.
1	2,1	0,46	3,05
2	3,7	0,12	2,82
3	4,0	0,60	3,19
4	4,6	0,44	4,19
5	5,6	0,91	1,16
6	6,1	0,21	-1,35
7	7,1	0,38	4,36
8	8,0	0,84	0,98
9	21,3	0,08	3,14

базовом интервале, °C; A_j — амплитуды гармоник, °C; φ_j — фазы гармоник, рад.; τ_j — периоды, лет; N — количество гармоник.

Параметры уравнения (1) подбирались методом наименьших квадратов с использованием классического алгоритма Лежандра. В результате получено девять гармоник с параметрами, указанными в табл. 1. При этом свободный член ряда равен $T_0 = -7,85$ °C.

Ряд разностей между фактическим значением температуры воздуха и ее гармоническим разложением (1) будем называть рядом флуктуаций η . Он представляет собой центрированный случайный процесс, подчиняющийся нормальному закону распределения с дисперсией $1,39$ °C². Его нормированная автокорреляционная функция быстро затухает и каких-либо регулярных изменений не претерпевает. Это позволяет предположить, что ряд флуктуаций среднегодовой температуры воздуха представляет собой последовательность некоррелированных случайных величин с конечной дисперсией. Такая последовательность в статистике называется белым шумом.

Итак, ход среднегодовой температуры воздуха за базовый период есть периодический процесс со случайной составляющей η , дисперсия которой равна $D_0 = 1,39$ °C², среднее значение $\eta_0 = 0,0$ °C.

Для выявления антропогенного тренда среднегодовой температуры воздуха проанализируем ряд ее флуктуаций за период с 1971 по 2001 г. Разобьем этот ряд по интервалам времени на выборки, которые, с одной стороны, были бы достаточно большими (представительными) для оценки генеральной совокупности, а с другой — достаточно короткими для оценки момента начала антропогенного повышения температуры. Этим условиям отвечают выборки объемом 7 лет (скользящие семилетия). Подсчитаем для них средние значения и дисперсии, сравним с аналогичными значениями базового ряда, который примем за генеральную совокупность. Если различия статистически незначимы, то выборки представляют ту же самую генеральную совокупность, и значит, естественный ход среднегодовой температуры воздуха не нару-

шается, в противном случае можно подозревать появление некоторого дополнительного фактора, изменяющего структуру метеорологического ряда.

Проверка нулевой гипотезы о равенстве средних значений осуществляется по наблюдаемому критерию S , о равенстве дисперсий — по наблюдаемому критерию H , которые рассчитываются для каждой семилетней выборки по формуле:

$$S = (\eta^* - \eta_0) (n/D_0)^{1/2}, \quad H = (n-1) D/D_0, \quad (2)$$

где η^* — среднее по выборке, D — исправленная выборочная дисперсия, $\eta_0 = 0$, $D_0 = 1,39$ — среднее и дисперсия базового ряда (см. выше).

Случайные величины S и H имеют, соответственно, распределения нормальное и „хи-квадрат“ с числом степеней свободы $n-1 = 6$. При проверке гипотезы о равенстве средних значений ($\eta^* = \eta_0$) конкурирующая гипотеза состоит в том, что $\eta^* > \eta_0$ (ищем тренд повышения температуры), и значит, критическая область является односторонней; для дисперсий конкурирующая гипотеза: $D \neq D_0$, т. е. критическая область двусторонняя. Отсюда получаем, что нулевая гипотеза принимается при:

$$S < S_{кр}, \quad \chi^2(1 - \alpha/2; n-1) < H < \chi^2(\alpha/2; n-1), \quad (3)$$

где $S_{кр}$ — критическая точка нормального распределения, определяется из уравнения (4); $\chi^2(1 - \alpha/2; n-1)$, $\chi^2(\alpha/2; n-1)$ — левая и правая критические точки распределения „хи-квадрат“, определяются по таблице χ^2 в зависимости от уровня значимости α и объема выборки n .

$$\Phi(S_{кр}) = (1 - 2\alpha)/2, \quad (4)$$

где $\Phi(x)$ — интеграл Лапласа, табулированная функция.

