

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.340

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ДИНАМИКА ТОЛЩ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД
НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ В БЛИЖАЙШИЕ 300 ЛЕТ

В.В. Клименко, Л.Н. Хрусталева*, О.В. Микушина, Л.В. Емельянова*, Э.Д. Ершов*,
С.Ю. Пармузин*, А.Г. Терешин

*Московский энергетический институт (технический университет),
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Россия, nilgpe@mpei.ru*

* *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геокриологии,
119992, Москва, Воробьевы горы, Россия, lev_kh@rambler.ru*

Представлены результаты математического моделирования годового и сезонного хода аномалий температуры приземного воздуха в северо-восточной части европейской территории России и на севере Западной Сибири. Моделирование выполнялось на основе новой версии регрессионно-аналитической модели климата, учитывающей связи региональных температурных трендов с антропогенными и естественными климатическими факторами. Эта модель позволила получить тренды региональной температуры воздуха на ближайшие столетия. Они превышают значения для самых теплых периодов за все время инструментальных наблюдений, однако в тысячелетнем масштабе времени не выходят за рамки естественной изменчивости климата региона.

Приведены результаты математического моделирования теплового взаимодействия в системе атмосфера–литосфера, которые свидетельствуют о значительном влиянии потепления атмосферы в ближайшие столетия на тепловое состояние литосферы северных регионов, что приводит к деградации многолетнемерзлых пород. Деградация многолетнемерзлых пород сказывается на состоянии инфраструктуры севера и ведет к ее преждевременному выходу из строя.

Изменения климата, математическое моделирование, геокриологический прогноз, динамика многолетнемерзлых пород, несущая способность мерзлых пород

CLIMATE CHANGE AND DYNAMICS OF THE PERMAFROST
IN NORTHWESTERN RUSSIA WITHIN THE NEXT 300 YEARS

V.V. Klimenko, L.N. Khrustalev*, O.V. Mikushina, L.V. Emel'yanova*, E.D. Ershov*,
S.Yu. Parmuzin*, A.G. Tereshin*

*Moscow Power Engineering Institute (Technical University),
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya str., 14, Russia, nilgpe@mpei.ru*

* *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology,
119992, Moscow, Vorobyovy Gory, Russia, lev_kh@rambler.ru*

The results of the annual and seasonal temperature modeling in the North-Eastern part of the European Russia and in the North of West Siberia are presented. Simulations are carried out on the basis of the new version of the regression-analytical climate model taking into account the relations between the regional temperatures and anthropogenic and natural factors. The model allows obtaining the regional temperature trends for the next centuries. According to these calculations, the temperatures in the Vorkuta and Nadym regions within the next 300 years will exceed the maximums of the instrumental climatic records, though remaining within the limits of millennial scale climate variations.

Presented modeling results of the atmosphere–lithosphere thermal interactions show a considerable influence of the climate warming on the thermal state of the lithosphere of the northern regions within the next centuries resulting in the permafrost degradation in the studied regions. That will affect the economical structure of the northern territories, causing their premature deterioration.

Climate change, mathematical modeling, geocryological prediction, permafrost dynamics, bearing resistance of the frozen ground

ВВЕДЕНИЕ

Для современной России, особенно для ее топливно-энергетического комплекса, изменения климата играют очень важную роль. Наблюдаемое в настоящее время и ожидаемое в ближайшем будущем глобальное потепление наряду с положительным эффектом (снижение потребления топлива на отопление, улучшение агроклиматических характеристик и др.) может принести России значительные проблемы. В первую очередь это касается состояния вечной мерзлоты, площадь распространения которой в России превышает 11 млн км², что составляет до 65 % территории страны. Особенно остро эта проблема стоит для северо-востока европейской части России и севера Западной Сибири, где сосредоточены богатейшие нефтегазовые месторождения, расположенные как на суше, так и на континентальном шельфе – Уренгой, Ямбург, Медвежье, Штокмановское и др. Разработка этих месторождений, геологические запасы которых достигают 100 млрд т условного топлива, будет осуществляться, по крайней мере, до конца нынешнего столетия. Там же находятся крупнейшие в мире города, построенные на вечной мерзлоте, такие как Воркута, Надым, Новый Уренгой, население которых превышает 300 тыс. чел. Есть все основания предполагать, что уже в нынешнем столетии природно-климатическая обстановка исследуемого региона изменится самым существенным образом, и это необходимо учитывать уже на этапе проектирования его быстро развивающейся инфраструктуры.

Одно из наиболее явных последствий наблюдаемого в последние десятилетия в северных регионах потепления – деградация вечной мерзлоты. В частности, за период систематических наблюдений (примерно с середины 50-х гг. XX в.) на северо-востоке Европейской России отмечается почти повсеместное повышение температуры грунтов [Израэль и др., 1999]. Быстрое оттаивание мерзлых пород сопровождается просадками земной поверхности и развитием опасных мерзлотных геологических процессов – термокарста, термоэрозии, солифлюкции, которые могут стать причинами нарушения устойчивости зданий и инженерных сооружений нефтегазового комплекса.

Авторы работы [Павлов, Гравис, 2000] убеждены, что существующие модели динамики криолитозоны способны количественно оценить грядущие изменения вечной мерзлоты только в том случае, если достоверно известны исходные климатические параметры. К сожалению, имеющиеся на данный момент долгосрочные метеорологические прогнозы (их обзор дан, в частности, в [Израэль, Анохин, 1998]) далеки от совершенства, а их достоверность и оправдываемость невысоки. Очевидно, что прогнозируемое повышение температуры воздуха за счет антропогенных факторов долж-

но накладываться на естественные долговременные климатические тенденции. Одной из моделей, способных дать достоверный прогноз на основе обширного материала об эволюции антропогенных и естественных климатообразующих факторов, а также современных инструментальных и исторических климатических данных, является, по мнению авторов настоящей статьи, разработанная ими регрессионно-аналитическая модель климата. Эта модель была успешно опробована при прогнозировании климатических изменений крайнего севера Евразии [Клименко, Микушина, 2005] и европейского севера России [Клименко, Микушина, 2001].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА

В качестве основного источника инструментальных данных выбран фрагмент наиболее полного архива наблюдений за температурой приземного воздуха, проведенных с 1886 по 2006 г. на 466 метеорологических станциях на территории СССР (с 1997 г. – на 153 станциях), собранного по данным [TEMPOS, 1992; NOAA-NCDC, 2006], дополненного значениями, рассчитанными по [Данные..., 1999]. Для настоящей работы климатические изменения исследовались в нескольких регионах северо-востока европейской части России и севера Западной Сибири, географическое положение этих регионов представлено в табл. 1. На их территории находится несколько длиннорядных (продолжительность ряда наблюдений 100 лет и более) метеорологических станций (Архангельск, Малые Кармакулы, Салехард и др.), по остальным станциям (из общего числа 72) информация охватывает меньшие промежутки времени.

