

СОВРЕМЕННЫЕ И БУДУЩИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ: СИНТЕЗ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.А.АНИСИМОВ

Государственный гидрологический институт

Предложен новый метод ансамблевых расчетов основных параметров состояния вечной мерзлоты. С использованием равновесной модели дан прогноз глубины сезонного таяния для современного и прогнозируемого на середину XXI века климата. Обсуждается точность расчетов по модели, приводится сравнение с данными наблюдений на шести площадках в различных геоэкологических зонах. Оцениваются неопределенности результатов расчетов зональных характеристик вечной мерзлоты, связанные с использованием четырех различных архивов климатических данных. Дается прогноз изменения глубины сезонного таяния для криолитозоны России.

Одним из важных природных последствий потепления является его воздействие на вечную мерзлоту. Увеличение температуры ее верхнего слоя за последние 30 лет в центральной Якутии достигало 1,5 °С; на севере Западной Сибири оно было в пределах 1,0 °С [7, 18]. За пределами России изменения термического режима криолитозоны еще более значительны. Наибольшим было потепление на севере Аляски, где с начала XX столетия до 1980-х гг. температура верхнего горизонта мерзлых пород увеличилась на 2-4 °С [25, 31], а в последующие 20 лет до 2002 г. еще в среднем на 3 °С [29]. На северо-западе Канады верхний слой вечной мерзлоты за последние два десятилетия стал теплее на 2 °С [26].

Современные математические модели вечной мерзлоты, сценарии изменения климата, созданные в последние годы базы данных, необходимые для проведения расчетов, позволяют дать прогноз изменения состояния и площади распространения многолетнемерзлых грунтов в последующие несколько десятилетий. В ряде исследований были получены такие прогнозы с использованием моделей различного уровня сложности [1, 8, 10, 11, 16] и на основании модельных расчетов построены геоэкологические карты отдельных участков криолитозоны [32, 34], территории России [2, 3, 5, 9, 13-15, 18, 19, 27, 30] и всего Северного полушария [4, 6, 7, 21, 22] для нескольких модельных прогнозов изменения климата.

Между тем реальная картина предстоящих изменений вечной мерзлоты может заметно отличаться от прогнозов за счет влияния снежного покрова, гидрологических и почвенных факторов и растительности. Существующие модели вечной мерзлоты упрощенно учитывают влияние перечисленных выше факторов. Серьезной проблемой является то, что они обладают значительной пространственной изменчивостью даже на относительно небольших расстояниях, которую модели вечной мерзлоты не учитывают. По этой причине вопрос о воспроизведении моделями вечной мерзлоты данных измерений остается во многом открытым.

Данные наблюдений за динамикой вечной мерзлоты в различных физико-географических зонах появились лишь в относительно недавнее время. В начале 1990-х гг. была организована международная программа CALM по циркумполярному мониторингу вечной мерзлоты [23]. Эта программа предусматривала

организацию стандартных наблюдательных площадок размером 1×1 км, на которых через каждые 100 метров ежегодно проводятся измерения максимальной глубины сезонного протаивания (погружением ручного щупа до упора его в мерзлый грунт). В совокупности наблюдения дают статистический ансамбль из 121 измерения на каждой площадке. В настоящее время имеется более 140 таких площадок в 7 странах, в том числе более 20 площадок в России. Продолжительность наблюдений на площадках составляет от 1–2 до 10 лет. Методика и результаты ежегодно обновляемых измерений доступны через интернет на странице проекта CALM, <http://www.udel.edu/geography/calm/>.

Целями данной работы были построение расчетного алгоритма, который адекватно учитывает естественную пространственную изменчивость параметров, влияющих на вечную мерзлоту; оценка точности модельного воспроизведения современной динамики вечной мерзлоты путем сравнения с данными наблюдений на ряде площадок CALM как по средним величинам, так и по статистике основных параметров; настройка внутренних параметров модели на наилучшее воспроизведение данных наблюдений за вечной мерзлотой и построение вероятностного прогноза изменения глубины сезонного таяния на основе ансамблевых расчетов. За основу была принята стационарная модель вечной мерзлоты промежуточной сложности, впервые предложенная В.А.Кудрявцевым [12]. Алгоритм расчета температуры и глубины протаивания многолетнемерзлых пород был доработан с тем, чтобы явно учесть многослойность среды и наличие верхнего органического горизонта почвы, теплофизические характеристики которого значительно отличаются от нижележащего минерального грунта. В расчетах был применен ансамблевый подход, что позволило учесть естественную пространственную изменчивость основных влияющих параметров.

