

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.340, 551.345, 551.583

**РЕАКЦИЯ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА:
ОЦЕНКИ С ПОМОЩЬЮ РЕГИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Е.Д. Надежина, И.М. Школьник, Т.В. Павлова, Е.К. Молькентин, А.А. Семиошина

*Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7, Россия, rsb@main.mgo.rssi.ru*

Оцениваются возможности использования региональной климатической модели Главной геофизической обсерватории для адекватного описания современной эволюции и возможных изменений состояния многолетне- и сезонномерзлых грунтов под влиянием потепления климата на территории Евразии. Выполнено сравнение расчетов с данными наблюдений. Показано, что детализация распределений растительности и топографии в региональной климатической модели Главной геофизической обсерватории позволяет достаточно реалистично воспроизвести региональные особенности термического состояния грунтов.

Вечная мерзлота, региональная модель климата, изменение климата, температура воздуха и грунтов, сезонное протаивание и промерзание

**PERMAFROST RESPONSE TO THE CLIMATE WARMING AS SIMULATED
BY THE REGIONAL CLIMATE MODEL OF THE MAIN GEOPHYSICAL OBSERVATORY**

E.D. Nadyozhina, I.M. Shkolnik, T.V. Pavlova, E.K. Mol Kentin, A.A. Semioshina

Voeikov Main Geophysical Observatory, 194021, St. Petersburg, Karbyshev str., 7, Russia, rsb@main.mgo.rssi.ru

The analysis of the current seasonal thawing/freezing ground characteristics and their changes under the warmer climate conditions has been fulfilled for Eurasia using the Regional Climate Model scenario of the main geophysical observatory. The late 20th century permafrost simulation using the Regional Climate Model output has been validated by observations. It has been shown that the use of the higher spatial resolution of vegetation distribution and topography in the Regional Climate Model gives realistic representation of the regional ground temperature peculiarities.

Permafrost, regional climate model, climate change, air and ground temperature, seasonal freezing and thawing

ВВЕДЕНИЕ

Озабоченность мирового сообщества возможными проявлениями ожидаемых изменений климата в XXI в. вызвала появление большого количества работ, посвященных разным аспектам выполнения импактных оценок климатических изменений. К числу этих работ, безусловно, относятся исследования прогнозируемого климатического воздействия на вечную мерзлоту [Анисимов, Нельсон, 1997; Павлов, 1997, 2003; Израэль и др., 1999; Малевский-Малевиц и др., 2003, 2005, 2007; Osterkamp, Romanovsky, 1999; Malevsky-Malevich et al., 2001; Oberman, Mashitova, 2001; Zhuang et al., 2001; Pavlov, Moskalenko, 2002]. Гораздо меньшее число исследований посвящено оценкам климатических воздействий на состояние сезонномерзлых грунтов [Павлова и др., 2007; Frauenfeld et al., 2004]. Анализ закономерностей пространственно-временного распределения характеристик многолетне- и сезонно-

мерзлых грунтов необходим для решения многих прикладных задач. Основой большинства оценок состояния многолетнемерзлых грунтов, помимо данных мониторинга атмосферных параметров и параметров криосферы, являются климатические характеристики, рассчитанные с помощью глобальных моделей климата или моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Имеются и работы, в которых использованы климатические характеристики, рассчитанные по региональной модели климата [Romanovsky et al., 2004]. Масштабы пространственной изменчивости характеристик вечной мерзлоты, так же как и характеристик сезонномерзлых грунтов, существенно меньше масштабов пространственного разрешения МОЦАО. Это неоднократно было показано на основе анализа данных мониторинга криосферы [Павлов, 2000, 2003; Антропогенные..., 2006; Pavlov, Moskalenko, 2002].

Поэтому естественно, что для анализа климатического воздействия на состояние грунтов более предпочтительны региональные климатические модели (РКМ), построенные в сеточной области, масштаб пространственного разрешения которой обеспечивает реалистичный учет топографии и свойств подстилающей поверхности, включая локальные свойства почв и растительности.

Развитие РКМ дает основу для более детального описания процессов в грунтах, в том числе и процессов, определяющих эволюцию вечной мерзлоты (ВМ). Для проведения импактных оценок климатического воздействия на элементы окружающей среды представляется перспективным использование РКМ Главной геофизической обсерватории (ГГО). РКМ ГГО и результаты ее применения для расчетов региональных климатических характеристик описаны в работах [Школьник и др., 2000, 2005, 2006, 2007]. В настоящее время модель адаптирована для оценки климатических характеристик на территории Восточной Европы и Сибири. Использование сеточных распределений климатических характеристик, полученных на основе РКМ, позволяет рассчитать в узлах пространственной сетки РКМ вертикальные профили температуры грунтов и определить по ним глубины сезонного протаивания и промерзания.

Расчет распределений температуры в грунтах выполнялся с помощью численного решения одномерного уравнения теплопроводности в многослойной расчетной области, верхняя граница которой совпадает с верхней границей растительного или снежного покрова, а нижняя граница находится на глубине 30 м. На верхней границе расчетной области задана температура покрова, на нижней – геотермальный поток тепла. Толщина снежного и растительного покровов задается с учетом изменений от месяца к месяцу. Таким образом, при анализе данных проявляется непосредственное влияние снежного покрова на термическое состояние грунтов.

Цель настоящей работы – анализ реакции ВМ на изменение климата в конце XX и в XXI в. на основе данных о климате, полученных с помощью РКМ.