Для пространственного осреднения стационарных данных по территории исследуемых регионов использовался метод Дирихле, который создает разбиение области на непересекающиеся поли-

Таблица 1. Характеристики исследуемых регионов

Регион	Координаты		Число метеостанций	Длиннорядные станции
	по широте	по долготе		
Ямало-Новоземельский	65–80	50–80	20	Малые Кармакулы, Нарьян-Мар, Усть-Цильма
Северо-восток европейской территории России	60–70	30–60	25	Архангельск, Сыктывкар, Чердынь
Северо-запад Сибири	60–70	60–90	28	Ханты-Мансийск, Дудинка, Туруханск, Сургут, Березово, Октябрьское

гоны. Осредненные климатические показатели (региональные среднегодовые и среднесезонные температурные аномалии \bar{T}) рассчитывались как взвешенное среднее от станционных наблюдений с весами, пропорциональными площадям соответствующих полигонов.

Полученные региональные ряды температурных аномалий были подвергнуты сглаживанию 10-летним фильтром скользящего среднего. Этот стандартный прием применялся для подавления межгодовой изменчивости, т. е. той части дисперсии, которая не может быть объяснена с помощью климатических факторов, использованных при построении предлагаемой ниже модели. Кроме того, из этих рядов удалены сигналы, обусловленные влиянием солнечной активности и астрономических факторов на изменение климата исследуемого региона в течение последних двух столетий. Эти сигналы рассчитывались на основе статистических связей максимальной чисел Вольфа, характеризующих солнечную активность, с изменениями региональных температур.

В табл. 2 приведены важные и относительно предсказуемые климатические факторы, вклады которых учитывались при построении региональных температурных трендов модели [Клименко и др., 1997].

Возмущения радиационного баланса, вызываемые каждым из первых двух факторов, выражены в единицах радиационного форсинга, т. е. изменения плотности теплового потока на верхней границе тропосферы по сравнению с некоторым исходным уровнем. Этот исходный уровень для каждого фактора определяется таким образом, чтобы форсинг в 1800 году, соответствующем условному началу индустриальной эпохи, был равен нулю. Для парниковых газов (в общей сложности около 30 атмосферных компонентов, пропускающих коротковолновое излучение Солнца к поверхности Земли, поглощающих обратное длинноволновое излучение и повышающих тем самым температуру приземного слоя воздуха) и тропосферных аэрозо-

лей, оказывающих обратный охлаждающий эффект за счет отражения и рассеивания поступающей радиации, использована авторская оценка суммарного антропогенного форсинга [Клименко и др., 1997, 2000]. При этом основным источником антропогенного воздействия на атмосферу является мировая энергетика (за счет эмиссии основного парникового газа – диоксида углерода, ежегодные темпы роста которой в последние 20 лет превышали 1,6 %): в ближайшие 100–125 лет мировое энергопотребление достигнет 23–25 млрд т условного топлива в год (против современного значения 17 млрд т условного топлива в год). Несмотря на постоянно снижающиеся удельные показатели выбросов парниковых газов, их эмиссия из энергетических источников будет продолжать расти вплоть до середины текущего столетия благодаря сохраняющейся высокой доле органического топлива в мировом энергетическом балансе, и лишь по мере исчерпания запасов нефти и газа при интенсивном внедрении возобновляемых источников энергии к концу XXI в. ожидается снижение объемов выбросов CO_2 и дальнейшая стабилизация его эмиссии на уровне, определяемом объемом потребления угля. Качественно аналогичная динамика характерна и для антропогенной эмиссии оксидов серы – основного источника тропосферных аэрозолей, но для этого вещества за счет внедрения природоохранных технологий в энергетике снижение глобальной эмиссии наблюдается уже несколько лет и продолжится в дальнейшем, достигнув к концу текущего столетия практически нулевой отметки. Источниками эмиссии остальных парниковых газов являются преимущественно сельское хозяйство и промышленность, их объем определяется в основном численностью мирового населения, стабилизация которого ожидается в начале XXII в. на уровне 9–10 млрд чел. Таким образом, антропогенное воздействие на атмосферу после 2100 г. можно считать практически постоянным.

Изменения концентрации CO_2 рассчитывались с применением авторской боксово-диффузии

Таблица 2. Основные климатические факторы и характеризующие их переменные

Климатообразующие факторы	Переменные, отражающие влияние климатообразующих факторов
Концентрации парниковых газов атмосферы (углекислый газ, метан, закись азота, озон, фреоны и др.) и тропосферных аэрозолей (сульфатных аэрозолей преимущественно антропогенного происхождения)	Суммарный форсинг парниковых газов и тропосферного сульфатного аэрозоля
Вулканическая активность (концентрация стратосферного, преимущественно сульфатного, аэрозоля)	Индекс кислотности для Северного полушария
Солнечная активность	Максимальные числа Вольфа, т. е. максимальные среднегодовые значения в каждом цикле Швабе
Скорость вращения Земли (Rot)	Среднегодовые отклонения длительности земных суток от длительности атомных суток
Зимний индекс североатлантического колебания (NAOI)	Разность нормализованных давлений на уровне моря по данным станций Лиссабон (Португалия) и Стиккисхольмур (Исландия)

онной модели глобального углеродного цикла [Клименко и др., 1997]. Согласно расчетам, для принятого в настоящей работе сценария изменения эмиссии углекислого газа его концентрация к 2100 г. достигнет 460 млн^{-1} (по сравнению с современным значением 380 млн^{-1} и доиндустриальным 281 млн^{-1}) и в дальнейшем сохранится примерно на этом уровне. Для расчета концентраций остальных парниковых компонентов использовались простые балансовые модели, учитывающие скорость их вывода из атмосферы. Охлаждающий эффект сульфатов-аэрозолей рассчитывался пропорционально эмиссии этого короткоживущего атмосферного компонента. Вклад различных веществ в суммарный радиационный форсинг вычислялся по радиационным моделям из [IPCC, 2001].