Расчет температуры грунта осуществляется в несколько этапов, при этом последовательно учитывается влияние снежного покрова, растительности и температурной сдвижки, обусловленной различием коэффициентов теплопроводности талого и мерзлого грунта:

$$\begin{aligned} T_{\text{п}} &= T_{\text{в}} + \Delta T_{\text{сн}} + \Delta T_{\text{р}}, \\ A_{\text{п}} &= A_{\text{в}} - \Delta A_{\text{сн}} - \Delta A_{\text{р}}. \end{aligned} \quad (1)$$

В этих выражениях $T_{\text{п}}$, $A_{\text{п}}$ – средняя годовая температура и ее амплитуда на поверхности почвы, $\Delta T_{\text{сн}}$, $\Delta A_{\text{сн}}$ и $\Delta T_{\text{р}}$, $\Delta A_{\text{р}}$ – поправки, учитывающие влияние снежного покрова и растительности. Величина поправок на отепляющее влияние снежного покрова рассчитывается по следующим формулам [12]:

$$\begin{aligned} \Delta A_{\text{сн}} &= A_{\text{в}} \left(1 - \exp \left(-Z_{\text{сн}} \left(\frac{\pi \cdot c_{\text{сн}} \cdot \rho_{\text{сн}}}{P \cdot \lambda_{\text{сн}}} \right) \right)^{1/2} \right), \\ \Delta T_{\text{сн}} &= A_{\text{в}} \left(1 - \exp \left(-Z_{\text{сн}} \left(\frac{\pi \cdot c_{\text{сн}} \cdot \rho_{\text{сн}}}{P \cdot \lambda_{\text{сн}}} \right) \right)^{1/2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

В этих соотношениях $Z_{\text{сн}}$ – средняя за зиму высота снега, $c_{\text{сн}}$, $\rho_{\text{сн}}$ и $\lambda_{\text{сн}}$ – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности снега, P – продолжительность года в секундах.

Средняя высота снега рассчитывается через зимние осадки в каждом месяце по следующей формуле:

$$Z_{\text{сн}} = \sin^2 \phi \frac{1}{k} \left\{ \sum_{i=1}^k h_i (k - (i - 1)) \right\}. \quad (3)$$

Здесь k – число зимних месяцев, h_i – сумма снежных осадков в месяце с номером i , ϕ – географическая широта. Тригонометрический множитель учитывает уменьшение высоты снега за счет зимних оттепелей, влияние которых возрастает при уменьшении широты.

Для учета влияния растительного покрова на температуру почвы были использованы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta A_p &= \frac{\Delta A_1 \tau_1 + \Delta A_2 \tau_2}{P}, \\ \Delta T_p &= \frac{\Delta A_1 \tau_1 + \Delta A_2 \tau_2}{P} \cdot \frac{2}{\pi}. \end{aligned} \quad (4)$$

Поправки ΔA_1 и ΔA_2 определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \Delta A_1 &= (A_p - T_p) \left(1 - \exp \left(-Z_p \left(\frac{\pi}{K_p^- \cdot 2\tau_1} \right)^{1/2} \right) \right), \\ \Delta A_2 &= (A_p + T_p) \left(1 - \exp \left(-Z_p \left(\frac{\pi}{K_p^+ \cdot 2\tau_2} \right)^{1/2} \right) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

В этих формулах τ_1 и τ_2 – продолжительность холодного и теплого периодов, Z_p – высота растительности, K_p^- и K_p^+ – коэффициент теплопроводности растительности в холодный и теплый периоды года, T_p и A_p – средняя годовая температура и ее амплитуда на верхней границе растительного покрова, определяемые соотношениями:

$$\begin{aligned} T_p &= T_b + \Delta T_{\text{сн}}, \\ A_p &= A_b + \Delta A_{\text{сн}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Температура вечной мерзлоты под слоем сезонного протаивания отличается от температуры поверхности почвы на величину температурной сдвижки, для расчета ее величины было использовано полуэмпирическое уравнение:

$$T_m = \left(0,5T_n (\lambda_m + \lambda_t) + A_n \frac{\lambda_t - \lambda_m}{\pi} \left(\frac{T_n}{A_n} \arcsin \frac{T_n}{A_n} + \left(1 - \frac{T_n^2}{A_n^2} \right)^{1/2} \right) \right) (\lambda^*)^{-1}. \quad (7)$$