В нашем случае при объеме выборки $n = 7$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ неравенство (3) можем переписать:

$$S < 1,66; \quad 1,24 < H < 14,40. \quad (5)$$

Результаты расчета (табл. 2) показывают, что после 1971 г. структура метеорологического ряда нарушается. Мы предполагаем, что причиной нарушения явилось антропогенное повышение температуры воздуха $\Delta T(t)$:

$$\Delta T(t) = q(t - 1972) + b, \quad (6)$$

причем до 1971 г. $\Delta T(t) = 0$. Параметры тренда находим методом наименьших квадратов по ряду флуктуаций η на отрезке времени 1972–2001 гг.: $q = 0,01$ °C/год, $b = -0,686$ °C.

Если предположение о наличии тренда правильно, то введение линейной составляющей в формулу аппроксимации (1) позволит восстано-

Таблица 2. Результаты сравнения выборок

Период	η^* , °С	D , °С ²	S , безразм.	H , безразм.
1971–1977	-0,694	3,213	1,024	13,542
1972–1978	-0,761	3,689	1,049	15,547
1973–1979	-0,870	4,042	1,145	17,035
1974–1980	-0,991	3,507	1,401	14,780
1975–1981	-0,903	4,026	1,191	16,970
1976–1982	-0,880	4,081	1,153	17,201
1977–1983	-0,777	4,276	0,994	18,019
1978–1984	-0,936	4,842	1,125	20,406
1979–1985	-0,386	3,039	0,586	12,811
1980–1986	-0,305	2,671	0,494	11,257
1981–1987	-0,346	2,603	0,567	10,971
1982–1988	-0,421	2,257	0,741	9,513
1983–1989	-0,306	2,522	0,510	10,629
1984–1990	-0,321	2,500	0,538	10,538
1985–1991	-0,111	1,524	0,237	6,424
1986–1992	0,122	1,885	0,234	7,945
1987–1993	0,242	1,385	0,544	5,838
1988–1994	0,401	1,564	0,849	6,591
1989–1995	0,447	1,680	0,913	7,081
1990–1996	0,470	1,715	0,950	7,226
1991–1997	0,349	1,884	0,674	7,943
1992–1998	0,343	1,914	1,914	8,064
1993–1999	-0,480	4,462	0,601	18,804
1994–2000	-0,479	4,460	0,600	18,800
1995–2001	-0,904	3,900	1,211	16,437

вить естественный временной ход флуктуаций температуры воздуха. В этом случае исправленный ряд флуктуаций будет равен:

$$\mu = \eta - \Delta T(t). \quad (7)$$

В отличие от ряда η ряд μ должен быть статистически однородным. Сравнение средних и дисперсий случайной величины μ на отрезке 1972–2001 и на базовом отрезке времени 1928–1970 гг. не выявляет статистически значимых различий, что указывает на правильность сделанного предположения.

Таким образом, ход среднегодовой температуры воздуха после 1972 г. — периодический процесс с линейным трендом и случайной составляющей μ , имеющей нулевое математическое ожидание и дисперсию $1,39 \text{ }^\circ\text{C}^2$ ($\sigma_\mu = \sigma_\eta = 1,18 \text{ }^\circ\text{C}$). Теперь чтобы написать окончательную формулу, нам не хватает только численного значения поправки на вероятные отклонения средней годовой температуры воздуха. Принимая во внимание, что согласно требованиям СНиП 2.02.04-88, величина доверительной вероятности принимается $\gamma = 0,85$, при длине базового ряда $n = 43$ величина γ — квантили распределения Стьюдента для двусторонней критической области $t(n-1; \gamma)$ будет равна 1,46. Помножив ее на среднее квадратическое отклонение,

найдем поправку: $t(n-1; \gamma)\sigma_\eta = 1,46 \cdot 1,18 = 1,72 \text{ }^\circ\text{C}$.

