

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.340

**ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ЮЖНЫХ РАЙОНОВ КРИОЛИТОЗОНЫ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

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

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

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

Представлены результаты математического моделирования и прогнозирования динамики температурного поля многолетнемерзлых пород в южных районах криолитозоны при различных сценариях климатических изменений. Моделирование основано на совместном использовании региональной модели климата, учитывающей связи изменений температур с действием антропогенных и естественных климатических факторов, и модели теплового взаимодействия многолетнемерзлых грунтов с окружающей средой в условиях глобального изменения климата. Для прогноза динамики температурного поля пород использовались два сценария будущего антропогенного воздействия на атмосферу – МЭИ и IPCC B2. Расчеты показали, что при рассматриваемых сценариях изменения климата происходит многолетнее оттаивание маломощных островов многолетнемерзлых пород. Полное оттаивание прогнозируется к 2120–2180 гг.

Изменения климата, математическое моделирование, геокриологический прогноз, динамика температурного режима толщ многолетнемерзлых пород

**DYNAMICS OF PERMAFROST TEMPERATURE IN SOUTHERN REGIONS
OF CRYOLITHOZONE UNDER DIFFERENT SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE**

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

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

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

The results of modeling and forecasting of the permafrost temperature field state on the southern border of the permafrost area are presented. Simulations have been processed using the regional climate model with anthropogenic and natural climate factors, combined with the model of thermal interactions of permafrost and atmosphere under the conditions of climate change. The detailed forecast of future air temperatures and permafrost parameters for the North-West of Russia is based on 2 scenarios of anthropogenic forcing (MPEI and IPCC B2). Calculations have shown that islands of permafrost thaw under considered scenarios of climate change. Full thawing is forecasted by 2120–2180 years.

Climate change, mathematical modeling, geocryological forecast, dynamics of permafrost temperature

ВВЕДЕНИЕ

Деградация вечной мерзлоты в настоящее время признана наиболее вероятным негативным проявлением наблюдающихся и ожидаемых в будущем изменений климата. Особенно актуальна эта проблема для нашей страны, где криолитозона занимает большую часть территории, на которой расположено огромное количество хозяйственных

объектов и проживает беспрецедентное для подобных условий количество населения. Значительное число научных работ посвящено анализу и прогнозированию динамики состояния многолетнемерзлых пород с использованием различных подходов. Базовой информацией для подобных исследований являются результаты моделирования измене-

ния основной климатической характеристики – температуры воздуха. Так, в работе [Анисимов, Белолуцкая, 2002] используются данные расчетов на зарубежных моделях общей циркуляции. В дополнение к работам [Фотиев, 2000; Павлов, 2001; Пармузин, Чепурнов, 2001; Демченко и др., 2002; Хрусталева и др., 2002] авторы настоящей статьи представляют результаты собственной модели промежуточной сложности. Для оценки будущих изменений криолитозоны в основном используется связь положения границ зоны вечной мерзлоты с различными температурными характеристиками – со среднегодовой температурой или так называемым индексом суровости. Авторы предлагают собственную методику прогнозирования состояния многолетнемерзлых пород (ММП), основанную на совместном применении региональной модели климата, учитывающей действие как антропогенных, так и естественных факторов, и модели тепловых взаимодействий вечномерзлого грунта с окружающей средой. Подобный подход был успешно использован в работе [Клименко и др., 2007] при расчете возможных изменений состояния грунтов в зоне сплошной мерзлоты (районы г. Воркута, Надым). Проведенное исследование показало перспективность предлагаемых методов, а полученные результаты свидетельствуют, что значительная деградация ММП в зоне сплошной мерзлоты возможна лишь в результате реализации самых экстремальных сценариев антропогенных изменений климата. Логическим продолжением подобных исследований является изучение реакции островной мерзлоты, в зоне распространения которой также расположены важные объекты. Настоящая статья представляет результаты моделирования динамики ММП в районах пос. Петрунь (европейский север России) и г. Сургут (Западная Сибирь) при различных сценариях климатических изменений в этих регионах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА

Для проведения модельных расчетов использовались два сценария антропогенного воздействия на атмосферу, которое выражается в форме радиационного форсинга – изменения суммарного теплового потока через верхнюю границу тропосферы, вызванного изменением химического состава атмосферы.

Сценарий МЭИ – стабилизация форсинга после 2100 г. на уровне 4,5 Вт/м². Это объясняется стабилизацией численности населения планеты на уровне 9 млрд человек (что соответствует последним оценкам ООН) и мирового энергопотребления – на уровне примерно 25 млрд т условного топлива с увеличением доли источников энергии, не связанных с выбросами парниковых газов, до 60 % к 2100 г. [Клименко, Терешин, 2005].