В этом уравнении λ_t и λ_m – коэффициенты теплопроводности талой и мерзлой почвы, $\lambda^* = \lambda_m$, если числитель меньше нуля, и $\lambda^* = \lambda_t$, если числитель больше нуля. И, наконец, глубина сезонного протаивания рассчитывалась с использованием уравнения, предложенного В.А.Кудрявцевым (1974):

$$Z = \frac{2(A_n - T_m) \cdot \left(\frac{\lambda P C}{\pi} \right)^{1/2} + \frac{(2A_m C Z_m + Q_\phi Z) Q_\phi \left(\frac{\lambda P}{\pi C} \right)^{1/2}}{2A_m C Z_m + Q_\phi Z + (2A_m C + Q_\phi) \left(\frac{\lambda P}{\pi C} \right)^{1/2}}{2A_m C + Q_\phi}. \quad (8)$$

В этом уравнении Q_ϕ – теплота фазовых переходов воды в единице объема почвы, A_m и Z_m определяются следующими уравнениями:

$$A_m = \frac{A_n - T_m}{\ln\left(\frac{A_n + Q_\phi/2C}{T_m + Q_\phi/2C}\right)} - \frac{Q_\phi}{2C}, \quad (9)$$

$$Z_m = \frac{2(A_n - T_m)\left(\frac{\lambda PC}{\pi}\right)^{1/2}}{2A_m C + Q_\phi}. \quad (10)$$

Соотношения (1)–(10) позволяют рассчитать температуру и глубину сезонного протаивания вечной мерзлоты. В качестве входных климатических данных используются среднемесячные поля температуры воздуха и осадков, заданные в узлах регулярной сетки $0,5^\circ$ по широте и долготе. В случае если расчет проводится для условий будущего климата, к современным средним месячным нормам прибавляются их ожидаемые приращения, определяемые сценарием изменения климата.

Для расчета теплофизических свойств почвы, снежного покрова и растительности использовались полуэмпирические формулы, полученные различными авторами путем обобщения данных измерений. Коэффициент теплопроводности минеральной почвы рассчитывался в зависимости от ее влажности и фазового состояния по следующей эмпирической формуле [17]:

$$\lambda_i = k_i (0,001 \cdot \rho_{\text{ск}} + 10 \cdot w_i / \rho_{\text{ск}} - 1,1) - 11,6 \cdot w_i / \rho_{\text{ск}}, \quad (11)$$

в которой $\rho_{\text{ск}}$ – плотность сухой почвы (скелета), $\text{кг}/\text{м}^3$; w_i – влажность (льдищность, в случае мерзлой почвы), выраженная в миллиметрах воды на метр почвы, $(\text{мм}/\text{м})$; k_i – эмпирический коэффициент, принимающий различные значения для мерзлой и талой почвы. Значения коэффициента k_i можно определить из табл. 1.

Таблица 1

Значения эмпирического коэффициента k для мерзлых и талых минеральных почв [Павлов, 1979]

	Песок	Супесь, суглинок	Глина
Мерзлая почва	1,95	1,75	1,60
Талая почва	1,75	1,60	1,50

Для расчета коэффициента теплопроводности органического слоя (торфа), λ ($\text{Вт}/\text{м}\times^\circ\text{C}$), использовались формулы, полученные в Государственном гидрологическом институте на основе обобщения экспедиционных данных по болотным почвам Западной Сибири:

$$\begin{aligned} \lambda_m &= 0,08 \cdot \exp(0,0038 \cdot w_m), \\ \lambda_t &= (0,615 \cdot w_t + 22,2) \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (12)$$

Объемный коэффициент теплоемкости всех типов почвы C_v ($\text{дж}/\text{м}^2\times^\circ\text{C}$) рассчитывался через удельную теплоемкость скелета $C_{\text{ск}}$ ($\text{дж}/\text{кг}\times^\circ\text{C}$), плотность скелета $\rho_{\text{ск}}$ ($\text{кг}/\text{м}^3$) и влажность w ($\text{мм}/\text{м}$) по следующим формулам:

$$\begin{aligned} C_{v,m} &= C_{\text{ск}} \cdot \rho_{\text{ск}} + 4180 \cdot w_n + 2090 \cdot (w_m - w_n), \\ C_{v,t} &= C_{\text{ск}} \cdot \rho_{\text{ск}} + 4180 \cdot w_t. \end{aligned} \quad (13)$$

