

ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.583, 551.340, 551.345

**РАСЧЕТ ЭВОЛЮЦИИ КРИОСФЕРЫ В XX И XXI ВЕКАХ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

**Т.В. Павлова, В.М. Катцов, Е.Д. Надежина, П.В. Спорышев, В.А. Говоркова**

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

Рассмотрены сезонные вариации границ снежного покрова в условиях изменения климата в XX и XXI вв. Рассчитаны профили температуры в грунтах и пространственные распределения глубин сезонного протаивания и промерзания. Климатические зависимости получены на основе глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана нового поколения. Выполнено сравнение модельных данных и результатов обработки стандартных наблюдений.

*Криосфера, глобальные модели, изменение климата, эволюция*

**TERRESTRIAL CRYOSPHERE EVOLUTION THROUGH THE XX AND XXI CENTURIES  
AS SIMULATED WITH THE NEW GENERATION OF GLOBAL CLIMATE MODELS**

**T.V. Pavlova, V.M. Kattsov, Ye.D. Nadyozhina, P.V. Sporyshev, V.A. Govorkova**

*Voeikov Main Geophysical Observatory, 194021, St. Petersburg, Karbyshv str., 7, Russia, pavlova@main.mgo.rssi.ru*

Seasonal changes of snow cover distribution are considered under changing climate conditions in the XX and XXI centuries. Ground temperature profiles and seasonal thawing/freezing depths are calculated for different time periods. The climate evolution is simulated using a new generation of global climate models. The simulated and observed data are compared.

*Cryosphere, global models, climate change, evolution*

**ВВЕДЕНИЕ**

Элементами криосферы суши (КС) являются снежный покров, ледники и ледовый покров внутренних водоемов и рек, многолетнемерзлые и сезонномерзлые грунты и почвы. Исследованию КС в условиях изменяющегося климата посвящены многочисленные публикации последнего времени [Израэль и др., 1999; Павлов, 2000, 2003; Малевский-Малевич и др., 2005; Anisimov et al., 1997; Malevsky-Malevich et al., 2001; Romanovsky, Osterkamp, 2001; Pavlov, Moskalenko, 2002; Essery et al., 2003; Sazonova et al., 2004; Walsh, 2005; Roesch, 2006]. Локальные и пространственные характеристики КС являются предметом изучения климатологии и геокриологии. Процессы эволюции отдельных элементов КС взаимосвязаны и взаимозависимы. Это особенно отчетливо проявляется во взаимосвязи снежного покрова и эволюции многолетне- и сезонномерзлых слоев. Модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) позволяют рассчитывать климатические изменения

отдельных элементов КС, а также исследовать взаимную зависимость этих элементов.

Со времени выхода в свет последнего, третьего оценочного доклада (ТОД) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [IPCC, 2001] произошла смена поколения МОЦАО. В рамках подготовки очередного, четвертого оценочного доклада (ОД4) МГЭИК был организован беспрецедентный по своим масштабам и количеству участников проект по анализу результатов расчетов климата с помощью МОЦАО нового поколения. Основу проекта составили расчеты климата XX в. (20С3М) при заданных в соответствии с наблюдениями концентрациях парниковых газов (ПГ) и аэрозолей, а также три сценарных расчета климата XXI в. (для сценариев выбросов А2, А1В и В1, в соответствии с номенклатурой МГЭИК). Всего в проекте задействовано более двух десятков МОЦАО, разработанных в известных исследовательских центрах мира. Многие

**МОЦАО и сценарии, использованные в настоящем исследовании**

№ п/п	Модель, страна	Разрешение: атмосфера/океан	Число членов ансамбля 20С3М	XXI в. (сценарии)
1	BCCR-BCM2.0, Норвегия	T63L31/0,5–1,5°×1,5°L35	1	A2
2	CCSM3, США	T85L26/0,3–1°×1°L40	1	A2, A1B, B1
3	CGCM3.1(T47), Канада	T47L31/1,9°×1,9°L29	1	A2, A1B, B1
4	CGCM3.1(T63), Канада	T63L31/0,9°×1,4°L29	1	A2
5	CNRM-CM3, Франция	T63L45/0,5–2°×2°L31	1	A2, A1B, B1
6	CSIRO-Mk3.0, Австралия	T63L18/0,8°×1,9°L31	1	A2
7	ECHAM5/MPI-OM, Германия	T63L31/1,5°×1,5°L40	1	A2, A1B, B1
8	ECHO-G, Германия/Корея	T30L19/0,5–2,8°L20	1	A2
9	GFDL-CM2.0, США	2,0°×2,5°L24/0,3–1,0°×1,0°	3	A2, A1B, B1
10	GFDL-CM2.1, США	2,0°×2,5°L24/0,3–1,0°×1,0°	3	A2, A1B, B1
11	GISS-AOM, США	3°×4°L12/3°×4°L16	2	A2
12	GISS-EN, США	4°×5°L20/2°×2°L16	5	A2
13	GISS-ER, США	4°×5°L20/4°×5°L13	9	A2, A1B, B1
14	INM-CM3.0, Россия	4°×5°L21/2°×2,5°L33	1	A2, A1B, B1
15	MIROC3.2 (medres), Япония	T42L20/0,5–1,4°×1,4°L44	3	A2, A1B, B1
16	MRI-CGCM2.3.2, Япония	T42L30/0,5–2,0°×2,5°L23	1	A2, A1B, B1
17	UKMO-HadCM3, Великобритания	2,5°×3,8°L19/1,5°×1,5°L20	1	A2, A1B, B1
18	UKMO-HadGEM1, Великобритания	1,3°×1,9°L38/0,3–1,0°×1,0°L40	1	A2