Сценарий IPCC B2 – стабилизация форсинга после 2100 г. на уровне 6 Вт/м². Этот сценарий, который условно можно назвать наиболее вероятным из всего спектра, представленного в [Climate..., 2001], основывается на предположении о росте численности населения Земли до 10,5 млрд человек и мирового потребления энергии до 50 млрд т условного топлива к 2100 г. (это почти в 2 раза больше предусмотренного сценарием МЭИ), из которых примерно половина не связана с выбросом CO₂.

Как и в предыдущей работе [Клименко и др., 2007], воздействие естественных климатических факторов (солнечная и вулканическая активность, изменение скорости вращения Земли, океанические процессы) определялось соответствующими индексами (числа Вольфа, индекс кислотности, изменение продолжительности земных суток, индекс североатлантического колебания), экстраполяция временных рядов которых на период до

Таблица 1. Характеристики исследуемых регионов

Регион	Координаты границ региона	Разрез-представитель региона	Общее число метеостанций в регионе	Длиннорядные станции: наименование (период наблюдений)
Северо-восток европейской территории России	58–74° с.ш., 52–68° в.д.	пос. Петрунь	21	Мал. Кармакулы (1891–2006), Нарьян-Мар (1900–2006), Салехард (1886–2006), Усть-Цильма (1889–1994), Березово (1886–1995), Троицко-Печорское (1891–2006), Октябрьское (1895–1996), Чердынь (1890–2006), Бисер (1888–2006), Верхотурье (1890–1996), Пермь (1886–1995)
Северо-запад Сибири	60–70° с.ш., 60–90° в.д.	г. Сургут	28	Ханты-Мансийск (1897–1996), Дудинка (1906–1996), Туруханск (1886–2006), Сургут (1891–2006), Березово (1886–1995), Октябрьское (1895–1996)

2300 г. осуществлялась с помощью гармонической модели с периодами, выделенными в исторических рядах этих геофизических параметров.

Влияние глобальных факторов на изменения средней годовой и сезонной температуры в исследуемых регионах оценивалось, как и в предыдущей работе [Клименко и др., 2007], с помощью регрессионно-аналитической модели климата (РАМК), разработанной в МЭИ. В этой модели коэффициенты чувствительности региональных температур к различным факторам находятся методом многофакторной регрессии, где в качестве регрессоров используются индексы естественных климатических факторов (изменение продолжительности земных суток, индекс североатлантического колебания) и отклики глобальной энергобалансовой модели на изменения антропогенного и вулканического радиационных форсингов.

В данной работе климатические изменения исследовались в нескольких регионах северо-востока европейской части России и севера Западной Сибири, географическое положение которых описано в табл. 1. На их территории расположено несколько длиннорядных (с продолжительностью ряда наблюдений в 120 лет и более) метеорологических станций (Архангельск, Малые Кармакулы, Салехард и др.), по остальным станциям информация охватывает меньшие промежутки времени [NCAR, 2006; NCDC, 2006].

Для пространственного осреднения станционных данных по территории исследуемых регионов использовался метод Дирихле, который создает разбиение области на непересекающиеся полигоны. Осредненные климатические показатели (региональные среднегодовые и среднесезонные температурные аномалии) 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 влиянием глобальных климатических факторов, описанных выше. Кроме того, из этих рядов были 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 максимальных чисел Вольфа, характеризующих солнечную активность, с изменениями региональных температур.

Далее на основе полученных температурных трендов для указанных в табл. 1 регионов были построены экстраполяции до 2300 г. среднегодовых температурных аномалий для двух конкретных географических пунктов: пос. Петрунь и г. Сургут. Они приведены на рис. 1, а, б. Среднегодовая температура воздуха за период 1951–1980 гг. по метеостанции г. Сургут составляет $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, по метеостанции пос. Петрунь равна $-4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1, а показан полученный с помощью модели РАМК тренд изменения сглаженных среднегодовых температурных аномалий за три столетия для Западно-Сибирского региона по сценариям МЭИ и ИРСС. Как видно на рисунке, после 2000 г. продолжается интенсивный рост среднегодовых температур, начавшийся после 1970 г. По сценарию МЭИ среднегодовые температурные