В этих формулах w_m и w_t – льдищность и влажность почвы, w_n – незамерзшая влага ($\text{мм}/\text{м}$), 4180 и 2090 – удельная теплоемкость воды и льда, ($\text{Дж}/\text{кг}\times^\circ\text{C}$). Характерные значения теплофизических характеристик различных грунтов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характерные значения параметров грунтов

Характеристика	Песок	Супесь	Суглинок	Глина	Торф
$\rho_{ск}$, кг/м ³	1300	1400	1500	1500	200
$C_{ск}$, Дж/(кг×°С)	690	730	775	920	2000
w (min/max), мм/м	150/500	150/500	100/400	100/150	450/900
$\lambda_{м}$, Вт/(м×°С)	1,25/2,65	1,25/2,35	1,15/2,05	1,10/2,00	0,80/2,60
$\lambda_{т}$, Вт/(м×°С)	1,05/2,15	1,05/1,90	0,90/1,70	0,85/1,60	0,30/0,55
$w_{н}$, мм/м	1–5	5–10	10–15	15–20	0

Коэффициент теплопроводности и теплоемкость снежного покрова принимались равными: $\lambda_{сн} = 0,23$ Вт/(м×°С), $C_{сн} = 2090$ Дж/(кг×°С). В расчетах принималась во внимание лишь низшая растительность, состоящая из мохово-лишайникового покрова, теплофизические свойства которой близки к свойствам торфа.

Измерения показывают, что глубина сезонного протаивания обладает значительной пространственной изменчивостью даже на небольших расстояниях порядка нескольких метров и десятков метров. Это обусловлено локальными неоднородностями свойств почвы, растительности и рядом других факторов, явно учесть которые не представляется возможным. Для того чтобы наилучшим образом воспроизвести эти условия в модели, использовался метод ансамблевого осреднения. Суть этого метода состоит в том, что в каждой ячейке пространственной сетки для одних и тех же климатических условий проводится несколько расчетов с различными комбинациями значений параметров, описывающих свойства снежного покрова, растительности и почвы. В данной работе в каждой точке проводилось 36 расчетов, которые в совокупности составляли статистический ансамбль. В расчетах варьировались высота снежного покрова (ей придавалось 3 значения, равные расчетной норме, половине нормы и удвоенной норме, что позволяло имитировать неоднородность снега за счет ветрового переноса и рельефа), высота низшего слоя приземной мохово-лишайниковой растительности (2 значения, 5 и 10 см), толщина верхнего органического горизонта почвы принимала 3 значения, 5 см, 10 см и 20 см, и влажность почвы принимала два значения, 200 мм/м и 300 мм/м. Набранная статистика сравнивалась с результатами измерений, при этом свидетельством высокой точности модели являлось то, что в случае если влияющие параметры принимают значения в пределах диапазона их изменений на данном контрольном участке, на выходе расчета получаются значения глубины протаивания, укладывающиеся в полученный по 121 измерению диапазон ее изменений на данной площадке.

На рис. 1 приведены графики сравнения результатов модельных расчетов глубины сезонного протаивания в период 1994–2006 гг. с наблюдениями на 6 площадках, расположенных в Западной Сибири, Якутии и на Дальнем Востоке: Надым (R1), Аяч-Яха (R2), Маре-Сале (R3), Васькины дачи (R5), м. Рогожный (R9) и Дионисий (R11). Описание площадок, их местоположение и данные ежегодных измерений приведены на веб-странице проекта CALM, <http://www.udel.edu/Geography/calm/>. Сравнение проводилось по трем параметрам: средней, минимальной и максимальной величине сезонного протаивания. Видно, что расчеты хорошо согласуются с измерениями. Таким образом, даже относительно простая равновесная модель может быть использована для оценки современного состояния и прогноза вечной мерзлоты на территории России и всего Северного полушария при условии, что имеются все необходимые климатические и почвенные данные для проведения расчетов.