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕГИОНАЛЬНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГГО

Региональная климатическая модель ГГО предназначена для изучения антропогенных и естественных изменений климата в модельной области площадью $32,2 \cdot 10^6$ км², которая включает 105×121 узлов горизонтальной сетки со средним шагом 50 км. Детализация процессов тепло- и влагообмена на земной поверхности выполнена с учетом распределения различных видов растительного покрова и их влияния на шероховатость, а также с учетом типа растительности при оценках тепло- и влагообмена с подстилающей поверхностью. Мо-

дель построена в гидростатическом приближении, пространственное разрешение модели обеспечивает уточнение описания орографических эффектов по сравнению с соответствующим описанием этих эффектов в МОЦАО. Граничные и начальные условия РКМ ГГО заданы на основе интерполяции расчетных характеристик, полученных с помощью климатической модели ГГО. Описание физических процессов идентично используемому в глобальной модели ГГО [Шнееров и др., 1997, 2001]. В число этих процессов входят:

- радиационный перенос в облачной атмосфере с учетом суточного хода;
- горизонтальный и вертикальный турбулентный обмен теплом, влагой и импульсом;
- конвекция (проникающая, мелкая и “среднего уровня”);
- крупномасштабная конденсация;
- гравитационно-волновое сопротивление;
- расчет температуры поверхности внутренних водоемов;
- тепло- и влагообмен в слое почвы толщиной 3 м.

Теплоперенос в трехметровом слое почвы описывается уравнением теплопроводности. Деятельный слой разбит на четыре подслоя (0,1, 0,25, 0,65, 2,0 м), с учетом этого разбиения записана система разностных уравнений. На границе раздела атмосфера–почва суммарный поток тепла, поступающий в почву, определяется из уравнения теплового баланса. На нижней границе деятельного слоя поток тепла отсутствует.

Водный баланс почвы определяется интенсивностью осадков, таянием снега, испарением (включая испарение перехваченной растительностью части осадков), транспирацией влаги посредством корневой системы растительности, а также переносом влаги в нижележащие слои путем гидравлической проводимости и вертикального диффузного обмена. Влагоемкость почвы зависит от ее типа. В качестве характеристики влагосодержания почвы принимается объемная влажность почвы. Для расчета влагосодержания применяется четырехслойная модель, толщины слоев которой совпадают с толщинами слоев в модели теплообмена. На границе раздела атмосфера–почва используется уравнение баланса влаги, на нижней границе деятельного слоя полагается, что отсутствует гидравлическая диффузия и проводимость.

При расчете испарения с поверхности суши считается, что каждая ячейка модельной сетки может содержать три типа поверхности: вода, лед, суша. При этом суша, в свою очередь, может включать участки оголенной почвы, участки, занятые растительностью разного типа, и участки, покрытые снегом. При реализации схемы расчета использовались следующие архивы данных: географическое распределение растительного покрова, листового

индекса растительности, полевой влагоемкости почвы, шероховатости растительного покрова, альbedo бесснежной поверхности.

В число выходных данных РКМ помимо других характеристик входят температура поверхности и водный эквивалент толщины снежного покрова. Указанная выше детализация процессов тепло- и влагообмена в РКМ обеспечивает достаточную точность оценки температуры поверхности и водного эквивалента снежного покрова в узлах регулярной сетки. Очевидная грубость задания условия для температуры на нижней границе почвенного слоя в РКМ компенсируется точностью остальных параметризаций и более реалистичным описанием температурного поля в схеме теплопередачи в грунтах. Таким образом, задавая в качестве граничных условий температуру поверхности и толщину снежного покрова в схеме теплопереноса, построенной для расчета характеристик ВМ, мы обеспечиваем параметрический учет эволюции параметров водного баланса в деятельном слое почвы и составляющих теплового баланса на поверхности.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В КОНЦЕ XX ВЕКА И МОЩНОСТЬ СЛОЯ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ

К числу наиболее исследуемых показателей состояния вечной мерзлоты относятся мощность сезонноталого слоя (СТС) и температура многолетнемерзлых слоев. Данные наблюдений с очевидностью демонстрируют зависимость характера изменений мощности СТС от состояния почвенного покрова и ландшафтных особенностей местности [Павлов, 1997, 2003; Антропогенный..., 2006; Pavlov, Moskalenko, 2002]. Более того, наблюдения на севере Западной Сибири дают неожиданный результат, поскольку обнаруживают для некоторых грунтов отсутствие изменений в СТС при наличии четко выраженного повышения температуры на глубинах, превышающих толщину СТС [Антропогенный..., 2006]. Как отмечено в работе [Павлов, Малкова, 2005, с. 20], “в различных природных зонах Севера и даже в пределах локальных участков может обнаруживаться противоположная направленность в современных изменениях глубины сезонного протаивания грунтов”. Усилия по консервации наблюдательной сети в последние годы и возможному расширению ее в будущем должны способствовать более детальному анализу процессов, происходящих в ВМ. Несомненно, использование модельных оценок позволит, с одной стороны, лучше интерпретировать экспериментальные данные, а с другой – оценить возможности уточнения модельного решения задачи.

Одна из особенностей анализа натуральных наблюдений за состоянием СТС состоит в том, что систематизация наблюдений прежде всего направ-

лена на установление корреляционных связей между значениями мощности СТС и термическими характеристиками прилегающего к поверхности слоя воздуха [Павлов, 2000, 2003; Павлов и др., 2004; Антропогенный..., 2006; Константинов и др., 2006; Sazonova et al., 2004]. Наличие корреляционной связи между глубиной протаивания и суммой температур воздуха теплого периода (индексом протаивания) служит в ряде случаев основанием для прогнозирования изменений СТС при потеплении климата. Для обеспечения достоверности корреляционного анализа необходимо использовать достаточно длинные ряды наблюдений (достаточность длины ряда обычно определяется степенью обеспечения статистической значимости результата), что на практике является весьма затруднительным и ограничивает степень надежности получаемой информации. Наибольшей степенью надежности в этом смысле обладают результаты анализа наблюдений на геокриологических стационарах Марре-Сале, Надым, Чабьда, Воркута.