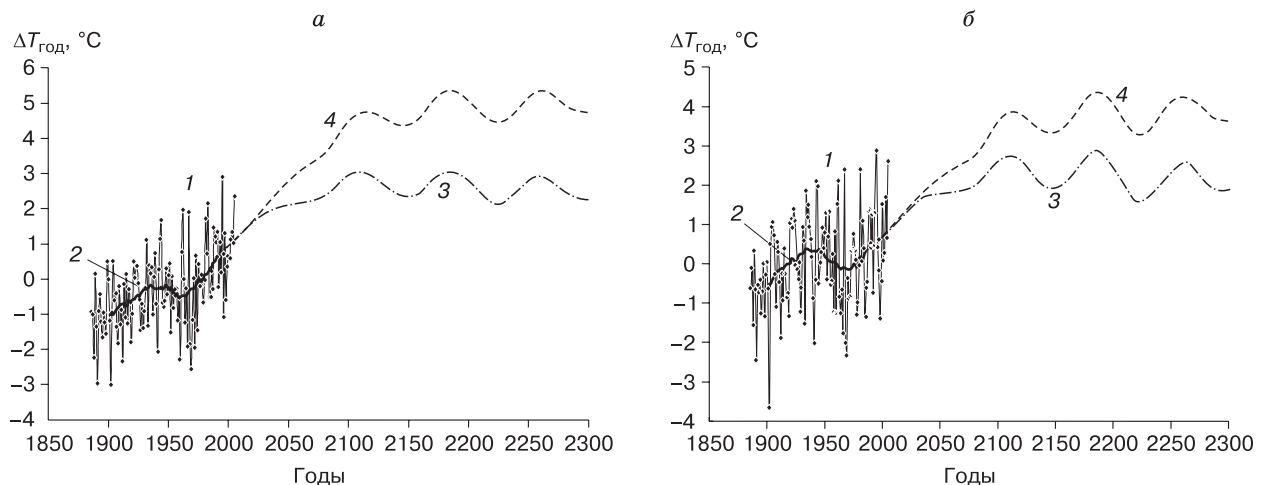


Рис. 1. Изменение средней годовой температуры воздуха в районе г. Сургут (а) и пос. Петрунь (б) (в отклонениях от среднего значения за 1951–1980 гг.):

1, 2 – данные инструментальных наблюдений (1 – ежегодные, 2 – сглаженные 10-летним скользящим средним); 3, 4 – данные модельных расчетов по сценариям МЭИ и ИРСС соответственно.

аномалии уже к 2030 г. достигают $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с климатической нормой 1951–1980 гг. Это означает, что 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 факторов (в основном североатлантического колебания и скорости вращения Земли) со значительной ролью последних. Те же естественные факторы вместе с ожидаемым существенным снижением уровня солнечной активности должны, на наш взгляд, привести к достаточно продолжительной фазе небольшого относительно похолодания в середине нынешнего столетия, которая сменится новым, еще более существенным потеплением в конце XXI в. Мы оцениваем величину максимального потепления к концу столетия в $2,0\text{--}2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 [Клименко, 2001]. Ход среднегодовых температур при реализации сценария IPCC качественно схож с описанным выше, однако после 2050 г. значения температурных аномалий в районе Сургута будут выше в 1,5–2,0 раза, чем по сценарию МЭИ.

Примерно такие же результаты дают расчеты на модели для района пос. Петрунь (см. рис. 1, б). Все различия вызваны несколько более низкой чувствительностью климата этой территории по сравнению с более континентальным западносибирским регионом, что проявляется в меньшем росте среднегодовых температур, максимальные аномалии которых (по сравнению с серединой XX в.) не превысят $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сценарию МЭИ и $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сценарию IPCC B2.

Таким образом, согласно умеренному сценарию МЭИ, в течение всего ближайшего столетия среднегодовые температуры в исследованных регионах еще будут находиться в пределах естественной изменчивости в тысячелетнем масштабе времени. В случае осуществления более жесткого варианта развития антропогенного воздействия на атмосферу эти границы будут преодолены уже во второй половине текущего столетия. 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 проявится 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 в обоих регионах во многом напоминает среднегодовой тренд, однако темп их роста в течение ближайших 100 лет будет выше, а фаза относительного зимнего похолодания в середине текущего столетия сильнее выражена за счет более высокой чувствительности средних зимних температур к изменению антропогенного форсинга и скорости вращения Земли. Так, по сценарию МЭИ максимум зимних температур в Сургуте превысит норму 1951–1980 гг. более чем на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, в Петруни – почти на $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по сценарию IPCC B2 – на 7 и $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно).