Нами была оценена зависимость результатов расчетов по модели вечной мерзлоты от используемых климатических данных. Для этого было проведено сравнение

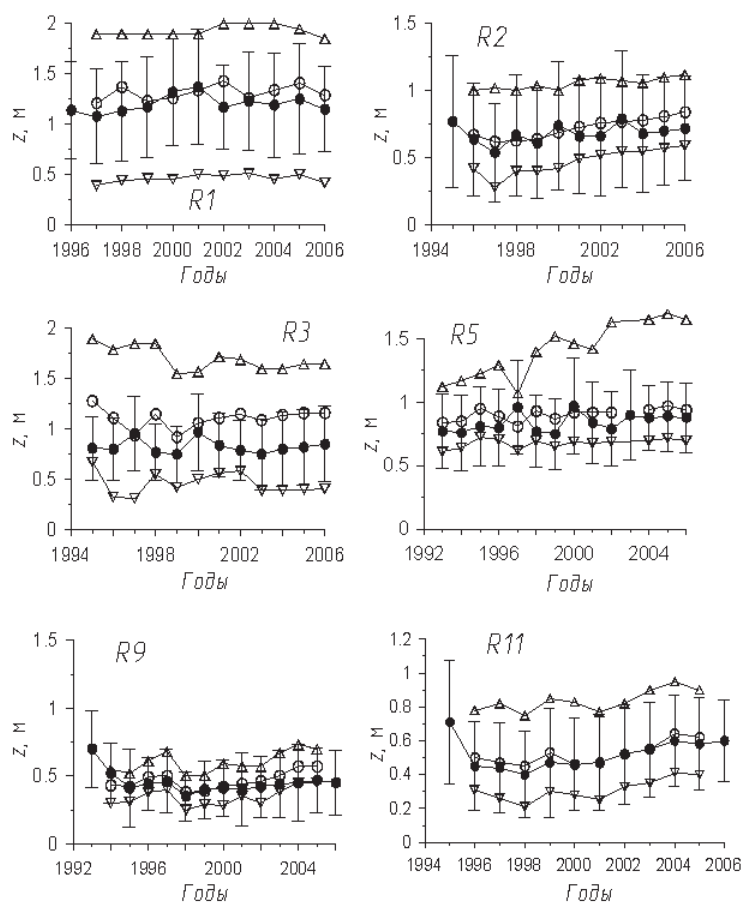


Рис. 1. Сравнение измеренных и расчетных глубин сезонного протаивания вечной мерзлоты. Символы без заливки обозначают среднее, минимальное и максимальное значения по данным измерений, заполненные символы и вертикальные отрезки обозначают среднее и 95 % доверительный интервал по модельным расчетам

четырёх наиболее распространенных и имеющих в свободном доступе архивов температуры воздуха и осадков. Два из них, архив университета Восточной Англии CRU-TS 2.1 [28] и архив университета Делавера США W&M [35], были получены посредством интерполяции данных наблюдений в узлы регулярной сетки с разрешением $0,5^\circ$ по широте и долготе. Два других архива получены при помощи модельного реанализа в Европейском климатическом центре (архив ERA-40, [24]) и в Центре климатических исследований США (архив NCEP-1, [33]). В нашей предшествующей работе было показано, что эти архивы по-разному описывают температурное поле на территории России [20]. Так, расхождения между каждым из архивов и данными наблюдений на метеостанциях достигали 2°C по среднегодовой температуре воздуха, причем пространственное распределение этих расхождений зависело от выбранного архива. Очевидно, что модельные оценки характеристик вечной мерзлоты будут различны в зависимости от того, какие данные используются в расчетах. Были проведены расчеты площади распространения приповерхностной вечной мерзлоты и осредненных по криолитозоне России темпе-

ратуры грунта и глубины сезонного таяния за период 1990–2004 гг. с использованием каждого из четырех климатических архивов. Средние по модельному ансамблю значения этих величин показаны на рис. 2. Можно видеть, что даже для современного климата неопределенность расчета параметров вечной мерзлоты велика. Она превышает неопределенность, связанную с естественной изменчивостью почвенных характеристик и растительности и сопоставима с изменениями, прогнозируемыми на ближайшие 25–30 лет.