Возникает вопрос: можно ли проверить наличие аналогичных корреляционных связей с помощью данных численных экспериментов? В настоящий момент нет возможностей для того, чтобы провести такого рода проверку абсолютно корректно. Данные МОЦАО позволяют использовать достаточно длинные временные ряды, однако масштаб пространственного разрешения большинства этих моделей создает существенную неопределенность в оценке соответствия расчетных данных ландшафтным особенностям пункта наблюдения. Значительная доля этой неопределенности снимается при использовании климатических характеристик, рассчитанных с помощью РКМ. Вместе с тем в настоящий момент технологические трудности приводят к тому, что доступная климатическая информация РКМ ГГО ограничена рядами данных 10-летней продолжительности, которые рассчитаны для конца XX в., середины и конца XXI в. Конечно, ряды такой длины не могут быть использованы для надежного корреляционного анализа. Однако при малом шаге пространственной регулярной сетки и особенно при достаточно однородной структуре выбранного для анализа участка подстилающей поверхности можно рассчитывать на наличие нескольких узлов сетки, расчетные характеристики в которых принадлежат к одной генеральной совокупности. В таком случае корреляционные связи, полученные по совокупности данных нескольких точек, будут обеспечивать необходимый уровень достоверности анализа. Таким образом, множественный корреляционный анализ, предполагавший зависимость мощности СТС от суммы положительных температур воздуха теплого периода и от суммы отрицательных температур воздуха холодного периода, был проведен для разных регионов по данным натурального и численного экспериментов.

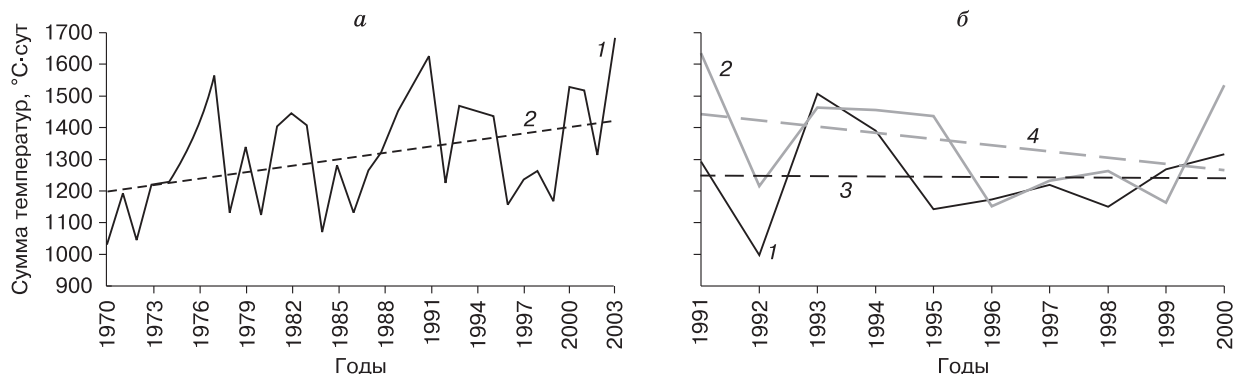


Рис. 1. Эволюция суммы температур воздуха теплого сезона на стационаре Надым:

a – данные мониторинга климата за период 1970–2003 гг. (1 – экспериментальные данные, 2 – линия тренда); *б* – сравнение данных мониторинга климата с расчетными величинами за период 1991–2000 гг. (1 – экспериментальные данные, 3 – соответствующая им линия тренда; 2 – модельные данные, 4 – соответствующая им линия тренда).

На рис. 1 представлена эволюция суммы температур воздуха теплого сезона за период с 1970 по 2003 г. Данные наблюдений можно в настоящее время сравнить с расчетными значениями только за период 1991–2000 гг. Результат сравнения приведен на рис. 1, б. Расчетные суммы температур воздуха удовлетворительно согласуются с соответствующими модельными значениями. Однако коэффициент линейного тренда, отрицательный по данным наблюдений на выбранном временном интервале, по модельным данным оказывается практически постоянным. Отметим, что за весь период наблюдений ли-

нейный тренд суммы температур воздуха за теплый период оказывается положительным.

Результаты множественного корреляционного анализа приведены на рис. 2. В качестве примера линейная зависимость мощности СТС от индекса протаивания представлена при разных значениях сумм отрицательных температур почвенного покрова для пространственной области, расположенной в окрестности геофизиологического стационара Надым. Здесь показаны также аналогичные корреляционные связи, полученные по данным наблюдений за период 1970–2003 гг. Из рис. 2 видно, что для