Средние летние и осенние температуры обнаружили сравнительно невысокую чувствительность ко всем рассмотренным здесь климатическим факторам, тем не менее, к концу текущего столетия по сценарию МЭИ ожидается повышение средней температуры лета в районе Петруни примерно на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в районе Сургута – даже на $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (по сценарию IPCC – на 1,5 и $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно), что хорошо согласуется с данными палеореконструкций для наиболее теплых периодов голоцена [Клименко, 2001].

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Расчеты температурных полей в грунте производились на ЭВМ по программе “Тепло” [Программа..., 1994] для указанных районов. Эти районы расположены в области островного распространения высокотемпературных маломощных многолетнемерзлых пород. Среднегодовая температура пород близка к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мощность многолетнемерзлой толщи колеблется в пределах 11–15 м. Для каждого района разработан сценарий изменения температуры воздуха по сезонам года (с 2000 по 2296 г.) на основе базового ряда в 30 лет (с 1951 по 1980 г.). Кроме того, при расчете динамики многолетнемерзлых толщ использовался известный международный сценарий изменения климата – IPCC B2. Эти данные были осреднены за каждый 10-летний период и послужили основой для получения прогнозных значений температуры воздуха, принятой в расчет. Анализ климатических данных для различных периодов глобальных потеплений (современного, средневекового, атлантического) показывает, что для района пос. Петрунь повышение среднегодовой температуры на $2\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к увеличению количества осадков на 50–75 мм, в то время как в районе г. Сургут такой зависимости не отмечается. Кроме того, есть свидетельства, что увеличение количества осадков, скорее всего, относится к теплому периоду года. В связи с этим мощность снежных отложений и теплофизические характеристики напочвенного растительного покрова принимались неизменными.

Таблица 2. Геологические, геокриологические и теплофизические характеристики пород, использованные при моделировании температурных полей в районе пос. Петрунь и г. Сургут

Название грунта	Интервал глубин, м	$H_{\text{ММП}}$, м	q , Вт/м ²	T_0 , °С (h_0 , м)	ξ , м	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)		Объемная теплоемкость, Вт·ч/(м ³ ·°С)		Весовая влажность, д. е.	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 в районе пос. Петрунь</i>												
Торф	0–2	15,00	0,052	–0,2 (7,5)	0,47	0,69	1,16	986	580	2,08	0,3	58 000
Суглинок валунный	2–110					1,86	2,16	882	661	0,17	1,6	25 334
<i>Для разреза в районе г. Сургут</i>												
Торф	0–4	11,64	0,033	–0,1 (7,5)	0,61	0,93	1,39	1044	754	1,50	0,4	55 680
Суглинок	4–110					1,57	1,68	928	650	0,35	1,4	45 472

Примечание. $H_{\text{ММП}}$ – глубина залегания подошвы многолетнемерзлых грунтов, считая от дневной поверхности; q – плотность теплового потока на нижней границе многолетнемерзлых пород; T_0 – среднегодовая температура грунта на глубине (h_0) ее нулевых амплитуд; ξ – максимальная глубина сезонного оттаивания грунта (на 1 сентября).

ми в течение периода прогноза и соответствовали их среднемуголетним значениям за 30 лет до начала прогноза.

Математическое моделирование осуществлялось для конкретного геологического разреза-представителя. Задача ставилась как линейная. На нижней границе расчетной области, размеры которой превышают мощность ММП в 7,3 раза (пос. Петрунь) и 9,4 раза (г. Сургут), задавалось граничное условие II рода с постоянным во времени значением теплопотока, соответствующего теплопотоку из недр земли в данном районе. Численные значения теплопотока равны 0,052 Вт/м² (пос. Петрунь) и 0,033 Вт/м² (г. Сургут).

Геологический разрез-представитель для района пос. Петрунь представлен до глубины 2 м торфом, ниже до глубины 110 м – валунными суглинками, а для района г. Сургут – торфом до глубины 4 м и суглинками ниже до глубины 110 м. Описание разреза и теплофизические характеристики грунта приведены в табл. 2 (графы 1, 2, 7–13). В графе 3 указана начальная мощность мерзлой толщи, 4 – величина теплопотока из недр земли, 5 – среднегодовая температура ММП на глубине нулевых годовых теплооборотов, в графе 6 – максимальная глубина сезонного оттаивания, полученная на начальный момент времени. Данные о теплофизических свойствах пород заимствованы из СНиП 2.02.04-88 “Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах” [1990] при известной влажности и плотности пород и присвоены расчетным блокам, которые моделировали грунтовый разрез.