Эта поправка определяет ширину полосы возможных отклонений средней годовой температуры воздуха, равной $3,44 \text{ }^\circ\text{C}$. Полоса покрывает большую часть фактических данных на базовом и текущем интервале (см. рис. 1). Это позволяет надеяться на хорошее совпадение расчетных и фактических данных в будущем (на прогнозном интервале времени).

Итак, с учетом полученных численных оценок окончательно можем записать:

$$T(t) = -8,54 + \sum_{j=1}^9 A_j \sin [2\pi t/\tau_j + \varphi_j] + 0,01(t - 1971) \pm 1,72, \quad (8)$$

где t — год прогноза, например — 2035; численные значения A_j, φ_j, τ_j приведены в табл. 1.

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Ведущую роль в решении тепловых задач в геокриологии играет задача кондуктивного теплообмена, описываемая уравнениями теплопроводности в талой и мерзлой зонах с условием Стефана на их границе (задача Стефана). Эта задача относится к классу нелинейных задач и не имеет не только точных, но и приближенных аналитических решений, за исключением простейших случаев. Поэтому мы прибегли к ее численному решению на ЭВМ методом конечных разностей.

Основные особенности примененного нами алгоритма конечно-разностного решения задачи Стефана состоят в использовании:

- явной схемы с регуляризацией, что позволяет в несколько раз увеличить шаг во времени (и сократить время счета);

- энтальпийной формы решения и метода балансов, что приводит к наглядной физической интерпретации результатов и существенно повышает точность определения положения границ промерзания—оттаивания.

Данный алгоритм реализован компьютерной программой „Тепло“, разработанной на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ под руководством проф. Л.Н. Хрусталева [Программа..., 1994].

При использовании программы „Тепло“ были приняты данные геокриологического стационара Марре-Сале, предоставленные А.В. Павловым:

Размер расчетной области соответствует грунтовому разрезу на территории стационара (рис. 2) и составляет 270 м. Мощность ММП в этом месте, по сообщению В.А. Дубровина, достигает 250 м. Размеры расчетной области выбраны специально на 20 м больше глубины залегания подошвы ММП, чтобы при моделировании можно

было проследить динамику как верхней, так и нижней границы ММП.

Теплофизические свойства пород. Согласно стратиграфической колонке (см. рис. 2), в расчетную область попадают три слоя: органоминеральный слой (до глубины 0,15 м), морские мелкие и среднезернистые пески (до глубины 10 м) и суглинки (ниже 10 м). Для упрощения задачи первый слой был из разреза исключен и заменен дополнительным термическим сопротивлением на дневной поверхности, свойства же двух других оставшихся слоев приведены в табл. 3

Климатические параметры. В расчете использовались следующие климатические параметры: среднемесячные — температура воздуха, скорость ветра, высота и плотность снежного покрова; прогнозная среднегодовая температура воздуха, вычисляемая по формуле (8). Поскольку литосфера обладает значительной тепловой инерцией, случайной составляющей в формуле (8) мы пренебре-

Таблица 3. Теплофизические свойства пород

Наименование пород	Теплопроводность породы, Вт/(м·°С)		Теплоемкость породы, Вт·ч/(м ³ ·°С)		q _p Вт·ч/м ³
	λ _{th}	λ _f	C _{th}	C _f	
Песок	2,26	2,62	600	540	23 700
Суглинок	1,57	1,80	755	557	31 600

Примечание. λ_{th} — теплопроводность породы в талом состоянии, λ_f — теплопроводность породы в мерзлом состоянии, C_{th} — теплоемкость породы в талом состоянии, C_f — теплоемкость породы в мерзлом состоянии, q_p — теплота фазовых превращений породы.