центры предоставили результаты ансамблевых (при разных начальных условиях) расчетов каждого типа. На основе этих данных в Ливерморской национальной лаборатории (США) был создан электронный архив ([http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)), содержащий результаты модельных расчетов для большого числа климатических переменных. Участниками модельного проекта МГЭИК было заявлено более трех сотен диагностических подпроектов, посвященных анализу самых разных аспектов моделирования глобального и регионального климата.

Цель настоящего исследования, выполненного в рамках одного из таких диагностических подпроектов, – оценка современного состояния компонентов МОЦАО, представляющих КС, а также анализ расчетов эволюции КС в XX и XXI вв.

Определенная трудность, возникшая при анализе модельных данных, связана с тем, что для отдельных климатических характеристик в архиве имелись данные не для всех моделей или сценариев, а количество членов ансамбля для разных моделей было различным (таблица). Поэтому в настоящем исследовании в разных случаях использовались различные подансамбли модельных расчетов, однако количество рассматриваемых ниже МОЦАО всегда было достаточно велико, чтобы говорить о них как о классе.

В работе дано краткое описание криосферных компонентов МОЦАО нового поколения; анализируются расчеты современного состояния и эволю-

ции КС в XX в.; приводятся оценки изменений КС в XXI в., а также обсуждаются приоритеты дальнейшего развития криосферных компонентов МОЦАО и связанные с этим проблемы.

### КРИОСФЕРА СУШИ В МОЦАО НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В таблице приведены характеристики 18 МОЦАО, использованных в настоящем исследовании: горизонтальное разрешение атмосферного и океанского компонентов МОЦАО характеризуется шагом сетки в градусах широты/долготы или (в атмосфере) в виде спектрального усечения; вертикальное разрешение (L) – количество уровней по вертикали.

Компоненты КС, упомянутые выше, представлены в современных МОЦАО неравнозначно. Наиболее развиты модели снежного покрова суши (СПС), включаемые в состав МОЦАО. В настоящее время используются многослойные модели СПС [Oleson, 2004]. В МОЦАО начинают применяться параметризации различных процессов подсеточного масштаба, связанных с СПС [Liston, 2004], его перераспределением ветром [Essery, Pomeroy, 2004] и его взаимодействиями с растительностью [Essery et al., 2003].

Ключевой характеристикой МОЦАО, с точки зрения использования моделей в оценках будущих изменений климата, является чувствительность к внешним воздействиям (подробнее см., например, [Bonny et al., 2006]). Поэтому огромное значение

имеет то, как в МОЦАО представлены обратные связи, действующие в климатической системе, и, в частности, те из них, что связаны с КС. Значительный вклад в чувствительность глобальной климатической системы к росту атмосферных концентраций ПГ вносит положительная обратная связь между СПС и альbedo подстилающей поверхности: потепление климата приводит к сокращению площади СПС со сравнительно высокими значениями альbedo, увеличивая тем самым поглощение деятельным слоем почвы солнечной радиации и способствуя дальнейшему потеплению. Согласно оценкам [Winton, 2006], основанным на анализе расчетов с МОЦАО ОД4, примерно половина среднего увеличения поглощенной солнечной радиации в Северном полушарии, связанного с отступлением границ криосферы к северу при потеплении климата, является результатом сокращения площади СПС (другая половина приходится на сокращение площади морского льда). В Южном полушарии эффект от сокращения СПС пренебрежимо мал по сравнению с Северным, поскольку и сама площадь суши, и та ее часть в умеренных широтах, на которую приходятся сезонные колебания СПС, сравнительно малы, а снежный покров большей части Антарктиды сохраняется в течение всего года.

В отличие от СПС ледяные щиты представлены в современных МОЦАО крайне упрощенно – в качестве заданных условий (рельеф, альbedo) на нижней границе атмосферных компонентов. В качестве интерактивных компонентов МОЦАО модели ледяных щитов в настоящее время используются очень редко [Huybrechts et al., 2002; Fichefet et al., 2003]. По этой причине ледяные щиты в данной работе не рассматриваются.