При построении прогноза состояния вечной мерзлоты с использованием нескольких сценариев изменения климата были рассчитаны относительные изменения глубины сезонного таяния, выраженные в процентах от современной нормы. При этом первоначальный расчет проводился с использованием осредненных за период 1990–2004 гг. климатических данных каждого из четырех архивов. Далее этим данным в каждом узле сетки давались приращения в соответствии с прогнозами нескольких физически полных моделей климата. Относительная разность получаемых результатов и представляла собой прогноз изменения глубины сезонного таяния вечной мерзлоты. Такой прием позволил свести к минимуму погрешность, связанную с неточным описанием современного климата. Прогнозы относительных изменений, полученные с использованием четырех климатических архивов, практически совпали. Как отмечалось выше, для учета естественной изменчивости характеристик почвы, растительности и снежного покрова проводились ансамблевые расчеты по модели вечной мерзлоты, что позволило наряду со средними значениями прогнозируемых величин оценить плотности вероятности

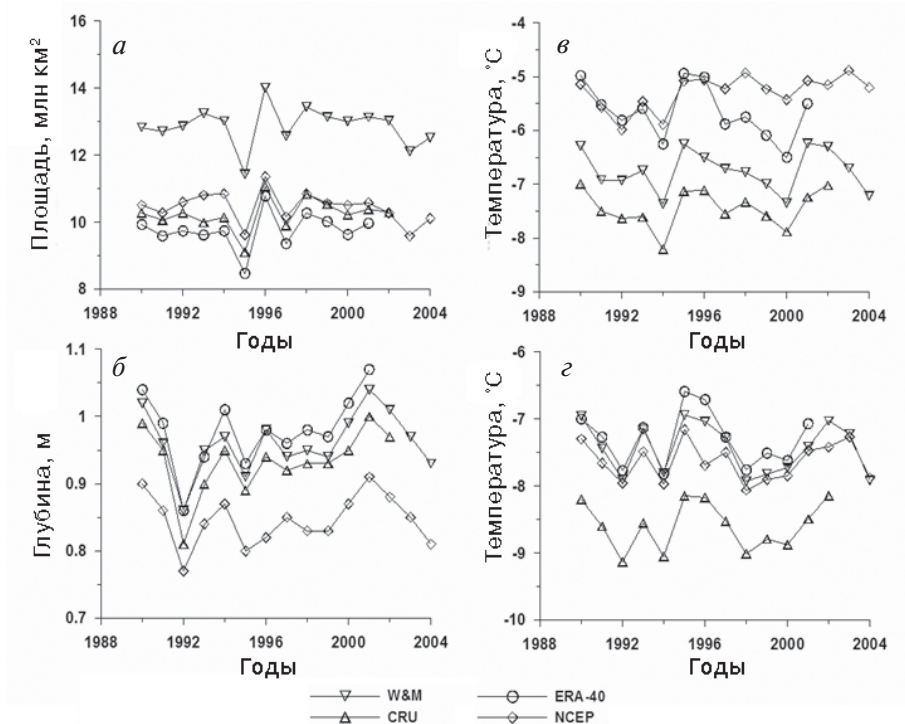


Рис. 2. Осредненные (за период 1990–2004 гг.) по криолитозоне России по данным четырех архивов: расчетная площадь распространения у поверхности (а), глубина сезонного таяния (б), среднегодовая температура воздуха (в) и температура (г) вечной мерзлоты

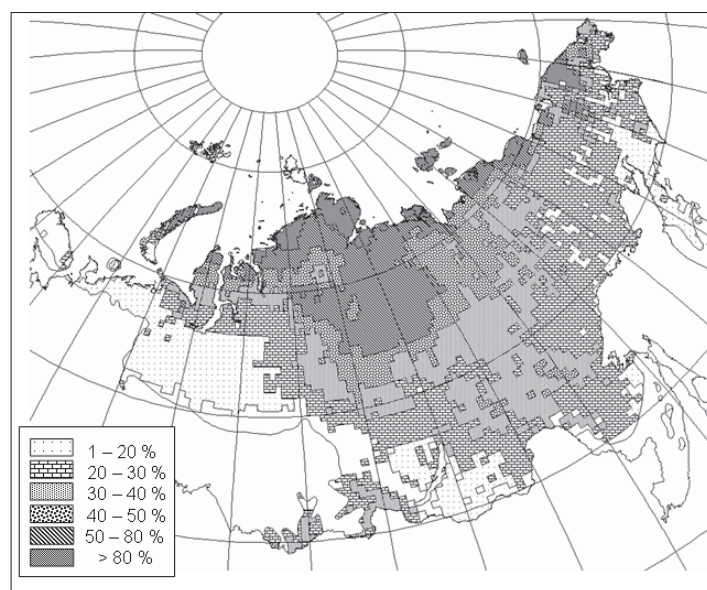


Рис. 3. Наиболее вероятные (средние по расчетному ансамблю) изменения глубины сезонного таяния вечной мерзлоты по климатическому сценарию GFDL для середины XXI в.