На верхней границе расчетной области задается граничное условие III рода с переменными во времени температурой воздуха и коэффициентом

теплообмена (величина, обратная термическому сопротивлению). При этом температура воздуха задавалась в виде своих среднесезонных значений (зима, весна, лето, осень), осредненных за 10 лет. Сезонные значения температуры воздуха меняются каждые 10 лет в соответствии с принятым сценарием климатического потепления.

Кроме граничных условий для осуществления математического моделирования задавались также начальные условия. Методика их назначения 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. 3).

Начальными условиями для этой специальной задачи служило линейное распределение температуры грунта в массиве, определяемое положением нижней границы ММП и температурой грунтов на глубине нулевых годовых теплооборотов, снимаемых с геокриологической карты. Начальное распределение температур соответствует кривой распределения температур по глубине на 1 сентября 2000 г., показанной на рис. 2.

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

Проведенные расчеты показывают, что при климатическом сценарии МЭИ происходит деградация ММП как в районе пос. Петрунь, так и в районе г. Сургут. Деградация выражается в повышении температуры пород по всей глубине рас-

Таблица 3. Верхние граничные условия III рода при моделировании температурного режима грунтов

Параметр	Зима		Весна			Лето			Осень			Зима
	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>В районе г. Сургут</i>												
$T_{1951-1980}$, °C	-20,5	-20,5	-3,6	-3,6	-3,6	14,9	14,9	14,9	-2,3	-2,3	-2,3	-20,5
h_s , м	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	-	-	-	0,20	0,20	0,20	0,20
λ_s , Вт/(м·°C)	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	-	-	-	0,22	0,22	0,22	0,22
R_s , м ² ·°C/Вт	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	-	-	-	0,92	0,92	0,92	0,92
R_p , м ² ·°C/Вт	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,52	0,52	0,52	0,26	0,26	0,26	0,26
α , Вт/(м ² ·°C)	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,92	0,92	0,92	0,85	0,85	0,73	0,73
<i>В районе пос. Петрунь</i>												
$T_{1951-1980}$, °C	-18,4	-18,4	-7,3	-7,3	-7,3	11,1	11,1	11,1	-3,0	-3,0	-3,0	-18,4
h_s , м	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	-	-	-	0,5	0,5	0,5	0,5
λ_s , Вт/(м·°C)	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	-	-	-	0,35	0,35	0,35	0,35
R_s , м ² ·°C/Вт	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	-	-	-	1,43	1,43	1,43	1,43
R_p , м ² ·°C/Вт	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,46	0,46	0,46	0,22	0,22	0,22	0,22
α , Вт/(м ² ·°C)	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	1,63	1,63	1,63	0,60	0,60	0,60	0,60

Примечание. $T_{1951-1980}$ – среднемесячные значения температуры воздуха; h_s , λ_s – мощность и коэффициент теплопроводности снежного покрова; R_s , R_p – термическое сопротивление снега и мха соответственно; α – коэффициент теплообмена: летом $\alpha = 1/R_p$, зимой $\alpha = 1/(R_s + R_p)$, где $R_s = h_s/\lambda_s$.

смаатриваемой толщии, начиная с некоторого времени, в многолетнем оттаивании ММП.

При неустановившемся температурном режиме пород, которое отмечается при изменении климата, некорректно говорить о фиксированной глубине нулевых годовых амплитуд, поскольку эта глубина из года в год будет меняться в соответствии с изменениями температуры воздуха. При анализе динамики температурного режима ММП принято постоянное значение этой глубины, соответствующее глубине годовых теплооборотов в начальный момент времени, полученной при постоянных значениях среднемесячных температур наружного воздуха и коэффициентов теплообмена, осредненных за ближайшие 30 лет, предшествующих рубежному году. Для районов пос. Петрунь и г. Сургут эта глубина составляет 7,5 м. За время моделирования (296 лет) температура пород на этой глубине повышается в районе пос. Петрунь от -0,2 до +1,2 °C, в районе г. Сургут – от -0,1 до +1,9 °C. На рис. 2, а, б приведено распределение температуры пород по глубине для этих случаев, полученное по климатическому сценарию МЭИ.

Начало многолетнего оттаивания пород при этом сценарии прогнозируется в районе пос. Петрунь к 2010 г., полностью многолетнемерзлая толща оттаит к 2180 г. Согласно результатам расчетов, начало многолетнего оттаивания мерзлых пород в

районе г. Сургут прогнозируется в конце 2010 г., полностью мерзлая толща оттаит к концу 2170 г.