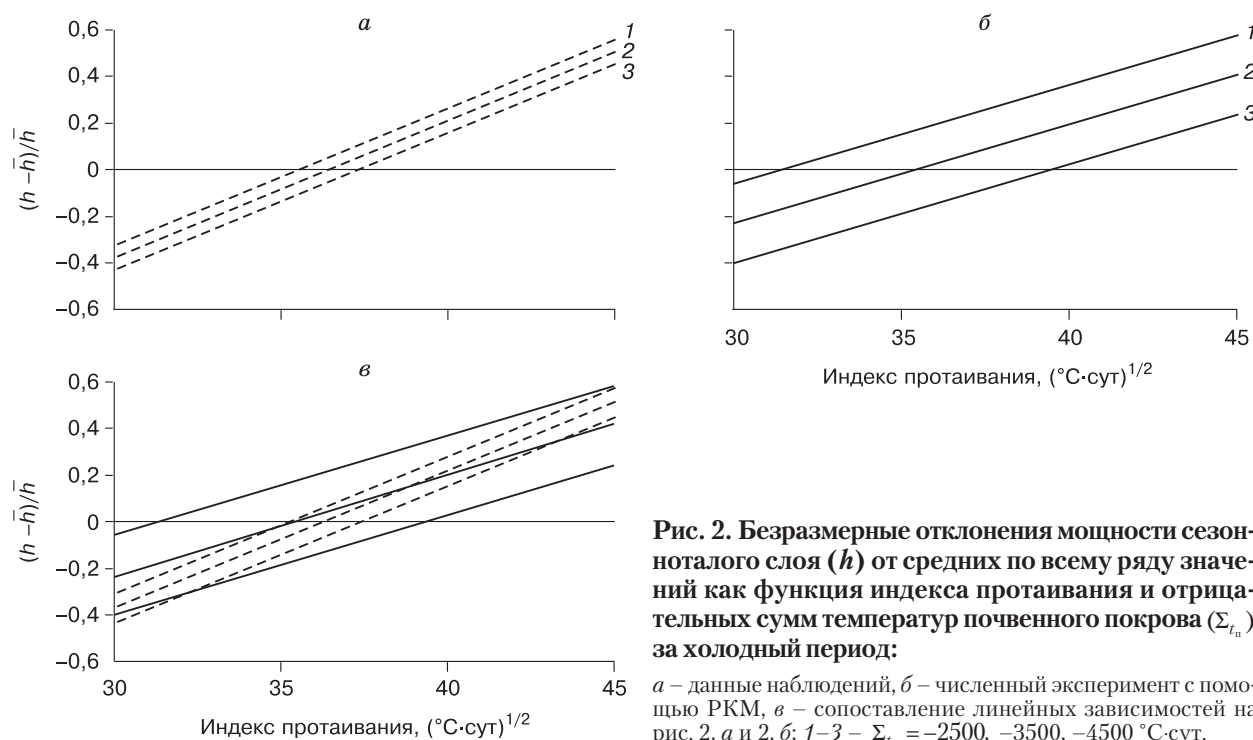


Рис. 2. Безразмерные отклонения мощности сезонного слоя (h) от средних по всему ряду значений как функция индекса протаивания и отрицательных сумм температур почвенного покрова (Σ_{t_n}) за холодный период:

a – данные наблюдений, *б* – численный эксперимент с помощью РКМ, *в* – сопоставление линейных зависимостей на рис. 2, *a* и 2, *б*; 1–3 – $\Sigma_{t_n} = -2500, -3500, -4500$ °C·сут.

Сравнение экспериментальных и расчетных мерзлотно-климатических характеристик в окрестности Якутска

Годовой период	$\Sigma_{-тв}$, °С · сут		$\Sigma_{+тв}$, °С · сут		$h_{пр}^*$, м (август)		$h_{сн}^{**}$, м (август)	
	Модель	Эксперим.	Модель	Эксперим.	Модель	Эксперим.	Модель	Эксперим.
1991/92	-4952	-	1586	-	1,52	-	0,31	-
1992/93	-5203	-	1535	-	1,37	-	0,27	-
1993/94	-5317	-	1560	-	1,38	-	0,27	-
1994/95	-5053	-	1591	-	1,52	-	0,33	-
1995/96	-4934	-	1588	-	1,67	-	0,37	-
1996/97	-4686	-	1714	-	1,81	-	0,37	-
1997/98	-4553	-5051	1793	2158	1,97	1,75	0,38	0,27-0,29
1998/99	-4779	-5354	1605	1964	1,66	1,75	0,35	0,29-0,32
1999/00	-5095	-5026	1649	1941	1,71	1,85	0,35	0,32-0,38
2000/01	-	-5529	-	2014	-	1,63	-	0,16-0,20
2001/02	-	-4658	-	2139	-	1,72	-	0,22-0,25
2002/03	-	-5022	-	1996	-	1,73	-	0,10-0,16
2003/04	-	-5109	-	1821	-	1,65	-	0,15-0,18
2004/05	-	-5394	-	2087	-	1,84	-	0,40-0,45

Пр и м е ч а н и е. Рассматриваются условные годовые периоды (с 1 октября по 30 сентября);

$\Sigma_{-тв}$ и $\Sigma_{+тв}$ – суммы отрицательных и положительных градусо-суток температуры воздуха (метеостанция Якутск).

* Экспериментальные величины толщины сезонного протаивания $h_{пр}$ соответствуют значению, осредненному по всем экспериментальным участкам.

** В последней графе указаны пределы изменения толщины снежного покрова $h_{сн}$ для разных экспериментальных участков.

стационара Надым соответствие модельных и натуральных корреляционных соотношений выражено достаточно убедительно, хотя разброс данных, обусловленный различиями термического режима зимнего периода, в большей степени выявлен для экспериментальных кривых. В то же время для стационаров Марре-Сале и Чабыда количественного соответствия не обнаруживается, хотя, конечно, характер зависимости сохраняется при анализе как модельных, так и натуральных данных. Прежде всего это объясняется завышенными модельными значениями летних температур воздуха в указанных регионах. Для всех рассмотренных случаев, в том числе и для районов Якутии, модельные коэффициенты линейной корреляции между мощностью СТС и суммами летних температур оказались достаточно высокими при соблюдении условий статистической достоверности.

В статье [Константинов и др., 2006] на основе данных наблюдений в районе Якутска проанализированы корреляционные связи между глубинами протаивания и температурами воздуха и грунтов в теплый и холодный сезоны. Была сделана попытка сравнить расчетные характеристики с данными, приведенными в этой статье. Таблица демонстрирует некоторые результаты такого сравнения. Из таблицы видно, что из-за несовпадения периодов наблюдения и модельной оценки невозможно выполнить полностью корректное сравнение, однако вычисленные характеристики довольно близки к экспериментальным, за исключением заниженных

значений модельных положительных градусо-суток температуры воздуха. Несомненно, толщина снежного покрова оказывает существенное влияние на процессы промерзания и последующего протаивания грунтов. Анализ этого эффекта чрезвычайно затруднен тем, что измеренные значения толщины снежного покрова сильно зависят от мелкомасштабных особенностей ландшафта, так что даже разрешение РКМ не позволяет учесть эти особенности в настоящее время.

