

*ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ*

УДК 551.345.001.57

**ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЙ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ: ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ БАЛАНСОВЫХ И ТРАНЗИТИВНЫХ РАСЧЕТОВ ПО МОДЕЛЯМ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ**

**О. А. Анисимов, Ф. Э. Нельсон\***

*Государственный гидрологический институт, 199053 С.-Петербург, 2-ая линия В.О., 23, Россия  
\*Университет штата Делавер, США*

Рассматривается влияние глобального изменения климата на состояние вечной мерзлоты в северном полушарии. Для расчета фазового состояния верхнего слоя грунта используется модель, основанная на мерзлотно-климатическом индексе. Модель применялась для расчета современного положения границ криолитозоны в северном полушарии и показала хорошее соответствие эмпирическим геокриологическим картам. Были рассчитаны и построены карты изменения мерзлотных условий верхнего слоя криолитозоны северного полушария для 2050 г., при этом использовались прогнозы глобального потепления, полученные по трем транзитивным моделям общей циркуляции атмосферы.

*Изменение климата, вечная мерзлота, почвенно-мерзлотный индекс, прогноз*

**PREDICTION OF PERMAFROST CONDITIONS IN THE NORTHERN HEMISPHERE: APPLICATION OF RESULTS FROM EQUILIBRIUM AND TRANSIENT GENERAL CIRCULATION MODELS**

**O. A. Anisimov, F. E. Nelson\***

*State Hydrological Institute, 2-nd Line V.O., 23, 199053 St.Petersburg, Russia  
\* University of Delaware, USA, DE*

A frost-index based permafrost model is used to evaluate the impacts of global climate change on the upper layer of permafrost in the Northern Hemisphere. The model's replication of the modern permafrost boundaries is in a good agreement with the empirical geocryological maps. The model has been used in conjunction with the scenarios of climate change derived from three transient general circulation models. The maps, showing changes of the upper permafrost layer for 2050, have been calculated and compiled.

*Climate change, permafrost, surface-frost index, prediction*

**ВВЕДЕНИЕ**

Начавшееся в конце предыдущего столетия антропогенное изменение климата, согласно многим существующим оценкам, будет наиболее значительным в высоких широтах северного полушария, и есть основания полагать, что в самом ближайшем будущем оно станет главным фактором, определяющим изменения криосферы. Наблюдения показывают, что происходящее потепление имеет явно выраженный региональный и сезонный характер, наибольшее увеличение температуры воздуха происходит в умеренных и высоких широтах в зимний и весенний период,

примечательно также и то, что ночные температуры возрастают более заметно, чем дневные. В результате происходит уменьшение амплитуды температуры воздуха как в годовом, так и в суточном ходе. Важно также и то, что в области высоких широт заметно возросли осадки на континентах, в особенности зимние, формирующие снежный покров, что является дополнительным фактором, воздействующим на термический режим криолитозоны.

Уже в ближайшие десятилетия потепление может оказать заметное воздействие на геокрио-

логические процессы и явления, причем во многих случаях механизмы такого воздействия понятны. Прежде всего потепление приведет к изменениям температурного и влажностного режима почвы, глубины сезонного протаивания, затем, по достижении некоторых пороговых значений, изменения приобретут качественно иной характер, и начнется формирование таликов с поверхности на значительной части вечной мерзлоты. Эти тенденции, заметные уже сейчас, будут приобретать все более устойчивый характер по мере развития глобального потепления.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данном исследовании была предпринята попытка оценить возможные изменения верхнего горизонта вечной мерзлоты в северном полушарии в первой половине следующего столетия. Для решения этой задачи необходимы модели вечной мерзлоты и прогнозы изменения климата. Несколько моделей были разработаны и прошли проверку на современном эмпирическом материале, показав хорошие результаты. Модели значительно различаются по степени сложности, и в настоящее время имеется большое их разнообразие, от достаточно простых полуэмпирических, позволяющих рассчитывать лишь некоторые интегральные характеристики вечной мерзлоты, такие как средняя годовая и сезонная температура и глубина сезонного протаивания/промерзания [Анисимов, Нельсон, 1990; Кудрявцев и др., 1974; Nelson et al., 1987], до сложных динамических моделей тепло и влагообмена почвы и атмосферы [Анисимов, 1990; Anisimov, 1989; Goudrich, 1978; Waelbroeck, 1993].