Повышение температуры грунта, обусловленное потеплением климата, приводит к перераспределению теплотока, 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 в районе пос. Петрунь на 3,2 м, в районе г. Сургут на 1,1 м. Бульшие мощности оттаивания нижнего горизонта ММП в районе пос. Петрунь объясняются, с одной стороны, теплофизическими свойствами пород – большими значениями коэффициента теплопроводности и меньшими затратами тепла на фазовые переходы в валунных суглинках, с другой – большими значениями фонового теплотока, поступающего из недр в этом районе.

Сценарий изменения климата IPCC B2 по сравнению с МЭИ предполагает более существенное повышение температур воздуха в будущем.

При оценке динамики геокриологических условий с использованием климатического сценария IPCC B2 геологический разрез, теплофизические свойства пород, начальные условия для районов пос. Петрунь и г. Сургут принимались аналогичными описанным выше (см. табл. 2, 3). Прогноз

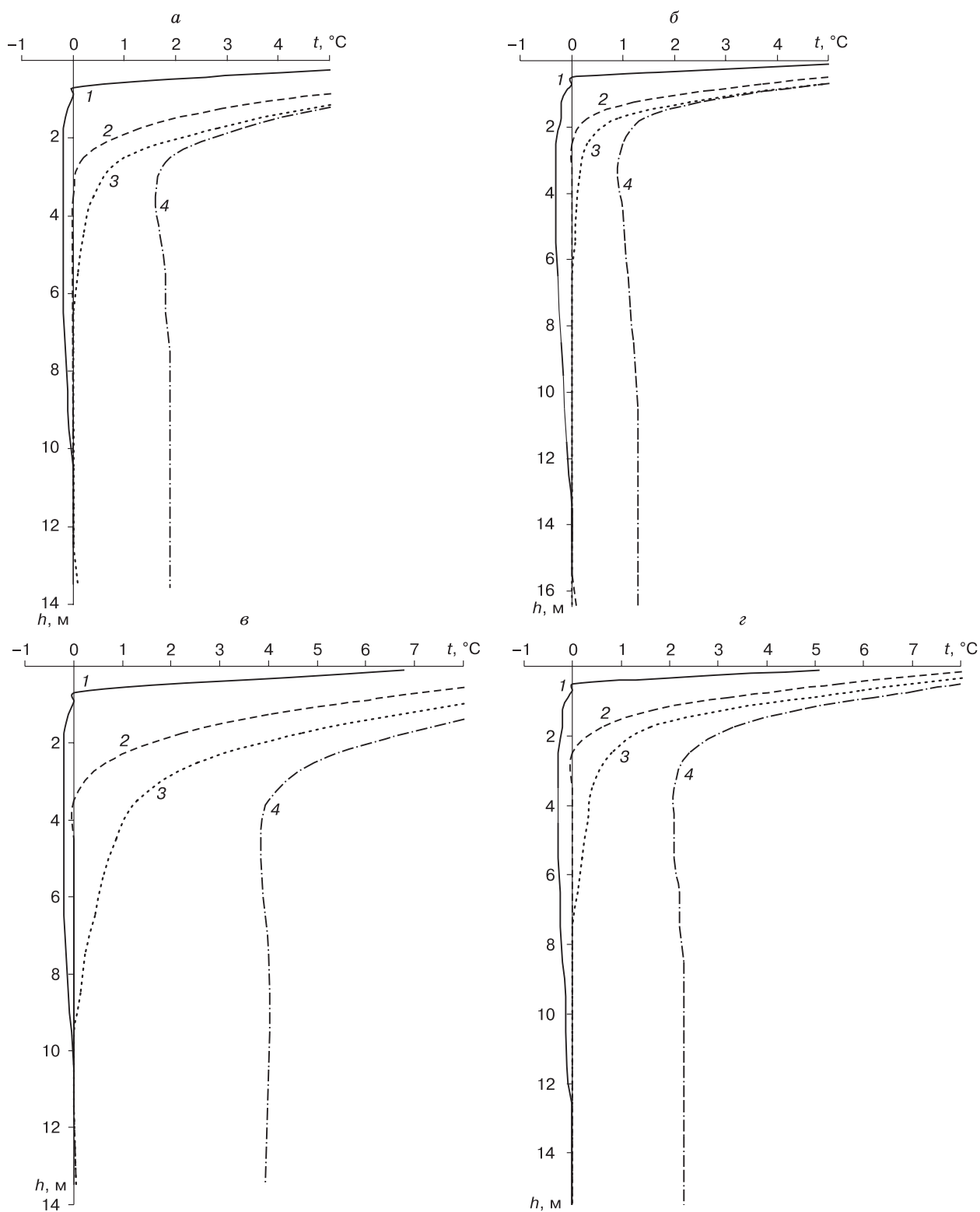


Рис. 2. Распределение температуры пород по глубине на 1 сентября с 2000 по 2296 г.