Стремление учесть обратные связи между климатической системой в целом и вечной мерзлотой (ВМ) приводит к уточнению и усложнению почвенных блоков МОЦАО. Некоторые МОЦАО позволяют рассчитывать термическую структуру многолетнемерзлых слоев благодаря учету в почвенном блоке фазовых переходов влаги и особенностей теплопереноса при наличии в почве ледяных вкраплений. Результаты расчета характеристик ВМ с помощью таких моделей описаны, например, в работах [Володин, Лыкозов, 1998а,б; Warrach et al., 2001; Lawrence, Slater, 2005].

По современным представлениям, наибольшее влияние эволюции ВМ на остальную часть климатической системы может проявиться в изменении химического состава атмосферы, в частности в увеличении концентраций ПГ, таких как  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Некоторые из рассматриваемых здесь МОЦАО уже включают явные описания процессов теплопереноса в ВМ, однако положительная обратная связь между таянием ВМ и потеплением

климата за счет дополнительных выбросов ПГ ни в одной из этих моделей не учитывается.

В последнее десятилетие традиционным стал расчет эволюции ВМ при заданных условиях вблизи земной поверхности в атмосфере или на поверхности растительного и снежного покрова. При этом в качестве входных параметров используются рассчитанные в МОЦАО значения температуры поверхности и толщины снежного покрова, а также заданные характеристики тех или иных типов грунтов и видов растительности. В рамках этого подхода выполнены многие исследования эволюции ВМ [Анисимов, Нельсон, 1997; Anisimov et al., 1997; Malevsky-Malevich et al., 2001; Zhuang et al., 2001].

В настоящей работе для расчета характеристик ВМ использована одномерная многоуровневая схема теплопередачи в грунтах, подробно описанная в [Malevsky-Malevich et al., 2001; Малевский-Малевич и др., 2005]. Входными параметрами схемы являются среднемесячные значения температуры поверхности покрова (растительного или снежного) и среднемесячный водный эквивалент снежного покрова. Эти данные рассчитываются в узлах регулярной сетки с помощью каждой из перечисленных выше МОЦАО.

Геокриологическая обстановка в том или ином регионе является результатом взаимодействия целого комплекса фоновых и региональных явлений. Расчеты параметров ВМ, выполняемые на базе МОЦАО, основаны на необходимых упрощениях и допущениях и описывают фоновое состояние многолетнемерзлых грунтов.

Известно, что наиболее эффективными при сравнении с данными наблюдений являются результаты осреднения по ансамблю моделей (см., например, [Катцов, Мелешико, 2004]). Это связано с тем, что систематические ошибки, присущие каждой модели в отдельности, часто оказываются случайными по отношению к систематическим ошибкам других моделей и при осреднении по ансамблю взаимно компенсируются.

В настоящее время, по-видимому, нет достаточных оснований для того, чтобы автоматически переносить указанное превосходство “средней” модели над отдельными членами ансамбля на оценки будущих изменений климата. Научное сообщество стоит перед необходимостью создания системы показателей (на основе сравнения модельных расчетов с данными наблюдений), которые позволили бы количественно оценивать совокупное качество каждой модели, а не ограничиваться оценками качества расчетов той или иной климатической характеристики в отдельности. Однако в ожидании разработки и апробации таких показателей (или, как их часто называют, “метрик”), позволяющих ранжировать модели с точки зрения достоверно-

сти рассчитываемых с их помощью будущих состояний климатической системы и, соответственно, распределять веса между моделями в ансамблевых расчетах, именно средние по ансамблю оценки остаются в центре внимания исследователей.

### РАСЧЕТЫ ЭВОЛЮЦИИ КРИОСФЕРЫ СУШИ В XX ВЕКЕ

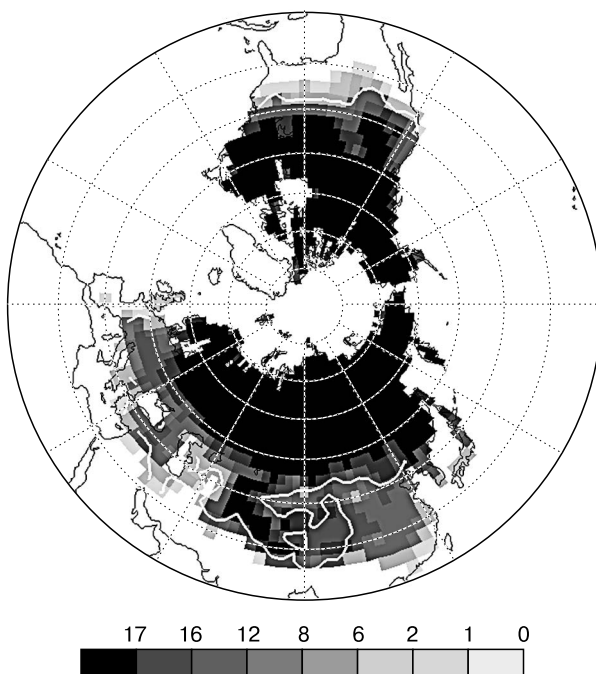
Правильность и полнота описания процессов (разумеется, не только криосферных) и взаимодействий между компонентами климатической системы являются необходимыми условиями способности МОЦАО воспроизводить наблюдаемый климат. В свою очередь, качество этого воспроизведения входит в число первоочередных показателей пригодности МОЦАО для оценок его будущих климатических изменений (см., например, [McAvaney et al., 2001]).