Поскольку расчеты по динамическим моделям требуют привлечения большого объема исходных данных, их применение в масштабах континента и полушария сопряжено со значительными трудностями. По этой причине в данной работе была использована одна из простейших полуэмпирических моделей вечной мерзлоты, подробно описанная в публикации [Анисимов, Нельсон, 1990]. Основной расчетной характеристикой является почвенно-мерзлотный индекс,  $F_s$ , величина которого зависит от соотношения сумм отрицательных ( $\sum T^-$ ) и положительных ( $\sum T^+$ ) температур поверхности почвы:

$$F_s = \frac{\sqrt{\sum T^-}}{\sqrt{\sum T^-} + \sqrt{\sum T^+}}. \quad (1)$$

При расчете внутригодовых изменений температуры почвы предполагается, что они происходят по гармоническому закону и повторяют изменения температуры воздуха, но с меньшей амплитудой. Амплитуда температуры почвы

рассчитывается с учетом утепляющего воздействия снежного покрова при помощи следующего соотношения:

$$A_s = A_a \exp\left(-h_{sn} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha_{sn} T}}\right). \quad (2)$$

Здесь  $A_s$  и  $A_a$  обозначают годовые амплитуды изменения температуры почвы и воздуха,  $h_{sn}$  и  $\alpha_{sn}$  — средняя за зиму высота и коэффициент температуропроводности снега,  $T$  — продолжительность года.

Средняя за зиму высота снега рассчитывается как взвешенная сумма по месяцам:

$$h_{sn} = \sin^2 \varphi \frac{1}{k} \left\{ \sum_{i=1}^k h_i (k - (i - 1)) \right\}. \quad (3)$$

Здесь  $k$  — число месяцев со снегом,  $h_i$  — сумма снежных осадков в месяце с номером  $i$ ,  $\varphi$  — географическая широта. Тригонометрический множитель дает поправку на уменьшение высоты снега за счет зимних оттепелей, приближающуюся к единице с увеличением широты.

Коэффициент температуропроводности снега рассчитывается через коэффициент теплопроводности  $\lambda_{sn}$ , плотность  $\rho_{sn}$  и теплоемкость  $c_{sn}$  по следующей формуле:

$$\alpha_{sn} = \frac{\lambda_{sn}}{\rho_{sn} c_{sn}}. \quad (4)$$

В расчетах параметрам снежного покрова придавались следующие постоянные значения:  $\lambda_{sn} = 0,23$  Вт/(м·град),  $\rho_{sn} = 300$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_{sn} = 2090$  Дж/(кг·град).

При помощи данной модели были рассчитаны значения почвенно-мерзлотного индекса для современного климата, для условий потепления, соответствующих удвоению содержания углекислого газа в атмосфере (равновесные сценарии изменения климата), и для климатических условий, ожидаемых к середине следующего столетия (транзитивные сценарии потепления). Расчет проводился в узлах регулярной пространственной сетки с шагом  $0,5 \times 0,5$  градуса по широте и долготе, охватывающей все континенты северного полушария, при этом в качестве базы данных по современному климату использовался архив норм температуры воздуха и осадков, приведенный к узлам регулярной сетки [Leemans, Crames, 1991]. В прогностических расчетах современным значениям месячных норм климатических параметров в каждом из узлов сетки давались приращения, равные предсказываемому для данного региона изменению температуры воздуха и осадков.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение с картой современного распространения вечной мерзлоты в Северном полуша-

рии, подготовленной Международной Ассоциацией Мерзлотоведения путем обобщения большого количества региональных эмпирических карт [Heginbottom et al., 1993], показало, что южные границы островной, прерывистой и сплошной вечной мерзлоты с большой степенью точности совпадают с изолиниями почвенно-мерзлотного индекса 0,5, 0,6 и 0,67, причем достаточно хорошо воспроизводится не только широтная зональность криолитозоны, но и большинство ее региональных особенностей.