1–4 – температуры пород на соответствующий год (1 – 2000 г., 2 – 2049 г., 3 – 2099 г., 4 – 2296 г.); а, в – район г. Сургут; б, г – район пос. Петрунь; а, б – климатический сценарий МЭИ; в, г – климатический сценарий IPCC.

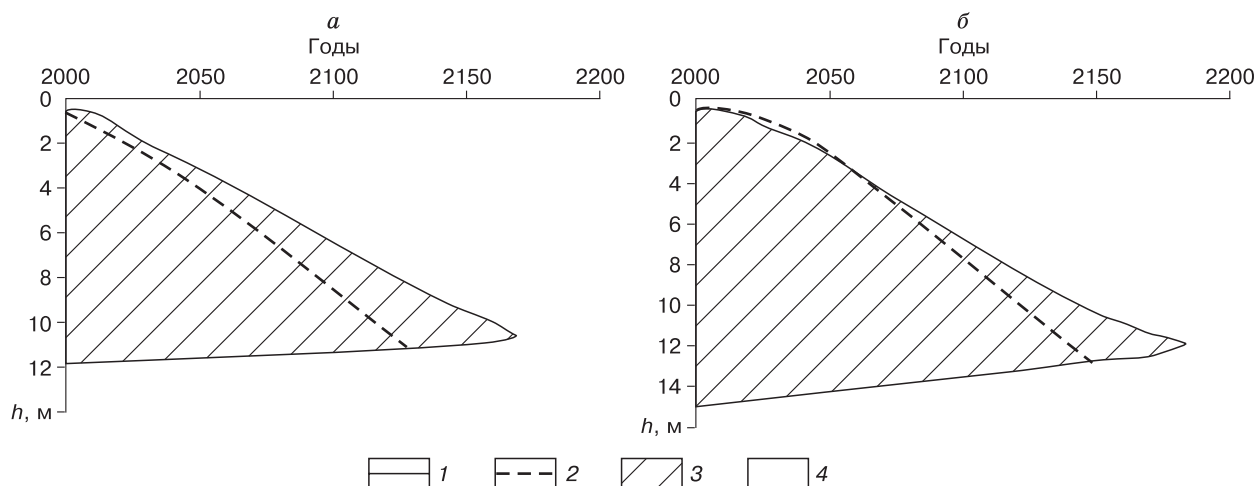


Рис. 3. Динамика многолетнего оттаивания пород в районе г. Сургут (а) и пос. Петрунь (б):

1 – климатический сценарий МЭИ; 2 – климатический сценарий IPCC; 3 – многолетнемерзлые породы; 4 – талые породы.

ные расчеты проводились по вышеизложенной методике. При прогнозе использовались осредненные по десятилетним значениям средние сезонные и годовые изменения температуры воздуха по этому сценарию.

Результаты прогнозных расчетов показывают, что при климатическом сценарии IPCC B2, так же как и при сценарии МЭИ, в указанных районах происходит деградация многолетнемерзлых толщ и начиная с некоторого времени мерзлые породы полностью оттаивают. Поскольку по климатическому сценарию IPCC B2 повышение температур воздуха в будущем происходит более интенсивно, температура пород на фиксированной глубине 7,5 м, принятой для обоих районов, также повышается более интенсивно. За время моделирования (296 лет) в районе пос. Петрунь температура пород на этой глубине повысится с $-0,2$ до $+2,2$ °С, в районе г. Сургут с $-0,1$ до $+4,0$ °С. Прогнозируемое распределение температур пород по глубине для этих пунктов в отдельные периоды времени представлено на рис. 2, в, г.

Начало многолетнего оттаивания пород при сценарии IPCC B2 прогнозируется в районах пос. Петрунь и г. Сургут к середине этого десятилетия. По результатам расчетов полностью многолетнемерзлая толща оттаивает в районе пос. Петрунь к 2145 г., в районе г. Сургут – к концу 2120 г. Динамика многолетнего оттаивания толщ мерзлых пород для этих районов, прогнозируемая по климатическим сценариям МЭИ и IPCC B2, приведена на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Долгосрочный прогноз динамики мерзлотных условий проведен для территории Европейского

Севера (район пос. Петрунь) и Западной Сибири (район г. Сургут). Эти районы расположены в южной геокриологической зоне и характеризуются островным и редкоостровным распространением многолетнемерзлых пород со среднегодовой температурой $-0,1...-0,3$ °С. Острова ММП приурочены преимущественно к торфяникам. Мощность их не превышает 11–15 м.