К числу злободневных относится вопрос о наличии корреляции между изменениями температуры воздуха и температуры многолетнемерзлых слоев на глубинах. В работе [Romanovsky et al., 2007] приведено распределение коэффициентов линейного тренда температуры воздуха и температуры на глубине 1,6 м, полученное на основе обобщения данных 52 пунктов наблюдения в Восточной и Центральной Сибири. Регион ограничен с юга 60-й параллелью, а с запада и востока – 125-м и 135-м меридианами. Аналогичный расчет, выполненный на основе данных численного эксперимента, демонстрирует пространственную картину распределения коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры грунта (рис. 3). Величины модельных трендов относятся к базовому периоду (1991–2000 гг.) и оказываются несколько меньше интерполированных значений экспериментальных трендов. Однако общая картина модельного пространственного распределения довольно близка к натурной, особенно для температурного тренда на

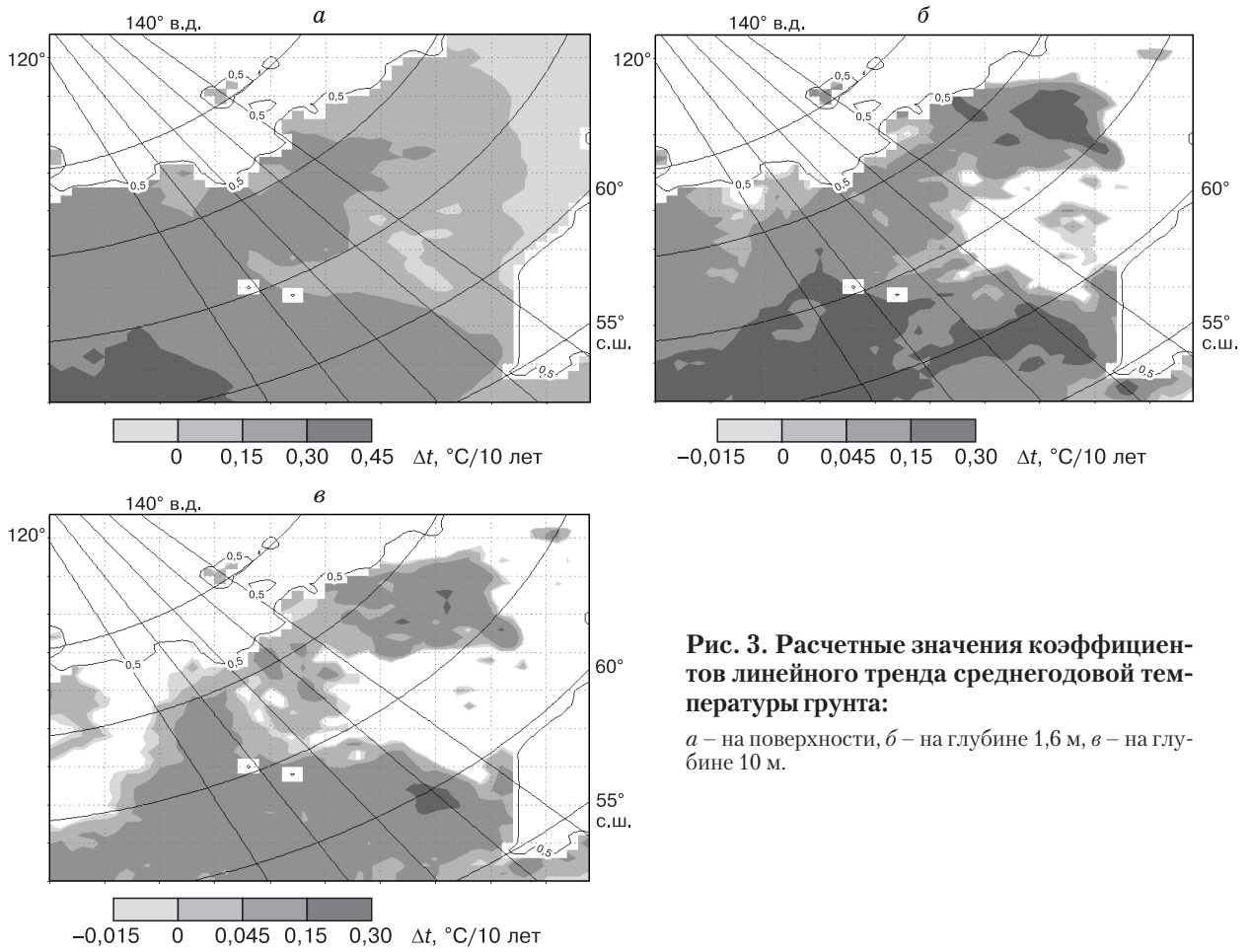


Рис. 3. Расчетные значения коэффициентов линейного тренда среднегодовой температуры грунта:

а – на поверхности, *б* – на глубине 1,6 м, *в* – на глубине 10 м.

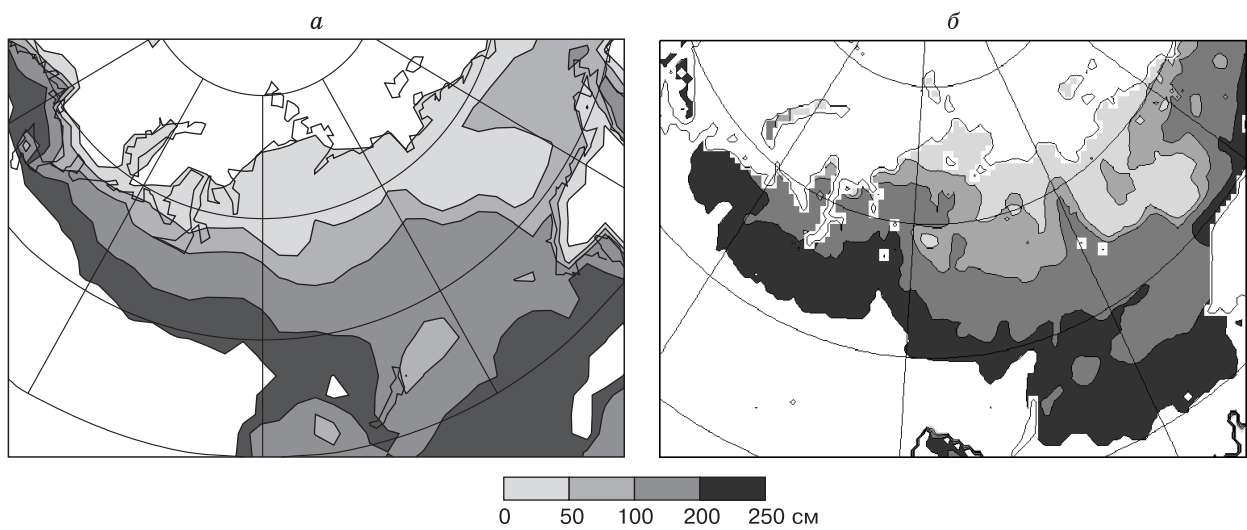


Рис. 4. Сравнение пространственного распределения глубин сезонного протаивания для суглинка в условиях современного климата, рассчитанных с использованием климатических данных ансамбля МОЦАО (*а*) и данных РКМ (*б*).