гали. Среднемесячные температура воздуха и скорость ветра были заимствованы из СНиП II-A.6-72 „Строительная климатология и геофизика“. Таблицы СНиП II-A.6-72 отражают средние многолетние значения климатических параметров (норму), полученные до 1972 г., т. е. до начала антропогенного влияния, и могут быть приняты за базу. К базовым данным по среднемесячной температуре в каждый последующий год (после 1971 г.) вводится температурная поправка Δ, учитывающая естественные и антропогенные изменения средней годовой температуры воздуха. Величина Δ вычисляется по формуле:

$$\Delta = T(t) - T^n, \quad (9)$$

где T(t) — средняя годовая температура воздуха, вычисляемая по формуле (8), без случайной составляющей; Tⁿ — среднемноголетняя норма средней годовой температуры воздуха, определяется по СНиП II-A.6-72.

Это предполагает равномерное повышение (понижение) среднемесячной температуры воздуха зимой и летом в результате многолетних колебаний климата.

К базовым данным по среднемесячным скоростям ветра поправка не вводится и они принимаются неизменными в течение всего периода моделирования. Неизменным также принимается режим снежных отложений (табл. 4).

Приведенные климатические параметры совместно с термическим сопротивлением органоминерального слоя и напочвенного покрова были использованы для назначения граничных условий 3-го рода на верхней границе расчетной области (на дневной поверхности). На нижней границе расчетной области (на глубине 270 м) задавались граничные условия 2-го рода в виде геотермического потока тепла, равного в принятой для моделирования географической точке 80 мВт/м² [Балобаев и др., 1987].

Начальная температура пород. Для установления кривой распределения температуры по глубине было проведено математическое моделирование на ЭВМ по программе „Тепло“ в описанной

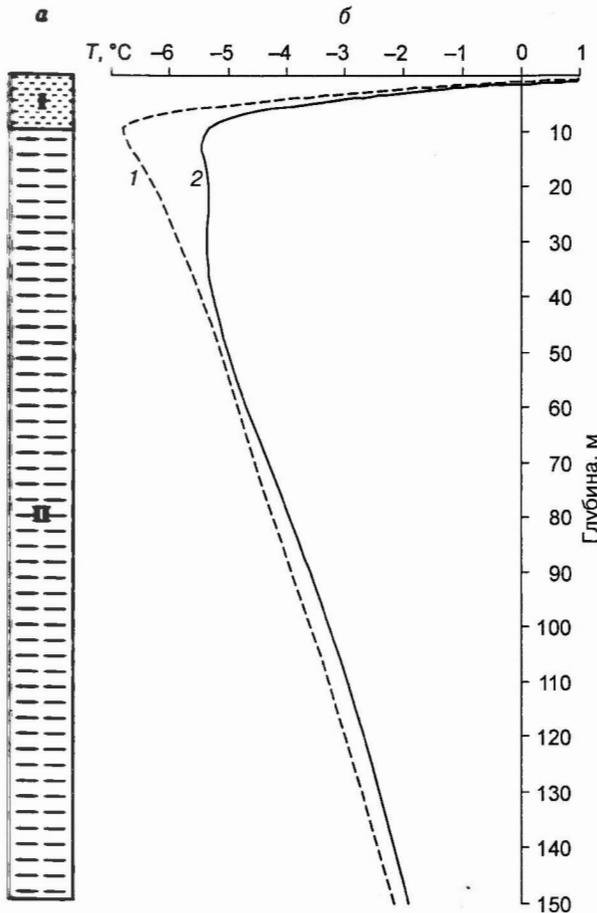


Рис. 2. Стратиграфическая колонка (а) и распределение температуры по глубине грунтового разреза (б), верхняя часть разреза.

I — песок, II — суглинок; 1 — распределение температуры на начало моделирования (05.10.1972), 2 — на конец моделирования (05.10.2050).