Прогноз осуществлен с помощью математического моделирования процесса теплопередачи в грунтах по разработанной на кафедре геокриологии МГУ программе “Тепло”. Для каждого района МЭИ разработан свой сценарий естественно-исторического и антропогенного изменения температуры воздуха, который принимался в расчет. Кроме того, в качестве верхних граничных условий использован сценарий IPCC B2, который предполагает более существенное повышение температур воздуха в будущем. Моделирование проводилось с 2000 по 2296 г.

В результате установлено, что при принятых климатических сценариях в районах пос. Петрунь и г. Сургут в будущем произойдет деградация мерзлых толщ. Она выражается в повышении температуры пород по всей глубине рассматриваемой толщи, и начиная с некоторого времени мерзлые породы полностью оттаивают. При использовании в качестве верхних граничных условий климатического сценария МЭИ в районе пос. Петрунь начало многолетнего оттаивания пород прогнозируется к 2010 г., полностью многолетнемерзлая толща оттаивает к 2180 г. В районе г. Сургут, согласно результатам расчетов, начало многолетнего оттаивания мерзлых пород прогнозируется в конце 2010 г., полностью мерзлая толща оттаивает к концу 2170 г.

Поскольку по климатическому сценарию ИРСС В2 повышение температуры воздуха в будущем происходит более интенсивно, температура пород также повышается более интенсивно. Начало многолетнего оттаивания мерзлых пород в районах пос. Петрунь и г. Сургут прогнозируется уже в середине этого десятилетия. Согласно результатам расчетов, полностью многолетнемерзлая толща оттаивает в районе пос. Петрунь к 2145 г., в районе г. Сургут – к концу 2100 г.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки динамики геокриологических условий территории европейского севера России и Западной Сибири, расположенных в области островного распространения ММП.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-08-00368).

Литература

Анисимов О.А., Белолуцкая М.А. Оценка влияния изменения климата и деградации вечной мерзлоты на инфраструктуру в северных регионах России // Метеорология и гидрология, 2002, № 6, с. 15–22.

Демченко П.Ф., Величко А.А., Елисеев А.В. и др. Зависимость условий распространения вечной мерзлоты от уровня глобального потепления: сравнение моделей, сценариев и данных палеорекоkonструкций // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2002, т. 38, № 2, с. 165–174.

Клименко В.В. Климат средневековой теплой эпохи в Северном полушарии. М., Изд-во МЭИ, 2001, 88 с.

Клименко В.В., Терешин А.Г. Мировая энергетика и глобальный климат в XXI веке в контексте исторических тенденций // Теплоэнергетика, 2005, № 4, с. 3–7.

Клименко В.В., Хрусталеv Л.Н., Микушина О.В. и др. Изменения климата и динамика толщ многолетнемерзлых пород на северо-западе России в ближайшие 300 лет // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 3, с. 3–13.

Павлов А.В. Реакция криолитозоны на современные и ожидаемые в XXI веке климатические изменения // Разведка и охрана недр, 2001, № 5, с. 8–14.

Пармузин С.Ю., Чепурнов А.Б. Прогноз динамики многолетнемерзлых пород европейского севера России и Западной Сибири в XXI веке // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология, 2001, № 4, с. 64–68.

Программа расчета теплового взаимодействия инженерных сооружений с вечномерзлыми грунтами WARM: Свидетельство № 940281 / Емельянов Н.В., Пустовойт Г.П., Хрусталеv Л.Н., Яковлев С.В.; опубл. РосАПО, 1994.

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Стройиздат, 1990, 53 с.

Фотиев С.М. Возможные изменения геотемпературного поля криогенной области России при глобальном потеплении климата // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 3, с. 14–29.

Хрусталеv Л.Н., Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И. Прогноз среднегодовой температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия) по результатам ретроспективного анализа // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 2, с. 66–74.

Climate Change 2001: The Scientific Basis / Ed. by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2001, 881 p.

NCAR. World Monthly Surface Station Climatology. Boulder, Colorado, USA, Natl. Center for Atmospheric Res., 2006. (<http://dss.usar.tdu/gatasets/ds570.0>).

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

Поступила в редакцию
26 июля 2007 г.