Прогностическими переменными СПС в МОЦАО обычно являются его толщина, удельная масса или водный эквивалент (СВЭ), температура на поверхности и в толще снега, а в некоторых моделях – доля суши, покрытой снегом. Благодаря спутниковым наблюдениям площадь СПС – его наиболее надежно измеряемая характеристика, и поэтому она используется в сравнительных анализах модельных расчетов в качестве основной. К сожалению, данных наблюдений за толщиной СПС недостаточно для полноценной оценки качества модельных расчетов этой характеристики. Поэтому применительно к расчетам современного состояния СПС авторы ограничились анализом сезонного хода и географических распределений средней по ансамблю площади СПС в Северном полушарии.

Рис. 1–3 иллюстрируют совокупное качество расчетов КС в Северном полушарии с помощью МОЦАО, названия и характеристики которых даны в таблице. На рис. 1 представлены полученные в результате осреднения по ансамблю моделей границы СПС (СВЭ не менее 5 мм) в феврале для периода 1980–1999 гг. Черным цветом показана область, для которой во всех моделях выявлено наличие снега. Наблюдаемые границы СПС (в пределах 20%-го покрытия площади ячейки) получены по данным наблюдений [Robinson et al., 1993; Robinson, Frei, 2000].

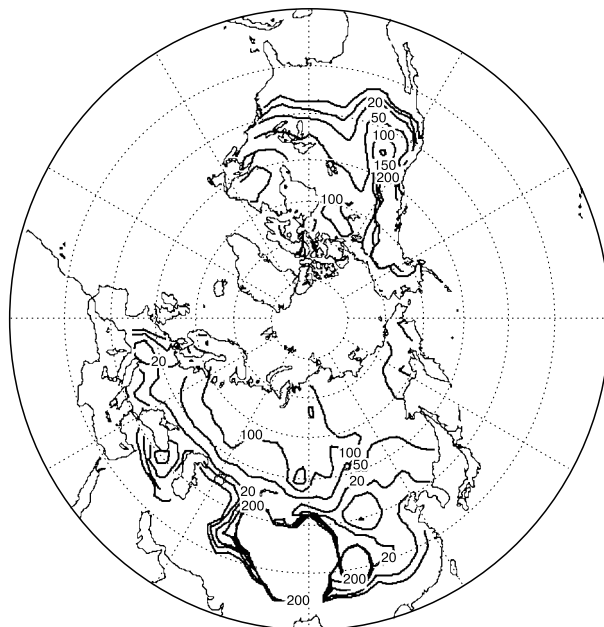
Разброс между МОЦАО в расчетах СВЭ значителен. Как отмечалось выше, оценить относительную успешность воспроизведения этой характеристики разными моделями не представляется возможным из-за отсутствия надежных данных наблюдений. Среднее по ансамблю моделей географическое распределение СВЭ в феврале, полученное для периода 1980–1999 гг., показано на рис. 2.

Наиболее значимыми характеристиками ВМ, которые с той или иной степенью точности описываются данными натурных наблюдений, являются

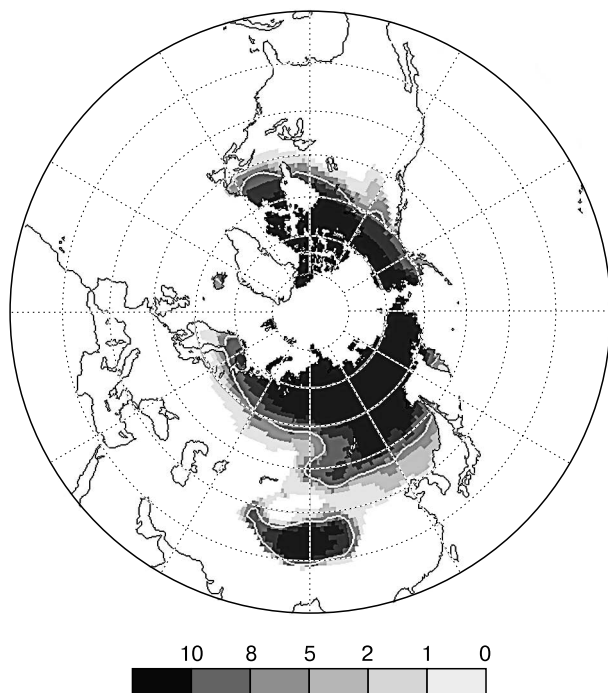


**Рис. 1. Распределение снежного покрова суши в Северном полушарии, рассчитанное по МОЦАО, указанным в таблице, для февраля в 1980–1999 гг.**

В каждой ячейке сетки  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  различный контраст показывает количество моделей, в которых для этой ячейки получен снег (СВЭ > 5 мм); белая линия – наблюдаемые границы снежного покрова (не менее 20 % площади ячейки) за период 1980–1999 гг., по данным [Robinson, Frei, 2000].