Изменения радиационного форсинга, связанного с вулканической активностью, рассчитаны по индексам кислотности гренландских льдов, а его прогноз построен авторами [Клименко и др., 1997] на базе гелиовулканической гипотезы, при этом экстраполяция максимальных чисел Вольфа выполнена с помощью тригонометрического тренда [Mikushina et al., 1997]. Скорость вращения Земли Rot и зимний индекс североатлантического колебания NAOI также экстраполированы тригонометрическими трендами с основными периодами 79 и 66 лет соответственно. Для данного исследования были построены сверхдлинные экстраполяции (до 2300 г.) всех климатических факторов, приведенных в табл. 2.

Механизмы влияния внешних факторов на климат учтены с помощью разработанной в лаборатории глобальных проблем энергетики МЭИ глобальной нестационарной энергобалансовой климатической модели [Клименко и др., 1997]. Эта модель позволила рассчитать глобально осредненные температурные отклики на заданные возмущения радиационного баланса (радиационные форсинги) (подробнее см. [Клименко и др., 1997; Клименко, Микущина, 2001, 2005]). Для форсинга парниковых газов и аэрозолей, а также для вулканического форсинга с помощью энергобалансовой модели получены соответствующие температурные отклики *Anthr* и *Volc*.

Связь среднегодовых (или сезонных) температур для каждого региона с температурными откликами *Anthr*, *Volc* и остальными климатическими факторами (см. табл. 2) устанавливалась с помощью следующей линейной модели:

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^5 \beta_i \bar{X}_i + \bar{\epsilon}, \quad (1)$$

где компоненты t_1, \dots, t_m вектора-столбца \bar{T} – сглаженные значения ряда среднегодовых или средне-сезонных температурных аномалий для исследуемого региона, скорректированные с учетом солнечной активности и астрономических факторов;

m – длина ряда для нахождения оценок коэффициентов модели (1) β_i (для Ямало-Новоземельского региона $m = 110$, что соответствует периоду с 1894 по 2003 г.); компоненты x_{i1}, \dots, x_{im} векторов-столбцов \bar{X}_i ($i = 1, 2$) – сглаженные температурные отклики *Anthr* и *Volc*, соответствующие изменению форсингов антропогенного и вулканического климатических факторов; компоненты x_{31}, \dots, x_{3m} вектора-столбца \bar{X}_3 – сглаженные значения ряда среднегодовых отклонений длительности земных суток от длительности атомных суток (Rot); компоненты x_{41}, \dots, x_{4m} вектора-столбца \bar{X}_4 – сглаженные значения ряда индекса североатлантического колебания (NAOI); \bar{X}_5 – единичный вектор (\bar{E}); β_i – коэффициенты модели; $\bar{\epsilon}$ – вектор случайных ошибок с независимыми значениями и нулевыми средними.

Сглаживание для всех рядов, входящих в модель (1), осуществлялось 10-летним фильтром скользящего среднего. Оценки коэффициентов модели (1) β_i найдены с помощью обычного метода наименьших квадратов, полученный тренд $\bar{\theta} = \sum_i \beta_i \bar{X}_i$, как уравнение регрессии, является

значимым на 95%-м уровне. На основе найденных значений β_i с использованием данных об эволюции климатических факторов \bar{X}_i за период 1800–2005 гг., а также их экстраполяций до 2300 г. были построены региональные температурные тренды θ с 1800 по 2300 г.

В сезонных моделях, аналогичных (1), для нахождения коэффициентов β_i при наличии условия их связи использовались метод множителей Лагранжа и экспертные оценки вулканических сигналов, полученные на основе данных [Cress, Schönwiese, 1990; Groisman, 1992].

На рис. 1 показан вычисленный с помощью модели (1) тренд изменения сглаженных среднегодовых температурных аномалий за три столетия для Ямало-Новоземельского региона. Как видно из рисунка, после 2000 г. среднегодовые температуры быстро растут и к 2050 г. превысят климатическую норму 1951–1980 гг. на $1,5^\circ\text{C}$. Это означает, что уже в ближайшие десятилетия в указанном регионе следует ожидать формирования климатических условий, не наблюдавшихся ранее в течение всего периода инструментальных наблюдений. Среднегодовой температурный тренд будет обусловлен совместным влиянием антропогенных и естественных (в основном североатлантического колебания и скорости вращения Земли) факторов со значительной ролью последних. Эти же естественные факторы вместе с ожидаемым существенным снижением уровня солнечной активности должны, на наш взгляд, привести к достаточно продолжительной фазе небольшого относительного похолодания в середине нынешнего столетия, которая сменится новым, еще более существенным