глубине 1,6 м. По модельным данным одинаковые значения трендов могут наблюдаться как в северных, так и в южных районах выделенного участка поверхности. Из рис. 3 видно, что коэффициенты линейного тренда убывают по глубине, но характер распределения линейных трендов температуры грунтов при перемещении на большие глубины сохраняется. При этом на больших глубинах оказывается более четко выраженным смещение максимальных трендов в южные широты.

Пространственное распределение глубин сезонного протаивания в условиях современного климата можно сравнить с соответствующим распределением, полученным с использованием данных ансамбля МОЦАО. Результат сравнения для суглинков иллюстрирует рис. 4. В работе [Павлова и др., 2007] было показано, что расчет на основе ансамблевых климатических данных хорошо воспроизводит положение границы ВМ. Из рис. 4 следует, что детализация свойств подстилающей поверхности, которую обеспечивает РКМ, приводит к большей пространственной изменчивости положения границы ВМ, однако общая картина распределения сохраняется. При этом расчетные значения глубин сезонного протаивания, полученные с использованием РКМ для большинства районов, оказываются на

30–50 % больше, чем соответствующие расчетные значения, полученные на основе данных ансамбля МОЦАО для тех же грунтов. Площадь зоны с характерными мощностями СТС менее 50 см при расчете с использованием РКМ заметно меньше соответствующей площади, полученной по данным МОЦАО.

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ДАННЫХ РКМ

Представляет интерес оценка изменений глубин сезонного промерзания–протаивания, которые могут происходить в XXI в. под влиянием потепления климата. Глубины сезонного промерзания с использованием данных РКМ ранее не анализировались. На рис. 5 представлены возможные в XXI в. изменения глубин сезонного промерзания и протаивания, относящиеся к середине и концу века. Расчет выполнен для суглинков умеренной увлажненности. На рис. 5 выделена переходная область, расположенная между регионами, для которых характерен режим сезонного протаивания или промерзания. Границы промежуточной области заметно смещаются к северу, так что в конце XXI в. в За-

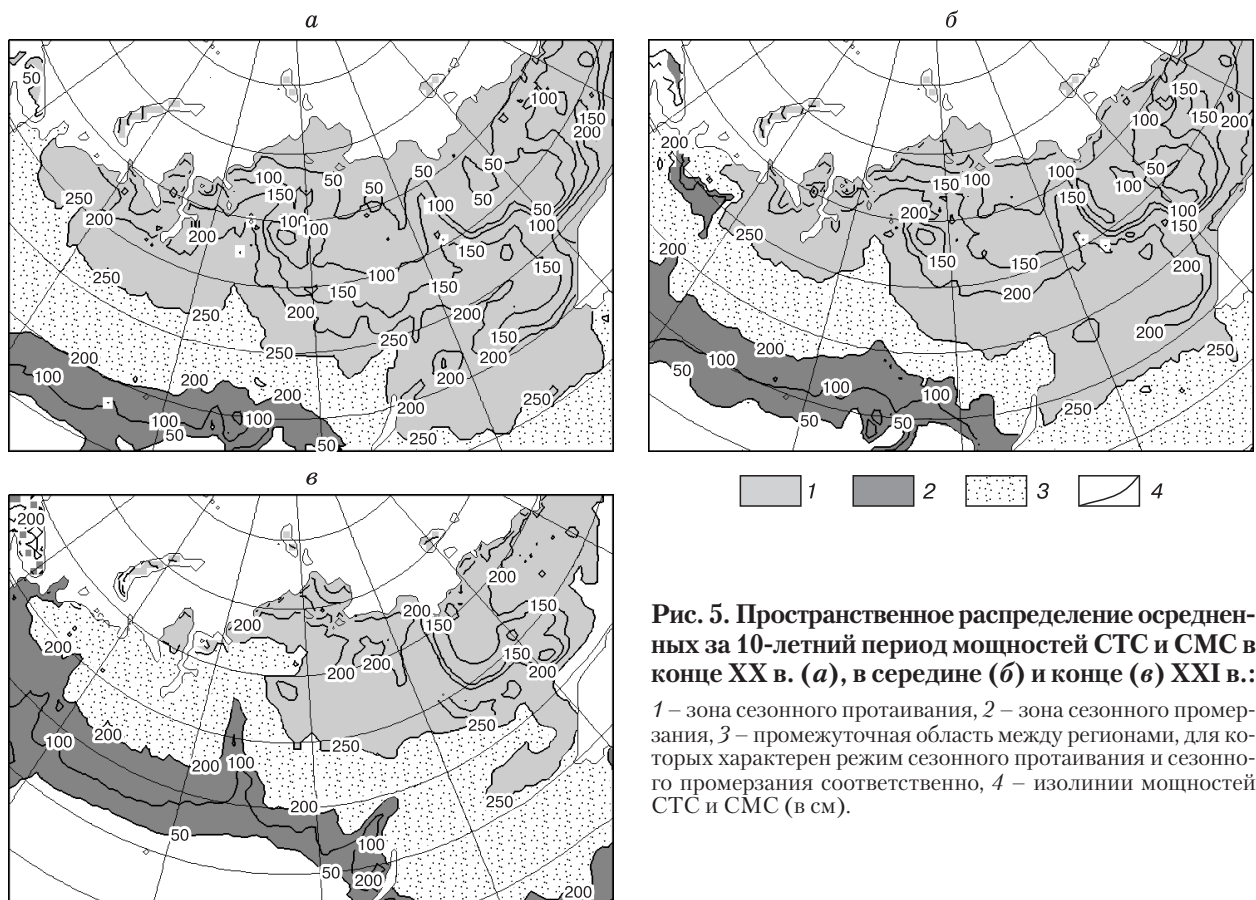


Рис. 5. Пространственное распределение осредненных за 10-летний период мощностей СТС и СМС в конце XX в. (а), в середине (б) и конце (в) XXI в.:
 1 – зона сезонного протаивания, 2 – зона сезонного промерзания, 3 – промежуточная область между регионами, для которых характерен режим сезонного протаивания и сезонного промерзания соответственно, 4 – изолинии мощностей СТС и СМС (в см).