Очевидно, что почвенно-мерзлотный индекс характеризует термические условия лишь самого верхнего горизонта мерзлой толщи, который успевает достаточно быстро подстраиваться под текущий климат. Таким образом, результаты прогностических расчетов по данной модели относятся лишь к верхнему слою мерзлоты, ограниченному несколькими метрами, что необходимо учитывать при их интерпретации. Несомненно, что полное протаивание мерзлой толщи при происходящем современном потеплении потребует многие десятки, сотни, а в некоторых случаях и тысячи лет, однако начало протаивания и образование таликов с поверхности происходит достаточно быстро. Для прогноза этих процессов, характеризующих начало качественных преобразований вечной мерзлоты, были проведены расчеты с использованием шести сценариев изменения климата.

Три климатических сценария соответствовали условиям удвоения концентрации углекислого газа в атмосфере и были получены с использованием равновесных моделей общей циркуляции атмосферы GFDL [Wetherald, Manabe, 1986], GISS [Hansen et al., 1988], и UKMO [Wilson, Mitchell, 1987]. Поскольку чувствительность моделей к изменению атмосферного углекислого газа была различной, эти прогнозы были нормированы на равное 2-градусное увеличение средней годовой глобально осредненной температуры воздуха. Такая нормировка достаточно часто используется при сравнении различных прогнозов изменения климата, в данном случае она позволила более явно выделить региональные различия между выбранными равновесными сценариями потепления.

Другие три сценария соответствовали климатическим условиям, ожидаемым к середине следующего столетия, и были получены при помощи транзитивных моделей общей циркуляции атмосферы GFDL89 [Manabe et al., 1991], ECHAM1-A [Cubasch et al., 1992], и UKTR [Murphy, 1994; Murphy, Mitchell, 1994]. Эти сценарии были отобраны международной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) в результате анализа большого числа транзитивных моделей общей циркуляции атмосферы, в ходе которого изучалась взаимная согласо-

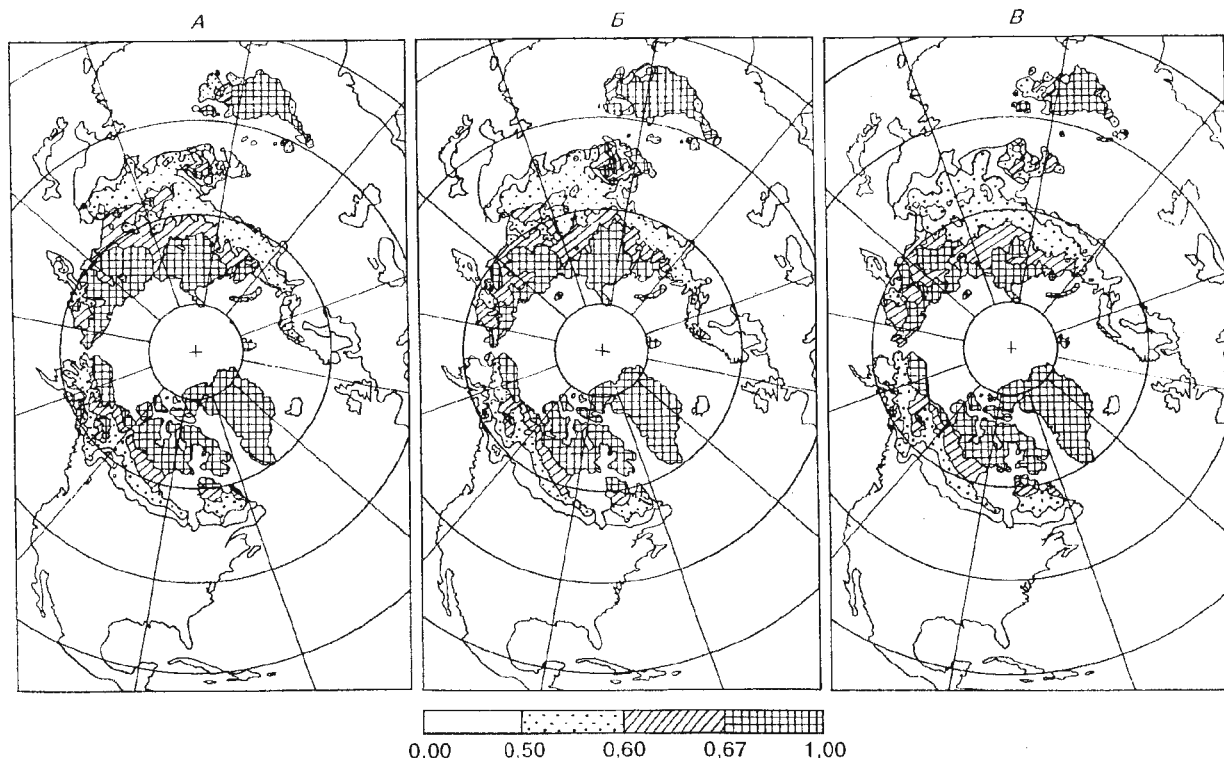
ванность реакции внутренних переменных моделей на внешние возмущения климатической системы, а также анализировалось соответствие расчетов контрольного (современного) климата эмпирическим данным [Greco et al., 1994].