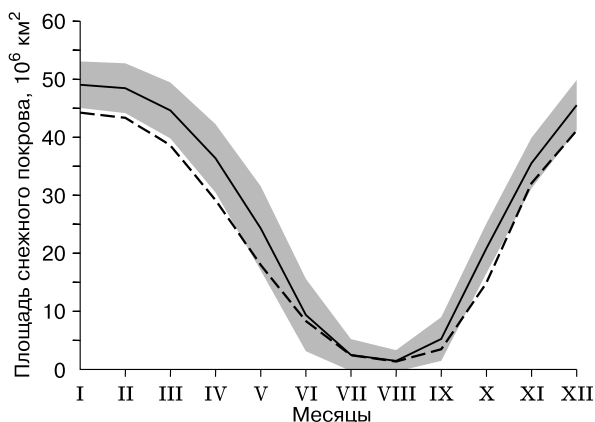


**Рис. 2. Водный эквивалент снега (мм) для февраля в 1980–1999 гг. по расчетам МОЦАО.**



**Рис. 3. Площадь, занятая мерзлотой в верхнем 3-метровом слое почвы, по данным расчетов на базе 11 МОЦАО.**

В каждой ячейке сетки  $1^\circ \times 1^\circ$  различный контраст показывает количество моделей, в которых для этой ячейки усредненная за период 1980–1999 гг. среднегодовая температура грунта на глубине 3 м не превышает  $0^\circ\text{C}$ ; белая линия – среднегодовая нулевая изотерма на глубине 3 м, рассчитанная по ансамблю моделей.



**Рис. 4. Сезонный ход площади снежного покрова суши Северного полушария без учета Гренландии ( $\text{км}^2$ ) в 1980–1999 гг., по данным модельных расчетов (сплошная линия) и данным наблюдений (штриховая) [Robinson, Frei, 2000].**

положение границ отдельных зон ВМ, эволюция глубин сезонноталого слоя (СТС) и сезонномерзлого слоя (СМС), температура многолетнемерзлых слоев на разных глубинах. Все эти характеристики оценивались в настоящем исследовании, но далеко не все расчетные характеристики можно сравнить с измеренными значениями соответствующих величин. Особую трудность, в отличие от пространственных распределений СПС, представляет сравнение модельных и определенных на основе наблюдений границ отдельных зон ВМ, в частности, положение границы между регионами, которые характеризуются режимами сезонного протаивания или промерзания. Пространственная дискретность пунктов наблюдений весьма велика, при этом наличие или отсутствие многолетнемерзлых слоев сильно зависит от ландшафта и состава грунтов. Нельзя ожидать от модельного расчета с пространственным разрешением, имеющим характерный линейный масштаб в несколько сотен километров, детального описания положения границ отдельных зон ВМ. Вместе с тем анализ модельных распределений температуры по глубинам позволяет установить общие закономерности, характеризующие профили температуры в разных зонах ВМ, и сформулировать условия для определения фоновое положение границ. В частности, модельное положение среднегодовой нулевой изотермы на глубине 3 м для суглинков, усредненное за период 1980–1999 гг., достаточно реалистично описывает современную границу ВМ, включая зоны прерывистой и островной мерзлоты. Анализ показывает, что на протяжении XX в. положение этой границы изменилось незначительно (рис. 3). Черным цветом выделена область, для которой все модели показывают наличие ВМ в верхнем 3-метровом слое почвы. Из рис. 3 видно, что области максимально достоверных оценок для СПС и ВМ имеют близкие границы. Расчетное положение границы ВМ в конце XX в. практически совпадает с наблюдаемым положением этой границы. Расчетная площадь зоны ВМ составила 21,8 млн  $\text{км}^2$ , тогда как площадь этой зоны по современным геокриологическим данным составляет 22,8 млн  $\text{км}^2$  [Zhang et al., 1999].