и рассчитать дисперсии. При этом сохранилась неопределенность, связанная с прогнозом климата.

Один из результатов, полученных при помощи данного метода, иллюстрирует рис. 3. На нем приведена карта, показывающая наиболее вероятные (средние по расчетному ансамблю) изменения глубины сезонного таяния вечной мерзлоты, ожидаемые к середине XXI века. Дисперсия изменялась от 20–30 % в южной периферийной зоне до 80 % и более вдоль арктического побережья, в среднем по всей криолитозоне России она составила около 40 %. На рис. 3 показан прогноз, полученный с использованием климатического сценария GFDL совместно с современными данными NCEP согласно описанной выше методологии. Расчеты были проведены для пяти различных климатических сценариев CGCM2, CSM–1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL–R30c и HadCM3, все они использовали сценарий эмиссии парниковых газов B2. Описание этих сценариев можно найти на веб-страницах Международной группы экспертов по изменению климата <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/> и <http://igloo.atmos.uiuc.edu/IPCC/>. Отметим, что показанный результат для сценария GFDL является «средним» из всех полученных. Сценарии ECHAM4/OPYC3 и CSM–1.4 предсказывают в среднем по криолитозоне большее увеличение глубины сезонного таяния, а сценарии CGCM2 и HadCM3 – несколько меньшее, чем сценарий GFDL, при этом имеются существенные региональные особенности.

В заключение можно отметить, что предложенный в данной работе метод ансамблевых расчетов состояния вечной мерзлоты обладает несомненными преимуществами по сравнению с традиционными детерминистическими моделями. Получаемые с его помощью оценки плотности вероятности позволяют на качественно новом уровне решать многие задачи, связанные с оценкой геокриологических процессов, в частности, рассчитывать вероятность превышения пороговых значений глубины сезонного таяния, определяющих предел устойчивости инженерных сооружений.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты 07-05-00209 и 07-05-13527.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анисимов О.А.* Об оценке чувствительности вечной мерзлоты к изменению глобального термического режима земной поверхности // *Метеорология и гидрология*. 1989. № 1. С. 79–84.
2. *Анисимов О.А.* Оценка влияния ожидаемых изменений климата на режим вечной мерзлоты // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 3. С. 40–46.
3. *Анисимов О.А.* Оценка макроклимата криолитозоны Евразии и распространение вечной мерзлоты в условиях глобального потепления // *Метеорология и гидрология*. 1994. № 9. С. 12–19.
4. *Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э.* Влияние изменения климата на вечную мерзлоту в Северном полушарии // *Метеорология и гидрология*. 1997. № 5. С. 71–80.
5. *Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э.* Зональность криолитозоны России в условиях антропогенного изменения климата // *Метеорология и гидрология*. 1993. № 10. С. 87–93.
6. *Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э.* Прогноз изменения мерзлотных условий в Северном полушарии: Применение результатов балансовых и транзитивных расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы // *Криосфера Земли*. 1998. № 2. С. 53–57.
7. *Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э., Павлов А.В.* Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке // *Криосфера Земли*. 1999. № 4. С. 15–25.
8. *Анисимов О.А., Скворцов М.Ю.* О применении математических моделей для исследования влияния изменения климата на вечную мерзлоту // *Метеорология и гидрология*. 1989. № 9. С. 98–103.
9. *Величко А.А., Нечаев В.П.* К оценке динамики вечной мерзлоты Северной Евразии в условиях глобального изменения климата // *Известия РАН*. 1992. № 3. С. 667–671.
10. *Гарагуля Л.С., Еришов Э.Д.* Геокриологические опасности. // *Природные опасности России* / Ред. Осипов В.И., Шойгу С.К. Т. 1. М.: Крук, 2000. 315 с.
11. *Гречищев С.Е.* Прогноз оттаивания и распределения вечной мерзлоты и изменения криогенного растрескивания грунтов на территории России при потеплении климата // *Криосфера Земли*. 1997. № 1. С. 59–65.
12. *Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Меламед В.Г.* Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Наука, 1974. 431 с.
13. *Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д.* Модельные оценки эволюции вечной мерзлоты и распределения слоя сезонного протаивания в зависимости от климатических условий в северных регионах Западной Сибири // *Криосфера Земли*. 2000. № 4. С. 49–57.
14. *Малевский-Малевич С.П., Надежина Е.Д.* Оценки влияния изменений климата на вечную мерзлоту в России, основанные на модельных сценариях изменений климата // *Изменения климата и их последствия* / Ред. Менжулин Г.В. СПб.: Наука, 2002. С. 231–239.
15. *Малевский-Малевич С.П., Надежина Е.Д., Симонов В.В., Шкляревич О.Б., Молькентин Е.К.* Оценки воздействий изменений климата на режим протаивания многолетнемерзлых грунтов // *Современные исследования главной геофизической обсерватории* / Ред. Берляндт М.Е., Мелешко В.П. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. С. 33–51.
16. *Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Шкляревич О.Б.* Пространственная изменчивость модельных характеристик многолетнемерзлых грунтов // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 8. С. 89–97.
17. *Павлов А.В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 282 с.
18. *Павлов А.В.* Мерзлотно-климатический мониторинг России: Методология, результаты наблюдений, прогноз // *Криосфера Земли*. 1997. № 1. С. 47–58.
19. *Anisimov O.A.* Changing climate and permafrost distribution in the Soviet Arctic // *Physical Geography*. 1989. № 3. P. 285–293.
20. *Anisimov O.A., Lobanov V.A., Reneva S.A., Shiklomanov N.I., Zhang T.* Uncertainties in gridded air temperature fields and their effect on predictive active layer modeling // *Journal of Geophysical Research*. 2007. № F02S14, doi:10.1029/2006JF000593.
21. *Anisimov O.A., Nelson F.E.* Permafrost zonation and climate change in the northern hemisphere: Results from transient general circulation models // *Climatic Change*. 1997. № 2. P. 241–258.