Были рассчитаны изолинии почвенно-мерзлотного индекса в северном полушарии для условий глобального потепления на 2°, и для климата, ожидаемого к середине следующего столетия. Согласно существующим прогнозам, увеличение средней годовой глобально осредненной температуры воздуха в 2050 г. по сравнению с 1990 г. составит 1,16°, по этой причине расчеты с использованием равновесных климатических прогнозов приводят к более значительному смещению к югу изолиний почвенно-мерзлотного индекса, которое может реализоваться не ранее конца следующего столетия. Поскольку климатические прогнозы на срок более 50—60 лет обладают низкой достоверностью, расчеты с использованием равновесных сценариев целесообразно рассматривать лишь как оценки чувствительности климатической вечной мерзлоты к увеличению средней годовой глобально осредненной температуры воздуха на 2°. Здесь и далее в статье термин климатическая вечная мерзлота используется для обозначения той ее части, которая успевает за время расчета прийти в состояние, близкое к равновесному с изменившимися климатическими условиями. В случае прогноза на 50 лет это практически лишь верхний слой, не превышающий 10 метров, а при высокой льдонасыщенности пород — 5—6 м. Процессы в этом слое и его фазовое состояние представляются наиболее важными с точки зрения воздействия на инженерные сооружения, трубопроводы, транспортные магистрали. Возможное при 2-градусном потеплении сокращение площади различных зон климатической вечной мерзлоты в северном полушарии приведено в таблице.

На рисунке показаны карты климатической вечной мерзлоты для середины следующего столетия, рассчитанные с использованием трех транзитивных сценариев изменения климата.

Площади зон „климатической“ вечной мерзлоты в северном полушарии для современных условий и сценариев глобального потепления на 2°, млн м<sup>2</sup> и % от современной

Климат	Общая площадь	Сплошная	Прерывистая	Островная
Совр. климат	25,46 (100 %)	11,74 (100 %)	5,59 (100 %)	8,13 (100 %)
GFDL	18,34 (72 %)	7,84 (67 %)	4,13 (74 %)	6,37 (78 %)
GISS	18,74 (74 %)	7,71 (66 %)	4,27 (76 %)	6,76 (83 %)
UKMO	19,17 (75 %)	8,39 (71 %)	4,24 (76 %)	6,54 (80 %)



Ожидаемое к середине 21-го столетия распространение „климатической“ вечной мерзлоты в северном полушарии по прогнозам изменения климата транзитивных моделей GFDL89 (А), ECHAM1-A (Б) и UKTR (В).