На рис. 4 показан сезонный ход площади СПС (1980–1999 гг.) в расчетах по 18 МОЦАО и по данным наблюдений [Robinson et al., 1993; Robinson, Frei, 2000]. Как видно, в расчетах по ансамблю МОЦАО в среднем завышена площадь СПС в течение всего года, за исключением летних месяцев, когда средние по ансамблю моделей значения практически совпадают с наблюдаемыми. С октября по май наблюдаемые значения площади СПС в Северном полушарии оказываются меньше средних по ансамблю моделей приблизительно на величину среднеквадратического отклонения, характеризующего разброс между модельными рас-

четами. По отношению к данным наблюдений многие модели демонстрируют избыток снега весной и запаздывание весеннего таяния, в то время как формирование СПС в осенне-зимний период воспроизводится моделями в целом достаточно хорошо – об этом говорят и отклонения среднего по ансамблю моделей от данных наблюдений, и значения среднеквадратичного отклонения, которые заметно меньше в период увеличения площади СПС, чем в период ее сокращения. Согласно [Roesch, 2006], МОЦАО, как правило, занижают межгодовую изменчивость площади СПС в Евразии в зимний и весенний периоды, а в Северной Америке воспроизводят ее вполне удовлетворительно. При этом МОЦАО обычно завышают альbedo в покрытых лесом областях распространения СПС.

Помимо современного климата модель должна воспроизводить эволюцию климатической системы в течение периода инструментальных наблюдений. При этом следует иметь в виду, что и модельные данные, и данные мониторинга отражают антропогенное воздействие на климатическую систему и ее естественную изменчивость.

МОЦАО демонстрируют большой разброс в результатах расчета эволюции площади СПС в XX в., однако в целом согласованы относительно ее сокращения в конце XX в. Это относится как к различным моделям, так и к разным членам ансамбля расчетов с одной и той же моделью. На рис. 5 показаны величины линейных трендов среднегодовой площади СПС в Северном полушарии, полученные в каждом из 37 расчетов для всего XX в. и для периода 1980–1999 гг. Эти периоды отрицательных трендов площади СПС выбраны в соответствии с исходным предположением о наличии антропогенного сигнала в глобальном потеплении

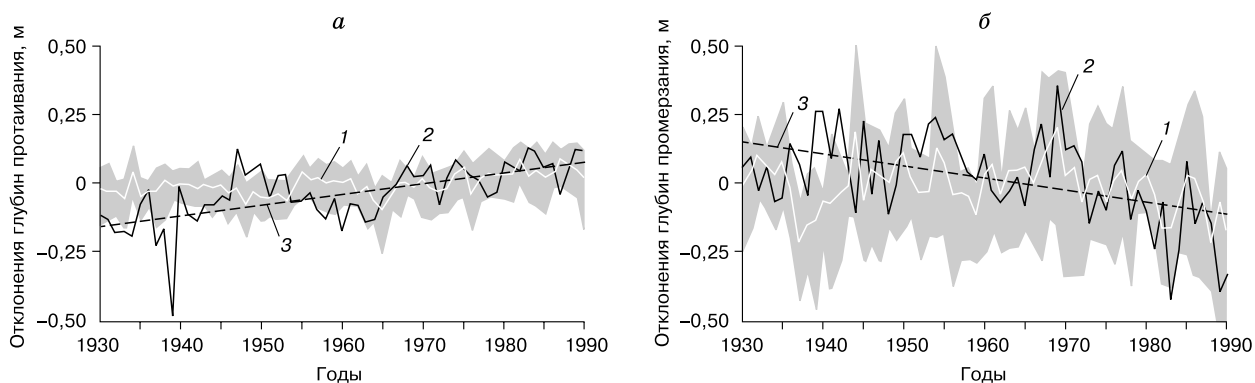


**Рис. 5. Линейные тренды среднегодовой площади снежного покрова суши Северного полушария за периоды 1900–1999 и 1980–1999 гг. для каждого члена ансамбля расчетов (все модели и все члены ансамблей с каждой из моделей), а также для всех членов ансамбля вместе (общее число реализаций равно 37).**

Для сравнения приведены данные наблюдений [Robinson, Frei, 2000].

климата в XX в. в целом и, особенно, в его конце [IPCC, 2001]. В обоих случаях почти все члены ансамбля расчетов демонстрируют сокращение СПС. Для периода 1980–1999 гг. исключение составляют две модели (INM\_CM3.0 и ECHAM5/MPI-OM). Интересно, что величина тренда для всей совокупности модельных данных оказывается сопоставимой с соответствующей оценкой по данным наблюдений: 325 тыс. км<sup>2</sup>/10 лет против 396 тыс. км<sup>2</sup>/10 лет. Как и следовало ожидать, тренды СПС для всего XX в. систематически меньше, а величина среднего по ансамблю тренда среднегодовой площади СПС составляет 62 тыс. км<sup>2</sup>/10 лет (соответствующая оценка для наблюдаемого тренда отсутствует). Учитывая неопределенность относительного вклада долгопериодной естественной изменчивости в наблюдаемое глобальное потепление, полученное согласие трендов можно расценивать как весьма обнадеживающее.