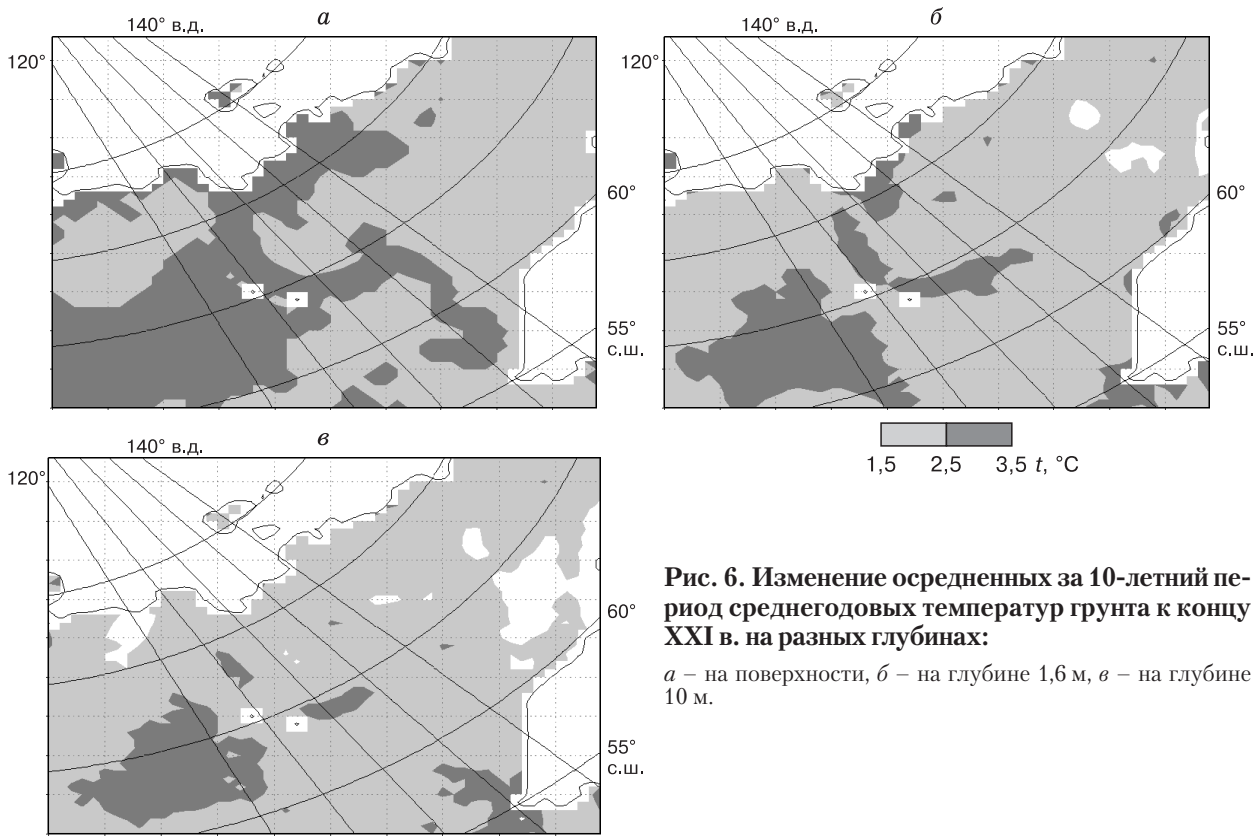


Рис. 6. Изменение осредненных за 10-летний период среднегодовых температур грунта к концу XXI в. на разных глубинах:

a – на поверхности, *б* – на глубине 1,6 м, *в* – на глубине 10 м.

падной Сибири даже севернее 67° с.ш. может установиться режим сезонного промерзания. Это, конечно, не означает, что полностью исчезнут реликтовые слои ВМ, а только указывает на возможное образование теплой прослойки между реликтовыми слоями и слоем сезонного промерзания. Впрочем, для отдельных видов грунтов (песчаник) и нарушенной естественной растительности толщина теплой прослойки может быть (особенно в регионах островной ВМ) так велика, что исчезновение ВМ в этих районах делается вполне реальным.

В том случае, когда ВМ на глубинах не исчезает, температура ее все же существенно увеличивается. Этот эффект отмечен и при анализе данных мониторинга в конце XX в. При этом рост температуры на глубинах иногда оказывается более заметным, чем изменения глубин протаивания [Антропогенный..., 2006]. На рис. 6 показаны расчетные изменения температуры на поверхности покрова и на глубинах 1,6 и 10 м для обширного региона Восточной Сибири. Этот регион представляет особый интерес, так как включает Восточно-Сибирский разрез, исследуемый в последнее время разными методами [Sazonova et al., 2004; Romanovsky et al., 2007]. На рис. 6 приведены пространственные распределения изменений осредненной за 10 лет температуры на разных глубинах для середины XXI в. Изменения температур представляют собой разности сред-

них значений за 2041–2050 гг. и значений средней температуры базового периода. Пространственная картина изменений температуры существенно зависит от уровня, на котором она вычисляется. Область максимальных изменений температуры (от 2,5 до 3,5 °С), весьма обширная на поверхности, заметно сокращается на глубине 1,6 м, а на глубине 10 м практически исчезает в ареале, обозначаемом как Восточно-Сибирский разрез. Таким образом, преобладающие изменения температуры на глубинах 1,6 и 10 м в этом ареале составляют от 1,5 до 2,5 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ расчетных результатов показывает, что климатические характеристики, полученные на основе региональной климатической модели ГГО, могут быть успешно использованы для оценки современного состояния и изменений термики многолетне- и сезонномерзлых грунтов в XXI в. На основе модельных расчетов проверены корреляционные связи между суммами температур воздуха и грунтов теплого и холодного периодов и мощностью СТС. Статистически достоверные модельные корреляционные зависимости получены как для Западной, так и для Восточной Сибири, однако только для стационара Надым отмечено количественное согласование этих связей с результатом анализа экспериментальных данных. Модельные