Границы сплошной, прерывистой и островной мерзлоты аппроксимированы изолиниями почвенно-мерзлотного индекса 0,67; 0,60 и 0,50.

Видно, что сценарии, различаясь в деталях, дают достаточно близкие оценки ожидаемой к 2050 г. деградации криолитозоны, согласно которым на 15—20 процентах площади современной вечной мерзлоты начнется ее протаивание с поверхности, причем два из трех прогнозов предсказывают значительно меньшие изменения мерзлоты в Евразии по сравнению с Северной Америкой.

Данное исследование поддерживается российско-американским грантом CRDF RG1-225 и грантом NSF США OPP-9614537.

### Литература

Анисимов О.А. Оценка влияния ожидаемых изменений климата на режим вечной мерзлоты // *Метеорология и гидрология*, 1990, № 3, с. 40—46.  
 Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е. О применении математических моделей для изучения взаимодействия климата и вечной мерзлоты // *Метеорология и гидрология*, 1990, № 10, с. 13—20.  
 Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М., Наука, 1974, 431 с.  
 Anisimov O.A. Changing climate and permafrost distribution in the Soviet Arctic // *Physical Geography*, 1989, No 10, p. 285—293.

Cubasch U., Hasselmann K., Hock H., et al. Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model // *Climate Dynamics*, 1992, No 8, p. 55—69.  
 Goodrich L.E. Efficient numerical technique for one-dimensional thermal problems with phase change // *Inter. J. Heat and Mass transfer*, 1978, No 21, p. 615—621.  
 Greco S., Moss R.H., Viner D., Jenne R. Climate Scenarios and Socioeconomic Projections for IPCC WG II Assessment. Working document for WG II lead authors, 1994, 12 p.  
 Hansen J., Fung I., Lacis A. et al. Global climate changes as forecast by the Goddard Institute for Space Sciences three dimensional model // *J. Geophys. Res.*, 1988, vol. 93, p. 9341—9363.  
 Heginbottom J.A., Brown J., Melnikov E.S., Ferrians O.J. Circumarctic map of permafrost and ground ice conditions // *Sixth International Conference on Permafrost (Beijing, China, 5—9 July 1993)*, Proceedings, vol. 2. Wushan, China, South China University of Technology Press, 1993, p. 1132—1136.  
 Leemans R., Cramer W. The IIASA Database for Mean Monthly Values of Temperature, Precipitation, and Cloudiness on a Global Terrestrial Grid // *Research Report RR-91-18*, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, November 1991, 62 p.  
 Manabe S., Stouffer R.E., Spelman M.J., Bryan K. Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO<sub>2</sub>. Part 1: Annual mean response // *J. Climate*, 1991, No 4, p. 785—818.  
 Murphy J.M. Transient response of the Hadley Centre coupled ocean-atmosphere model to increasing carbon dioxide. Part I:

*ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЙ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ*

Control climate and flux correction // *J. Climate*, 1994, No 8, p. 35—56.

**Murphy J.M., Mitchel J.F.B.** Transient response of the Hadley Centre coupled ocean-atmosphere model to increasing carbon dioxide. Part II: Spatial and temporal structure of response // *J. Climate*, 1994, No 8, p. 57-80.

**Nelson F.E., Outcalt S.I.** A computational method for prediction and regionalization of permafrost // *Arctic and Alpine Research*, 1987, No 19, p. 279—288.

**Waelbroeck C.** Climate-soil processes in the presence of permafrost: a systems modelling approach // *Ecological Modelling*, 1993, vol. 69, No 3,4, p. 185—225.

**Wetherald R.T., Manabe S.** An investigation of cloud cover change in response to thermal forcing // *Climate Change*, 1986, vol. 8, p. 5—25.

**Wilson C.A., Mitchell J.F.B.** A doubled CO<sub>2</sub> climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean // *J. Geophys. Res.*, 1987, vol. 92, p. 313—315.

*Поступила в редакцию  
1 октября 1997 г.*