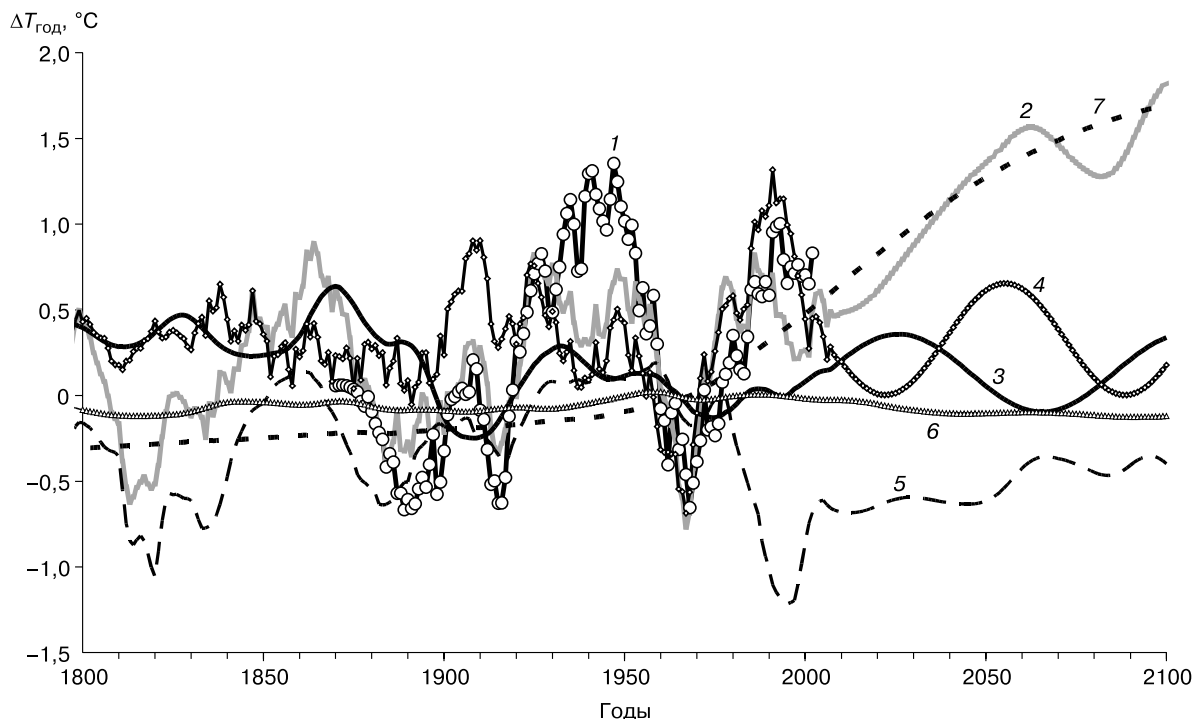


Рис. 1. Среднегодовой температурный тренд (температурные аномалии, °С) и вклады основных климатических факторов на территории Ямало-Новоземельского региона:

1 – сглаженные инструментальные данные; 2 – тренд модели; 3 – вклад скорости вращения Земли; 4 – вклад североатлантического колебания; 5 – вклад вулканов; 6 – солнечный вклад; 7 – вклад концентраций парниковых газов.

потеплением в конце XXI в. Мы оцениваем величину максимального потепления к концу столетия в 2,0–2,5 °С, что находится на уровне максимальных отметок, достигнутых во время раннебореального (9,0–8,7 тыс. лет назад) и атлантического (6–5 тыс. лет назад) оптимумов голоцена [Величко, Климанов, 1990].

На основе полученных температурных трендов для указанных в табл. 1 регионов были постро-

ены экстраполяции до 2300 г. среднегодовых и среднесезонных температурных аномалий для двух конкретных географических пунктов: Воркуты (67,5° с.ш., 64° в.д.) и Надыма (67,5° с.ш., 72,5° в.д.), которые приведены на рис. 2–4.

Таким образом, мы полагаем, что в течение всего ближайшего столетия среднегодовые температуры Воркуты и Надыма (рис. 2) все еще будут находиться в пределах естественной изменчивости

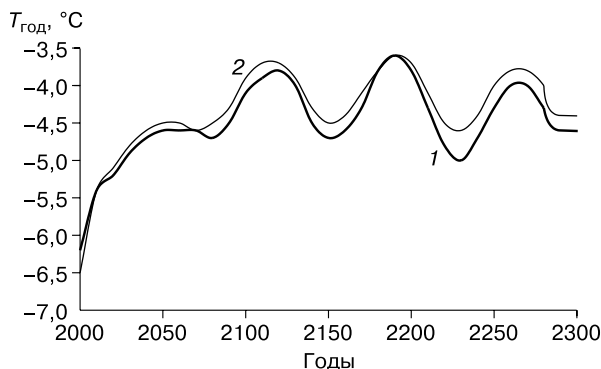


Рис. 2. Тренды среднегодовых температур в районах Воркуты (1) и Надыма (2).

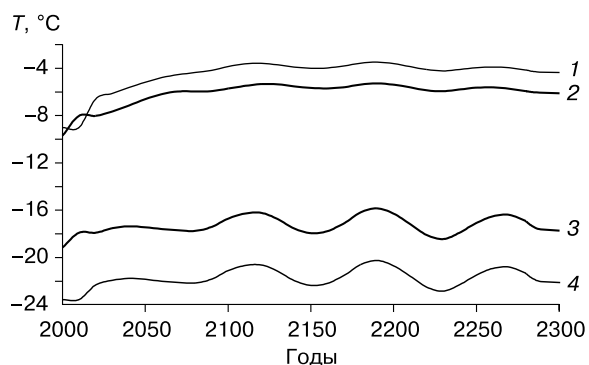


Рис. 3. Тренды средних весенних (1, 2) и зимних (3, 4) температур воздуха в районах Воркуты (2, 3) и Надыма (1, 4).

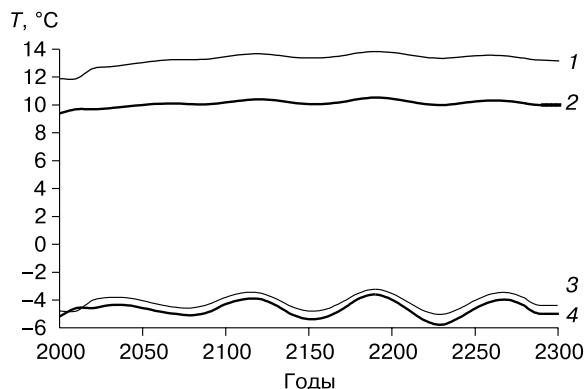


Рис. 4. Тренды средних летних (1, 2) и осенних (3, 4) температур воздуха в районах Воркуты (2, 4) и Надыма (1, 3).

в тысячелетнем масштабе времени. В последующий период (вплоть до 2300 г.) колебания среднегодовой температуры в связи с предполагаемой стабилизацией антропогенного воздействия на атмосферу будут определяться исключительно действием естественных факторов. Это воздействие будет проявляться в виде чередования относительно теплых и холодных периодов длительностью 60–70 лет, соответствующих квазициклам североатлантического колебания и флуктуаций скорости вращения Земли.