Таблица 4. Расчетные значения высоты h и плотности ρ снежных отложений

Значения	Месяц								
	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI
h , см	4	10	14	14	16	18	21	18	6
ρ , г/см ³	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,30	0,33	0,32	0,32

расчетной области. Моделирование проводилось до установления квазистационарного температурного режима пород. При этом климатические параметры принимались соответствующими норме, т. е. по СНиП II-A.6-72. За начало моделирования была принята дата 05.10.1972 г. Распределение температуры по глубине на эту дату принималось за начальное (см. рис. 2, кривая 1).

Конечная температура пород (результаты моделирования). За окончание моделирования принималась дата 05.10.2050 г. Распределение температуры на эту дату показано на рис. 2 (кривая 2). Как можно видеть, за период прогноза существенного изменения мощности ММП не произошло, однако температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд повысилась на 1,4 °С. Это повышение, как мы покажем ниже, очень опасно для устойчивости инженерных сооружений, основанием которых служат ММП. Кроме того, произошло увеличение слоя сезонного оттаивания на 30 %. В целом степень деградации мерзлых толщ (по М.И. Сумгину — процентное отношение потерянного „холода“ к его первоначальному запасу) составила около 1 %. Это величина небольшая, но не настолько, чтобы остаться незамеченной в теплом состоянии литосферы.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕРЗЛЫХ ОСНОВАНИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Под надежностью оснований понимается их способность воспринимать внешние нагрузки и воздействия (тепловые и механические) с сохранением эксплуатационной годности возведенного на нем сооружения. Количественной мерой надежности является вероятность события, при котором выполняются предельные условия по несущей способности и деформациям основания в течение всего периода эксплуатации. Вероятность этого события за текущее время называется функцией надежности основания и для зданий, построенных по принципу I, описывается выражением [Хрусталева и др., 2000]:

$$P_i = \exp(-2\pi)^{-1/2} \sum_{j=1}^i \exp(-\gamma_j^2/2)/\gamma_j, \quad (10)$$

где P_i — надежность основания в i -й год от начала эксплуатации здания, γ_j — характеристика безопасности в j -й год.

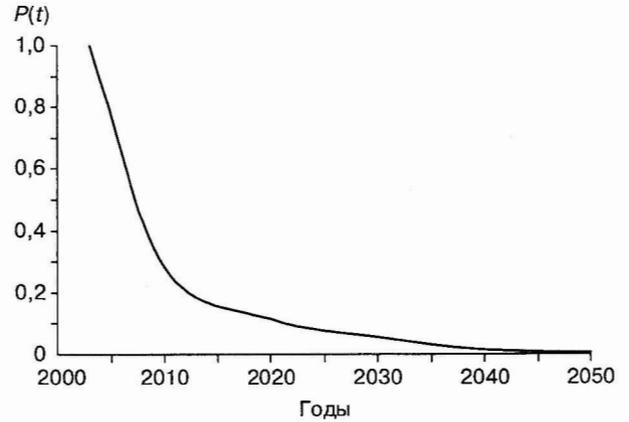


Рис. 3. Функция надежности основания зданий, построенных на мерзлых грунтах.

Характеристика безопасности для зданий на мерзлых грунтах определяется по методике, изложенной в монографии [Хрусталева, Пустовойт, 1988]. Она учитывает сезонные колебания температуры мерзлого грунта с постоянной амплитудой относительно своего среднегодового значения в j -й год эксплуатации сооружения. Последнее определяется с помощью описанного нами выше численного решения задачи Стефана на ЭВМ. Кроме того, характеристика безопасности зависит от состава грунта, типа фундамента и глубины его заложения.