Что касается способности моделей воспроизводить собственную, не связанную с антропогенным воздействием, изменчивость СПС, особенно низкочастотную, внутривековую, то полноценное сравнение с данными наблюдений за эволюцией площади СПС невозможно из-за недостаточной продолжительности рядов наблюдений. Однако представляет интерес выяснить, какие периоды собственной изменчивости СПС (особенно, в низкочастотной части спектра) доминируют в различных МОЦАО и можно ли говорить о каких-либо особенностях генерируемой моделями изменчивости, присущих ансамблю МОЦАО в целом. После устранения линейных трендов из расчетов площади СПС в XX в. были проанализированы оценки амплитуды изменчивости данной характеристики. С этой целью были использованы значения среднеквадратичных отклонений временных рядов, предварительно подвергнутых процедуре 11-летнего скользящего осреднения. Полученные значения среднеквадратичных отклонений характеризовали генерируемую моделью внутривековую изменчивость, а межгодовая изменчивость с меньшими периодами исключалась из рассмотрения. Как оказалось, амплитуды внутривековой изменчивости площади СПС существенно различаются между МОЦАО. Так, значения среднеквадратичных отклонений, характеризующие амплитуду внутривековой изменчивости среднегодовой площади СПС, варьируют в пределах от 161 тыс. км<sup>2</sup> (GISS\_eh) до 306 тыс. км<sup>2</sup> (CSIRO\_Mk3.0), а значения среднеквадратичных отклонений, характеризующие межгодовую изменчивость среднегодовой площади СПС (без 11-летней фильтрации), варьируют от 420 тыс. км<sup>2</sup> (MRI\_CGCM2.3.2) до 690 тыс. км<sup>2</sup> (INM\_CM3.0). Соответствующее значение, полученное по более короткому ряду наблюдений, составляет 815 тыс. км<sup>2</sup>.



**Рис. 6. Отклонения глубин СТС (а) и СМС (б) от соответствующего среднего значения за период 1930–1990 гг. по данным модельных расчетов (1) и наблюдений (2) [Frauenfeld et al., 2004].**

Линия 3 – линейный тренд, рассчитанный по данным наблюдений в 1930–1990 гг. Заштрихованная область показывает разброс модельных оценок, в нее попадает 75 % средних модельных значений.

К числу наблюдаемых характеристик ВМ и наиболее востребованных для практических целей относится глубина СТС в регионах, занимаемых ВМ, а в регионах, в которых ВМ отсутствует, – глубина СМС. До недавнего времени отсутствовали систематизированные данные по эволюции термического состояния грунтов, которые позволяли бы проверить модельные расчеты ВМ, осредненные по регионам достаточно большого пространственного масштаба. Вопросы эволюции глубины СМС под влиянием изменения климата практически не рассматривались в литературе. Недавно была предпринята попытка обобщения данных стандартных наблюдений за температурой почвы на разных глубинах в слое 0–3,2 м для территории России [Frauenfeld et al., 2004]. Статистический анализ выполнен для двух больших массивов данных, разделенных по принципу наличия сезонного протаивания в районах ВМ или, наоборот, сезонного промерзания в районах, которые характеризуются отсутствием ВМ в верхнем 3-метровом слое почвы. Глубина СТС (СМС) определена как уровень нулевой изотермы на профилях температуры. Расчетные глубины СТС и СМС осреднены по соответствующим регионам. Необходимо иметь в виду, что как обработка массива экспериментальных данных, так и данные вытяжных термометров, использованных в [Frauenfeld et al., 2004], наряду с данными наблюдений на геокриологических стационарах, имеют существенные ограничения (см., например, [Павлов, 1975]).