Характер будущих изменений средних зимних и весенних температур (рис. 3) во многом напоминает среднегодовой тренд, однако фаза относительного зимнего похолодания в середине текущего столетия выражена сильнее за счет более высокой чувствительности средних зимних температур к изменению скорости вращения Земли. Обнаружена сравнительно невысокая чувствительность средних летних и осенних температур ко всем рассмотренным здесь климатическим факторам (рис. 4), тем не менее к концу текущего столетия ожидается повышение средней летней температуры в районе Воркуты примерно на 1 °С, а в районе Надыма даже на 2 °С, что хорошо согласуется с данными палеореконовструкций для наиболее теплых периодов голоцена [Клименко, Микушина, 2005].

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Прогнозные расчеты температурных полей в грунте производились на ЭВМ по программе “Тепло” [Программа..., 1994] для районов Воркуты (Европейский Север) и Надыма (Западная Сибирь). Для каждого района принят свой сценарий изменения температуры воздуха по сезонам года (см. рис. 3, 4). При этом мощность снежных отложений

и характер растительности принимались неизменными в течение периода прогноза и соответствовали их среднемноголетним значениям за последние 30 лет до начала прогноза. Математическое моделирование осуществлялось для конкретного геологического разреза-представителя для района Воркуты и Надыма. Задача ставилась как линейная. На нижней границе расчетной области, размеры которой превышают мощность многолетнемерзлых пород (ММП) в 2,08 раза (Воркута) и 1,22 раза (Надым), задавалось граничное условие II рода с постоянным во времени значением теплового потока, соответствующего теплотокоту из недр земли в данном районе. Численные значения этого теплового потока равны 0,034 Вт/м² (Воркута) и 0,054 Вт/м² (Надым).

Геологический разрез-представитель для района Воркуты представлен до глубины 9 м моренными суглинками легкими и средними, ниже до глубины 150 м – тяжелой супесью, для района Надыма – торфом до глубины 1,5 м, ниже до глубины 110 м – аллювиальными песчаными отложениями. Описание разреза и теплофизические характеристики грунтов приведены в табл. 3 (графы 1, 2, 7–13). В графе 3 указана начальная мощность мерзлой толщи ($H_{\text{ММП}}$), 4 – величина теплового потока из недр земли (q), 5 – температура ММП (T_0) на глубине (h_0) нулевых годовых теплооборотов, 6 – максимальная глубина сезонного оттаивания пород (ξ). На верхней границе расчетной области задается граничное условие III рода с переменной во времени температурой воздуха и коэффициентом теплообмена (обратная величина термическому сопротивлению). При этом температура воздуха задавалась в виде своих среднесезонных значений (зима, весна, лето, осень), осредненных за 10 лет. Сезонные значения температуры воздуха изменяются каждые 10 лет в соответствии с принятым сценарием климатического потепления.

Коэффициент теплообмена (в нем учитывается и снежный покров) задавался своими среднемесячными значениями, осредненными за ближайшие 30 лет, предшествующих периоду прогноза.

Кроме граничных условий для осуществления математического моделирования задавались также начальные условия. Методика назначения начальных условий предусматривала постановку специальной задачи, которая предшествовала основной задаче (прогноз температуры) и отличалась от нее только верхними граничными условиями. Последние принимались в виде постоянных значений среднемесячных температур наружного воздуха и коэффициентов теплообмена, осредненных за ближайшие 30 лет, предшествующих рубежному году (табл. 4).

Основная задача решалась начиная с рубежного года (2000) до 2296 г. с записью результатов через каждые 10 лет (табл. 5).

Таблица 3. Геологические, геокриологические и теплофизические характеристики пород, использованные при моделировании температурных полей литосферы в районе Воркуты и Надыма

Грунт	Интервал глубин, м	$H_{\text{ММП}}$, м	q , Вт/м ²	T_0 , °С (на h_0 , м)	ξ , м	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)		Объемная теплоемкость, Вт·ч/(м ³ ·°С)		Весовая влажность, доли ед.	Плотность сухого грунта, т/м ³	Теплота фазового перехода, Вт·ч/м ³			
						талой фазы	мерзлой фазы	талой фазы	мерзлой фазы						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
<i>Для разреза-представителя в районе Надыма</i>															
Торф	0–1,5	90,0	0,054	–1,64 (16,5)	0,54	0,93	1,39	1044,0	754	1,50	0,4	55 800			
Песок	1,5–110					2,15	2,37	770,0	592,0				0,20	1,6	29 760
<i>Для разреза-представителя в районе Воркуты</i>															
Суглинок средний гра-велистый	0–6	71,9	0,034	–1,26 (15,5)	0,87	1,45	1,57	835,2	603,2	0,30	1,4	38 976			
Суглинок легкий	6–7					1,10	1,22	684,4	522,0				0,23	1,4	25 984
Суглинок легкий	7–8					1,04	1,16	661,2	533,6				0,20	1,4	22 388
Суглинок средний	8–9					1,45	1,57	835,2	603,2				0,30	1,4	38 976
Супесь тяжелая	9–150					1,33	1,51	684,4	522,0				0,20	1,4	25 984

Примечание. $H_{\text{ММП}}$ – глубина залегания подошвы многолетнемерзлых пород, считая от дневной поверхности; q – плотность теплового потока на нижней границе толщ многолетнемерзлых пород; T_0 – среднегодовая температура пород на глубине (h_0) ее нулевых годовых амплитуд; ξ – максимальная глубина сезонного оттаивания пород.