Проведенный нами расчет по формуле (10) с использованием результатов моделирования по программе „Тепло“ позволяет построить функцию надежности оснований зданий на столбчатом фундаменте (рис. 3). Как можно видеть, функция быстро убывает, и к 2050 г. все построенные в 2003 г. здания практически полностью вырабатывают свою надежность, что приводит к их массовым деформациям. О величине последних можно судить по функции отказа, являющейся дополнением до единицы функции надежности. Результаты расчета количества деформирующихся зданий приведены в табл. 5. Мрачная перспектива, показанная данными этой таблицы, ставит перед инженерным мерзлотоведением серьезную задачу — обеспечение устойчивости сооружений в условиях природных и антропогенных изменений климата.

ВЫВОДЫ

1. В результате глобального потепления климата на территории п-ова Ямал в ближайшие 50 лет

Таблица 5. Количество деформирующихся зданий, в % от введенных в эксплуатацию в 2003 г.

Год эксплуатации	2003	2010	2020	2030	2040	2050
Кол-во деформ. зданий	0,0	71,8	88,6	94,4	98,7	99,8

будет происходить повышение средней годовой температуры воздуха со скоростью $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Эта цифра установлена нами на основе авторетроспективного анализа данных наблюдений за температурой воздуха на м/ст. Марре-Сале.

2. Повышение средней годовой температуры воздуха приведет к деградации мерзлых толщ на полуострове. Как показывает математическое моделирование, к 2050 г. температура мерзлых грунтов повысится на $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а слой сезонного оттаивания увеличится на 30 %. Это вызовет большие материальные потери.

3. Материальные потери будут обусловлены массовыми деформациями и разрушениями возводимой в будущем инфраструктуры. Проведенная нами оценка масштабов бедствия с позиций теории надежности показала, что уже через 10 лет эксплуатации 71,8 % зданий полностью выработают свою надежность. Эта мрачная перспектива ставит перед инженерным мерзлотоведением серьезную задачу — обеспечение устойчивости сооружений на мерзлых грунтах в условиях природных и антропогенных изменений климата.

4. Решение этой геотехнической задачи должно осуществляться параллельно с составлением по апробированной нами методике прогноза негативных геокриологических последствий потепления климата для всей территории распространения ММП.

Исследования выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-05-64331).

Литература

- Балобаев В.Т., Голубев В.А., Девяткин В.Н. и др.** Тепловое поле недр Сибири. Новосибирск, Наука, 1987, 197 с.
- Борзенкова М.И., Будыко М.И., Бютнер Э.К. и др.** Антропогенные изменения климата / Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля. Л., Гидрометеоиздат, 1987, 407 с.
- Борисенко Е.П.** Изменение климата и человек. М., Знание, 1990, 60 с.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатический мониторинг России // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 1, с. 47–58.
- Программа** расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами „Тепло“. А.с. 940281 (РосАПО) / Н.В. Емельянов, Г.П. Пустовойт, Л.Н. Хрусталева, С.В. Яковлев. 1994.
- СНиП II-A. 6-72.** Строительная климатология и геофизика. 137 с.
- СНиП 2.02.04-88.** Основания зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах, 52 с.
- Хрусталева Л.Н., Пустовойт Г.П.** Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий в криолитозоне. Новосибирск, Наука, 1988, 253 с.
- Хрусталева Л.Н., Медведев А.В., Пустовойт Г.П.** Многолетние изменения температуры воздуха и устойчивость проектируемых в криолитозоне сооружений // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 35–41.
- Haigh J.D., Pyle J.A.** Ozone perturbation 3 experiments in a two-dimensional circulation model // J. Roy Meteorol. Soc., 1982, vol. 457, No. 12, p. 35–38.
- Lacis A.** Greenhouse effects of frame gases, 1970–1980 // Geophys. Res. Lett., 1981, vol. 8, p. 1035–1038.
- Manabi S., Wetherald R.** On the distribution of climate change resulting from an increase in CO₂ content of the atmosphere // J. Atmos. Sci., 1980, vol. 37, p. 99–118.

Поступила в редакцию
8 января 2003 г.