22. Anisimov O.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Global warming and active-layer thickness: results from transient general circulation models // *Global and Planetary Change*. 1997. № 3–4. P. 61–77.
23. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: research designs and initial results // *Polar Geography*. 2000. № 3. P. 165–258.
24. Kallberg P., Simmons S., Uppala S., Fuentes M. The ERA-40 Archive, ERA-40 Project Report Series No. 17. 2004. European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK.
25. Lachenbruch A.H., Marshall B.V. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan arctic // *Science*. 1986. P. 689–696.
26. Majorowicz J.A., Skinner W.R. Anomalous ground warming versus surface air warming in the Canadian Prairie provinces // *Climatic Change*. 1997. № 4. P. 485–500.
27. Malevsky-Malevich S.P., Molkentin E.K., Nadyozhina E.D., Shklyarevich O.B. Numerical simulation of permafrost parameters distribution in Russia // *Cold Regions Science and Technology*. 2001. № 1. P. 1–11.
28. Mitchell T.D., Jones P.D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids // *International Journal of Climatology*. 2005. № 6. P. 693–712.
29. Nelson F.E. (Un)frozen in time // *Science*. 2003. № 299. P. 1673–1675.
30. Nelson F.E., Anisimov O.A. Permafrost zonation in Russia under anthropogenic climatic change // *Permafrost and Periglacial Processes*. 1993. № 2. P. 137–148.
31. Osterkamp T.E., Romanovsky V.E. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*. 1999. № 10. P. 17–37.
32. Sazonova T.S., Romanovsky V.E. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2003. № 2. P. 125–140.
33. Serreze M.C., Hurst C.M. Representation of mean Arctic precipitation from NCEP-NCAR and ERA reanalyses // *Journal of Climate*. 2000. № 1. P. 182–201.
34. Stendel M., Christensen J.H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM // *Geophysical Research Letters*. 2002. № 13. P. 10-1–10-4.
35. Willmott C.J., Rawlins M.A. Arctic Monthly Air Temperature: Land-Surface Station Climatology Archive (version 1.01) // Center for Climatic Research, Department of Geography, University of Delaware, 1999.

O.A.ANISIMOV

MODERN AND PROJECTED FOR THE FUTURE CHANGES OF PERMAFROST: SYNTHESIS OF OBSERVATIONS AND MODELING

We developed the new method of permafrost modeling based on ensemble approach. The equilibrium permafrost model is used to predict the depth of seasonal thawing under the modern and projected for the mid-21st century climate. The model results are compared against observations at six plots in different biophysiological zones. The sensitivity of permafrost model to climatic data is evaluated through comparison of brought-scale zonal permafrost characteristics obtained with four different forcing data sets. We construct the projection of seasonal thaw depth for the Russian permafrost region.