Таблица 4. Верхние граничные условия III рода при моделировании температурного режима пород

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI*	VII*	VIII*	IX	X	XI	XII
<i>Воркута</i>												
$T_{1951-1980}$, °С	–19,2	–19,2	–9,7	–9,7	–9,7	9,4	9,4	9,4	–5,2	–5,2	–5,2	–19,2
h_s, h_p , м	0,45	0,51	0,55	0,50	0,28	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10	0,30	0,35
ρ_s , г/см ³	0,24	0,25	0,26	0,29	0,32	–	–	–	0,20	0,20	0,22	0,23
λ_s, λ_p , Вт/(м·°С)	0,27	0,28	0,28	0,31	0,35	0,58	0,58	0,58	0,22	0,22	0,24	0,26
α_s, α_p , Вт/(м ² ·°С)	0,59	0,55	0,51	0,63	1,24	5,8	5,8	5,8	4,41	2,2	0,81	0,73
<i>Надым</i>												
$T_{1955-1980}$, °С	–23,6	–23,6	–9,0	–9,0	–9,0	11,9	11,9	11,9	–4,8	–4,8	–4,8	–23,6
h_s, h_p , м	0,46	0,60	0,66	0,66	0,47	0,10	0,10	0,10	0,02	0,07	0,24	0,40
ρ_s , г/см ³	0,20	0,22	0,24	0,26	0,30	–	–	–	0,08	0,12	0,18	0,19
λ_s, λ_p , Вт/(м·°С)	0,22	0,24	0,27	0,28	0,32	0,27	0,27	0,27	0,09	0,14	0,20	0,21
α_s, α_p , Вт/(м ² ·°С)	0,48	0,41	0,41	0,43	0,68	2,7	2,7	2,7	4,06	2,03	0,82	0,52

* Для трех летних месяцев приведены значения параметров h_p, λ_p, α_p соответственно.

Примечание. $T_{1951-1980}$ – среднегодовые значения температуры воздуха; $h_s, \rho_s, \lambda_s, R_s$ – мощность, плотность, коэффициент теплопроводности и термическое сопротивление снежного покрова; h_p, λ_p, α_p – мощность, коэффициент теплопроводности и термическое сопротивление растительного покрова; α_s, α_p – коэффициенты теплообмена (зимой $\alpha_s = 1/R_s$, где $R_s = h_s/\lambda_s$, летом $\alpha_p = 1/R_p$, где $R_p = h_p/\lambda_p$).

Таблица 5. **Изменение климатических и геокриологических характеристик при прогнозе потепления климата (прогнозные значения за каждый 10-летний период)**

Годы	Район Воркуты				Район Надыма			
	T_v	T_0 ($h_0 = 15,5$)	H_T	$H_{ММП}$	T_v	T_0 ($h_0 = 16,5$)	H_T	$H_{ММП}$
1951 (1955)–1980*	-6,2	-1,26	0,87	71,90	-6,5	-1,64	0,54	91,00
2000–2010	-5,4	-0,94	0,92	71,90	-5,4	-1,15	0,59	91,00
2010–2020	-5,2	-0,74	0,93	71,89	-5,1	-0,80	0,60	91,00
2020–2030	-4,9	-0,52	0,94	71,87	-4,8	-0,51	0,62	90,96
2030–2040	-4,7	-0,36	0,96	71,83	-4,6	-0,31	0,63	90,91
2040–2050	-4,6	-0,28	0,98	71,78	-4,5	-0,22	0,64	90,83
2050–2060	-4,6	-0,23	0,98	71,71	-4,5	-0,18	0,64	90,73
2060–2070	-4,6	-0,22	0,98	71,63	-4,6	-0,18	0,64	90,62
2070–2080	-4,7	-0,23	0,97	71,55	-4,5	-0,17	0,64	90,49
2080–2090	-4,5	-0,17	0,98	71,46	-4,3	-0,08	0,66	90,36
2090–2100	-4,1	-0,07	1,26	71,37	-3,9	-0,04	1,50	90,22
2100–2110	-3,9	-0,04	1,82	71,28	-3,7	-0,02	1,52	90,08
2110–2120	-3,8	-0,02	2,35	71,18	-3,7	-0,02	2,22	89,93
2120–2130	-4,0	-0,01	2,58	71,11	-3,9	-0,01	2,96	89,77
2130–2140	-4,5	-0,01	2,59	70,98	-4,3	-0,01	3,01	89,63
2140–2150	-4,7	-0,00	2,59	70,87	-4,5	-0,00	3,01	89,48
2150–2160	-4,6	-0,00	2,59	70,76	-4,4	-0,00	3,01	89,33
2160–2170	-4,3	-0,00	2,59	70,65	-4,1	-0,00	3,01	89,17
2170–2180	-3,8	-0,00	2,59	70,54	-3,8	-0,00	3,01	89,00
2180–2190	-3,6	-0,00	2,85	70,43	-3,6	-0,00	3,10	88,75
2190–2200	-3,8	-0,00	3,27	70,32	-3,7	-0,00	4,83	88,69
2200–2210	-4,3	-0,00	3,31	70,21	-4,1	-0,00	5,08	88,53
2210–2220	-4,8	-0,00	3,31	70,11	-4,5	-0,00	5,09	88,37
2220–2230	-5,0	-0,00	3,31	70,01	-4,6	-0,00	5,09	88,21
2230–2240	-4,7	-0,00	3,31	69,90	-4,4	-0,00	5,09	88,05
2240–2250	-4,3	-0,00	3,31	69,80	-4,0	-0,00	5,09	87,90
2250–2260	-4,0	-0,00	3,31	69,70	-3,8	-0,00	5,09	87,74
2260–2270	-4,0	-0,00	3,31	69,60	-3,8	-0,00	5,40	87,58
2270–2280	-4,3	-0,00	3,31	69,50	-4,0	-0,00	5,69	87,42
2280–2290	-4,6	-0,00	3,31	69,40	-4,4	-0,00	5,72	87,26
2290–2296	-4,7	-0,00	3,31	69,30	-4,5	-0,00	5,72	87,16

* Интервал 1951–1980 гг. соответствует району Воркуты, 1955–1980 гг. – району Надыма.

Примечание. T_v – среднегодовая температура воздуха, °С; T_0 – среднегодовая температура пород на глубине (h_0) ее нулевых амплитуд, °С; H_T – максимальная глубина оттаивания пород на конец летнего периода, считая от дневной поверхности, м; $H_{ММП}$ – глубина залегания подошвы многолетнемерзлых пород, считая от дневной поверхности, м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из данных, приведенных на рис. 5 и в табл. 5, в обоих районах наблюдается отрыв слоя сезонного промерзания пород от многолетнемерзлой толщи и трансформация сезонного протаивания в многолетнее. Отрыв происходит в 2090 г. (Воркута) и 2080 г. (Надым).