значения трендов температур грунтов на глубинах 1,6 и 10 м удовлетворительно согласуются с соответствующими значениями трендов, вычисленных по данным натуральных наблюдений для выбранного региона Восточной Сибири. Показано, что коэффициенты линейного тренда убывают по глубине. Построены пространственные распределения мощности слоев сезонного протаивания и промерзания в конце XX в. и их возможных изменений в XXI в. Региональные уточнения таких распределений необходимо продолжить. Представляется перспективным для исследования деградации вечной мерзлоты и уточненного решения задачи теплопереноса в грунтах сочетать использование климатических моделей разного пространственного разрешения с информацией соответствующего масштаба о структуре грунтов. Развитие исследований предполагает также применение многослойной схемы теплопередачи в грунтах в интерактивном режиме при работе с РКМ и анализ влияния этих изменений в схеме расчета на результаты оценки термике грунтов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 06-05-64969, 07-05-00593, 05-05-65326).

Литература

Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е. Влияние изменения климата на вечную мерзлоту в Северном полушарии // *Метеорология и гидрология*, 1997, № 5, с. 71–80.

Антропогенные изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Н.Г. Москаленко. М., РАСХН, 2006, 357 с.

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, № 1, с. 18–26.

Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Угаров И.С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // *Криосфера Земли*, 2006, т. X, № 3, с. 15–22.

Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д. и др. Оценки возможных изменений глубин протаивания многолетнемерзлых грунтов на территории России в XXI веке // *Метеорология и гидрология*, 2003, № 12, с. 80–88.

Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д., Павлова Т.В. Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемерзлых пород // *Криосфера Земли*, 2005, т. IX, № 3, с. 36–44.

Малевский-Малевиц С.П., Молькентин Е.К., Надежина Е.Д. и др. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов // *Криосфера Земли*, 2007, т. XI, № 1, с. 29–36.

Павлов А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // *Криосфера Земли*, 1997, т. I, № 1, с. 47–58.

Павлов А.В. Теплоперенос в природных комплексах севера России // *Криосфера Земли*, 2000, т. IV, № 4, с. 22–31.

Павлов А.В. Мерзлотно-климатические изменения на севере России: наблюдения и прогноз // *Изв. РАН. Сер. геогр.*, 2003, № 6, с. 42–50.

Павлов А.В., Малкова Г.В. Современные изменения климата на севере России. Новосибирск, Академ. изд-во "Гео", 2005, 54 с.

Павлов А.В., Скачков Ю.Б., Какунов Н.Б. Взаимосвязь между многолетними изменениями глубины сезонного протаивания грунтов и метеорологическими факторами // *Криосфера Земли*, 2004, т. VIII, № 4, с. 3–11.

Павлова Т.В., Катцов В.М., Надежина Е.Д. и др. Расчет эволюции криосферы в XX и XXI веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения // *Криосфера Земли*, 2007, т. XI, № 2, с. 3–13.

Школьник И.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М. Валидация климатической модели ГГО // *Метеорология и гидрология*, 2005, № 1, с. 14–27.

Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. Возможные изменения климата на европейской части России и сопредельных территориях к концу XXI века: расчет с региональной моделью ГГО // *Метеорология и гидрология*, 2006, № 3, с. 5–16.

Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. Региональная климатическая модель ГГО для территории Сибири // *Метеорология и гидрология*, 2007, № 6, с. 5–18.

Школьник И.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В. Региональная гидродинамическая модель для исследования климата на территории России // *Метеорология и гидрология*, 2000, № 4, с. 32–49.

Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Матюгин В.А. и др. Современное состояние глобальной модели общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-2) // *Труды ГГО*, 2001, вып. 550, с. 3–43.

Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Соколов А.И. и др. Глобальная модель общей циркуляции атмосферы и верхнего слоя океана // *Труды ГГО*, 1997, вып. 544, с. 3–123.

Frauenfeld O.W., Zhang T., Barry R.G., Gilichinsky D. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depth in Russia // *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, D05101, doi: 10.1029/2003JD004245.

Malevsky-Malevich S.P., Molkentin E.K., Nadyozhina E.D., Shklyarevich O.B. Numerical simulation of permafrost parameters distribution // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2001, No. 32, p. 1–11.

Oberman N.G., Mashitova G.G. Permafrost dynamics in the north-east of European Russia at the end of 20th century // *Norwegian J. Geography*, 2001, vol. 55, p. 241–244.

Osterkamp T.E., Romanovsky V.E. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1999, vol. 10, p. 17–37.

Pavlov A.V., Moskalenko N.G. The thermal regime of soils in the North and Western Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, vol. 13, p. 43–51.

Romanovsky V.E., Christensen J.H., Sazonova T.S. et al. The use of GCM and a Regional Climate Model in circumpolar modeling of permafrost dynamics // *Proc. of the Arctic Climate System Study Final Sci. Conf. (St. Petersburg, Nov. 11–14, 2003)*, WCRP-118 (CD), WMO/TD No. 1232, Sept. 2004.

Romanovsky V.E., Sazonova T.S., Balobaev V.T. et al. Past and recent changes in air and permafrost temperatures in eastern Siberia // *Global and Planet. Change*, 2007, vol. 56, p. 399–413.

Sazonova T.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Sergueev D.O. Permafrost dynamics in the 20th and 21st centuries along the EAST Siberian transect // *J. Geophys. Res.*, 2004, vol. 109, D01108, doi:10.1029/2003JD003680.

Zhuang T., Romanovsky V.E., McGuire A.D. Incorporation of a permafrost model into a large-scale ecosystem model: Evaluation of temporal and spatial scaling issues in simulation soil thermal dynamics // *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, No. D24, p. 33649–33670.

Поступила в редакцию
26 июля 2007 г.