На кривых многолетнего оттаивания в обоих районах имеются горизонтальные площадки, которые свидетельствуют о прекращении многолетнего оттаивания на некоторых промежутках времени. А именно, в районе Воркуты два таких периода – 2133–2185 гг., 2200–2296 гг., в районе

Надыма три периода – 2135–2180 гг., 2210–2262 гг., 2288–2296 гг.

Прекращение многолетнего оттаивания объясняется тем, что в соответствии с принятыми сценариями положительная температура поверхности грунта в эти периоды сменяется на отрицательную и происходит многолетнее промерзание грунта, которое, однако, не достигает границы многолетнего оттаивания. В этом случае между двумя границами (промерзания и оттаивания), на которых поддерживается температура фазового перехода, устанавливается безградиентный слой, являющийся абсолютным теплоизолятором. Он обеспечивает стабильное положение границы оттаивания.

Кривые на рис. 5 хорошо гармонируют с кривыми на рис. 2, а именно, периоды потепления на рис. 2 совпадают с периодами опускания верхней границы ММП на рис. 5, а периоды похолодания – с ее стабилизацией и образованием “перелетков” мерзлоты. Как следует из графиков, наиболее интенсивное промерзание (рост “перелетков”) в обоих районах происходит в 2160 и 2240 гг., когда в соответствии с принятыми сценариями сумма зимних градусочасов поверхности грунта существенно превышает сумму летних.

Повышение температуры грунта, обусловленное потеплением климата, приводит к перераспределению теплопотока, поступающего из недр земли, большая часть которого не отводится от подошвы ММП, а идет на оттаивание мерзлых грунтов снизу. В результате глубина залегания подошвы ММП за счет оттаивания пород снизу уменьшается к концу исследуемого периода в районе Воркуты на 2,6 м, а в районе Надыма – на 3,8 м. Большие мощности оттаивания нижнего горизонта многолетнемерзлых пород в районе Надыма объясняются, с одной стороны, теплофизическими свойствами пород – большими значениями коэффициента теплопроводности и меньшими затратами тепла на фазовые переходы в песчаных породах, с другой – большими значениями фонового теплопотока, поступающего из недр в этом районе.

Таким образом, математическое моделирование показало, что при принятых в настоящей работе сценариях изменения климата в обоих исследованных районах (Воркута, Надым) происходит деградация ММП. Одно из важнейших последствий деградации ММП – изменение условий работы многих сооружений в криолитозоне, которые проектировались без учета этого изменения климата. Дело в том, что прочностные и деформационные свойства ММП, являющихся основаниями инженерных сооружений, в значительной мере зависят от температуры. С повышением температуры первые уменьшаются, а вторые возрастают, что может привести к деформациям сооружений и материальному ущербу.

Согласно нормативным документам [СНиП 2.02.01-83; СНиП 2.01.07-85; СНиП 2.02.04-88], при проектировании сооружений с сохранением грунтов оснований в мерзлом состоянии вводится коэффициент запаса, который зависит от класса сооружения и изменяется от 1,05 до 1,56. Это означает, что если в результате повышения температуры ММП несущая способность основания уменьшится до 54–95 % первоначальной (проектной), то основание даст отказ и надфундаментная конструкция разрушится. Результаты расчетов несущей способности оснований зданий, проведенных нами по рекомендациям СНиП 2.02.04-88 с учетом данных моделирования, приведены в табл. 6.

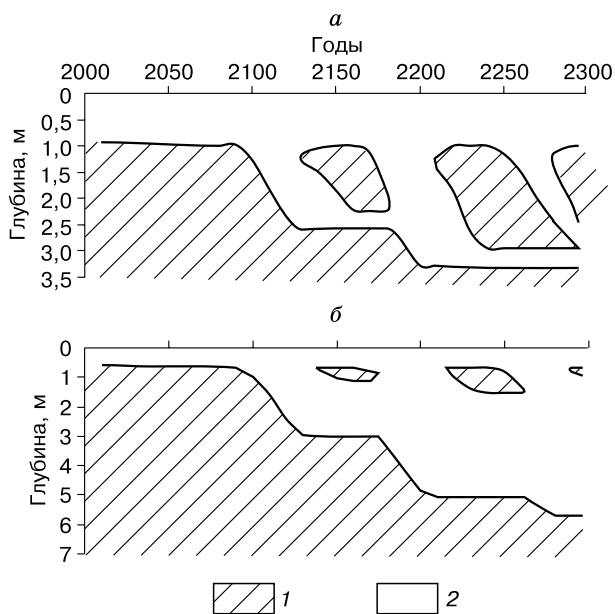


Рис. 5. Изменение во времени конфигурации мерзлых толщ на конец летнего периода:

а – район Воркуты; *б* – район Надыма; 1 – мерзлые породы, 2 – талые породы.

Из табл. 6 следует, что даже при самых больших коэффициентах запаса к 2090 г., когда при принятых сценариях прогнозируется разобщение слоя сезонного промерзания с многолетнемерзлой толщей, не остается надежды на сохранение существующей инфраструктуры в городах и поселках Европейского Севера и севера Западной Сибири. Аналогичные негативные явления можно ожидать и на транспортных магистралях. Так, при подземной прокладке магистральных трубопроводов в этих районах в случае транспортировки продукта с положительной среднегодовой температурой, когда вокруг трубопроводов, прокладываемых в ММП, формируется ореол оттаивания, размеры

Таблица 6. Снижение несущей способности вечномерзлого основания столбчатого фундамента сооружений, построенных по принципу I в районе Воркуты и Надыма

Год	Среднегодовая температура грунта, °С	Снижение несущей способности, %
<i>Воркута</i>		
1980	-1,26	0
2030	-0,52	33
2090	-0,17	56
<i>Надым</i>		
1980	-1,64	0
2030	-0,51	40
2090	-0,17	61

последнего при деградации ММП будут возрастать и приведут к дополнительной осадке труб, что может вызвать аварию трубопровода. Не менее серьезные последствия будут наблюдаться и при транспортировке продукта с отрицательной среднегодовой температурой. Такой режим транспортировки газа в настоящее время применяется на ряде магистральных трубопроводов на севере Западной Сибири (трассы Уренгой–Надым–Пунга, Ямбург–Елец и др.). В этом случае после начала многолетнего оттаивания грунтов с поверхности (2080–2090 гг.) вокруг трубопроводов начнется образование многолетних ореолов промерзания. В пучинистых грунтах, широко распространенных в указанных районах, начнется процесс многолетнего выпучивания подземных трубопроводов, что может привести к недопустимым деформациям труб и возникновению аварийных ситуаций.

Таким образом, для обеспечения устойчивости сооружений в условиях ожидаемых и вполне реальных климатических изменений, очевидно, нужны совершенно новые строительные технологии, в основу которых будет положен принцип управления тепловым и механическим взаимодействием инженерных объектов с основаниями в процессе эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная новая версия регрессионно-аналитической модели климата, учитывающей связи региональных температурных трендов с антропогенными и естественными климатическими факторами, позволила получить тренды региональной температуры воздуха на ближайшие столетия на Европейском Севере и севере Западной Сибири. Эти трендовые значения превышают температурные отметки самых теплых периодов за все время инструментальных наблюдений, однако в тысячелетнем масштабе времени не выходят за рамки естественной изменчивости климата региона. Тем не менее влияние потепления атмосферы в ближайшие столетия на тепловое состояние литосферы северных регионов чрезвычайно велико и, несомненно, приведет к значительному повышению температуры и сокращению мощности ММП.

Долгосрочный прогноз динамики мерзлотных условий на территории Европейского Севера (Воркута) и Западной Сибири (Надым), осуществленный с помощью математического моделирования процесса теплопередачи в грунтах на основе разработанных климатических сценариев, показал, что за время моделирования (296 лет) температура ММП на глубине ее нулевых годовых амплитуд повышается с $-1,26$ до 0 °С (Воркута) и с $-1,64$ до 0 °С (Надым). В обоих районах происходит отрыв слоя сезонного промерзания от многолетнемерзлой толщи и трансформация сезонного

протаивания в многолетнее. При этом процессы многолетнего оттаивания чередуются с процессами многолетнего промерзания оттаявшей толщи, следуя за периодами потепления и похолодания климата, однако многолетнее промерзание никогда не достигает границы оттаивания. Этим объясняется нулевое значение температуры ММП начиная с момента трансформации сезонного оттаивания в многолетнее. Интенсивность процесса деградации в Западной Сибири и на Европейском Севере примерно одинакова.

Наличие деградации ММП существенно сказывается на состоянии инфраструктуры северных регионов, приводя к ее преждевременному выходу из строя. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании инженерных сооружений на мерзлых грунтах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 05-02-08308, 07-08-00368).

Литература

- Величко А.А., Климанов В.А.** Климатические условия Северного полушария 5–6 тысяч лет назад // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1990, № 5, с. 38–52.
- Данные** суточного разрешения по температуре воздуха и количеству осадков. Обнинск, ВНИИГМИ–МЦД, 1999. (http://meteo.ru/data_temperat_precipitation/).
- Израэль Ю.А., Анохин Ю.А.** Сценарии и модели современных изменений климата на территории криолитозоны России // Проблемы криолитологии Земли: Тез. докл. конф. Пушино, 1998, с. 143–144.
- Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А.** Анализ современных и ожидаемых в будущем изменений климата и криолитозоны в северных регионах России // Метеорология и гидрология, 1999, № 3, с. 19–26.
- Клименко В.В., Клименко А.В., Андрейченко Т.Н. и др.** Энергия, природа и климат. М., МЭИ, 1997, 215 с.
- Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Сокращение выбросов малых парниковых газов как альтернатива снижению эмиссии углекислого газа. Ч. II // Теплоэнергетика, 2000, № 9, с. 43–46.
- Клименко В.В., Микушина О.В.** Изменение природно-климатической обстановки на севере России в первой половине XXI столетия // Энерг. политика, 2001, вып. 5, с. 35–42.
- Клименко В.В., Микушина О.В.** История и прогноз изменений климата в бассейне Карского и Баренцева морей // Геоэкология, 2005, № 1, с. 43–49.
- Павлов А.В., Гравис Г.Ф.** Вечная мерзлота и современный климат // Природа, 2000, № 4, с. 10–18.
- Программа** расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM / Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Хрусталева Л.Н., Яковлев С.В. Свидетельство № 940281. РосАПО, 1994.
- СНиП 2.02.01-83.** Основания зданий и сооружений. М., Стройиздат, 1985, 41 с.
- СНиП 2.01.07-85.** Нагрузки и воздействия. М., Стройиздат, 1986, 36 с.
- СНиП 2.02.04-88.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Стройиздат, 1990, 53 с.

TEMPOS – информационная база мониторинга климата. Обнинск, ВНИИГМИ–МЦД, 1992. (http://meteo.ru/data_b/).

Cress A., Schönwiese C.-D. Vulkanische Einflüsse auf die bodennahe und stratosphärische Lufttemperatur der Erde. Frankfurt, Instituts für Meteorol. und Geophys. der Univ. Frankfurt, 1994, No. 82, s. 215.

Groisman P. Ya. Possible regional consequences of the Pinatubo eruption: an empirical approach // Geophys. Res. Lett., 1992, vol. 19, No. 15, p. 1603–1606.

IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /

J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. (eds). Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2001, 881 p.

Mikushina O. V., Klimenko V. V., Dovgalyuk V. V. History and forecast of solar activity // Astronom. and Astrophys. Trans., 1997, vol. 12, No. 4, p. 315–326.

NOAA-NCDC. GHCN V2: Global Historical Climatological Network, vers. 2. Monthly temperature data sets. Asheville, North Carolina, USA, National Climatic Data Center, 2006. (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn-monthly/index.php>).

*Поступила в редакцию
4 сентября 2006 г.*