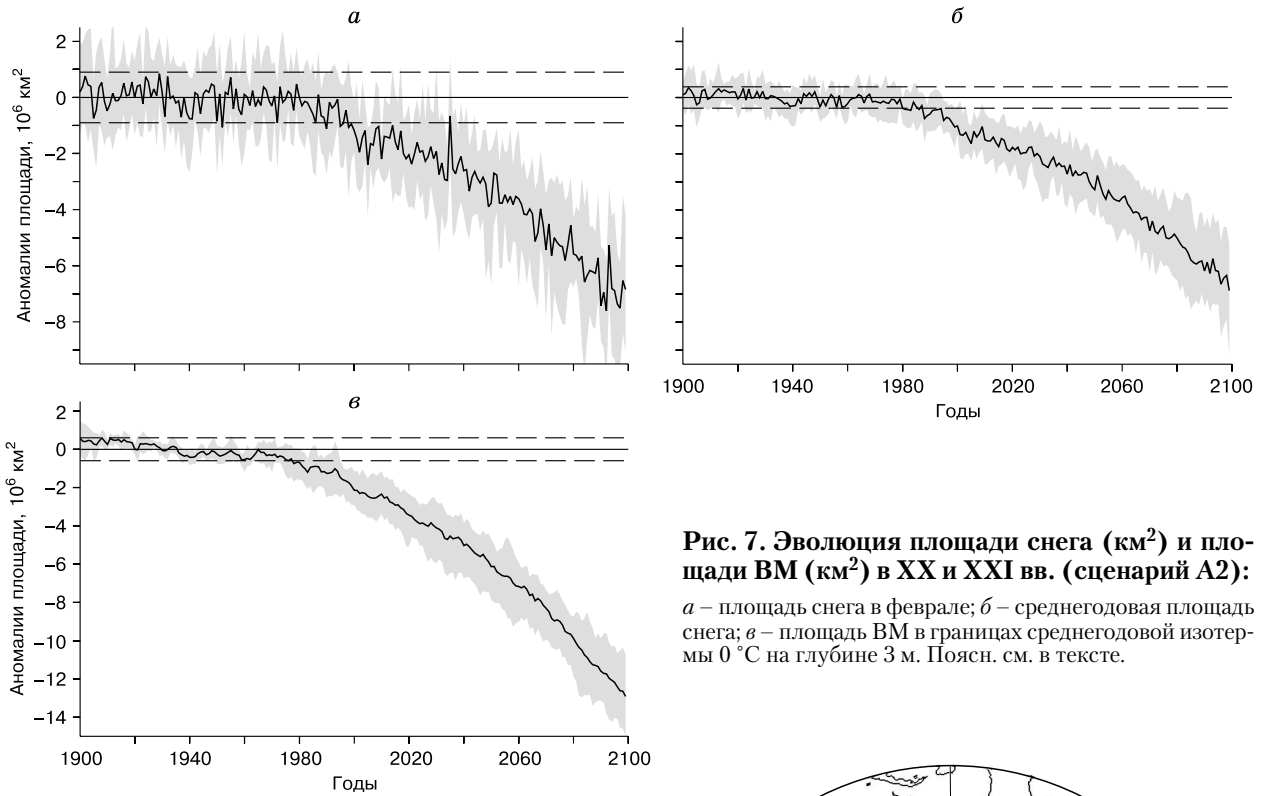
Подробное описание методики обработки экспериментальных данных приведено в работе [Frauenfeld et al., 2004]. Применение аналогичного анализа к расчетным вертикальным распределениям температуры в узлах одноградусной регулярной сетки позволяет сопоставить модельные данные и данные, полученные на основе наблюдений.

Результаты такого сопоставления для периода 1930–1990 гг. представлены на рис. 6. На рисунке приведены отклонения глубин СТС и СМС от среднего значения соответствующих характеристик за 1930–1990 гг. Модельные значения осреднены по ансамблю из 11 моделей. В начале рассматриваемого периода согласование расчетных и экспериментальных характеристик существенно хуже, чем во второй половине XX в. Следует иметь в виду, что обработанные данные наблюдений статистически обеспечены в достаточной мере только с 1956 г. Это отмечено авторами работы [Frauenfeld et al., 2004], которые отдельно вычисляют тренды изучаемых характеристик для периода 1956–1990 гг. На рис. 6 видно, что линейный тренд модельной эволюции осредненных значений глубин СТС во второй половине XX в. менее выражен, чем соответствующий экспериментальный тренд за период 1956–1990 гг. (6 см за 10 лет). Для сезонных глубин СМС линейный тренд удовлетворительно согласуется с трендом, полученным по данным наблюдений в 1956–1990 гг. (10 см за 10 лет).

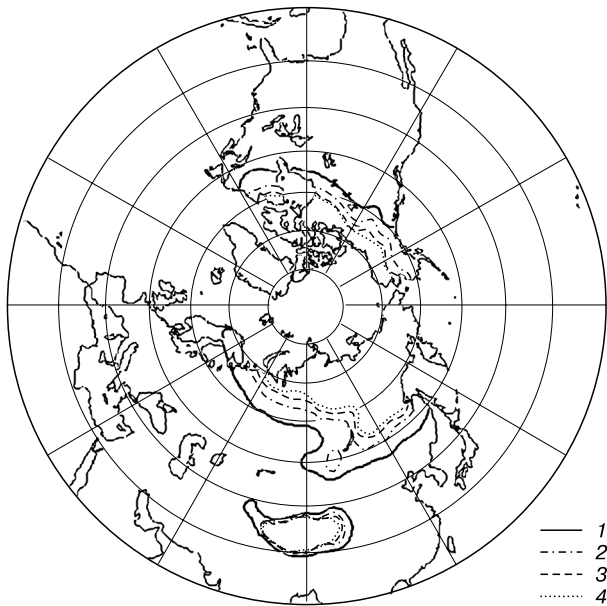
#### ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ КРИОСФЕРЫ СУШИ В XXI ВЕКЕ

Расчеты будущих изменений СПС говорят об ускоряющемся к концу XXI в. сокращении его площади и массы. Наибольшие изменения происходят в случае реализации сценариев А1В и А2.

Очевидный интерес представляет не только скорость изменения СПС, измеряемая, например, как отношение изменения его площади или массы к промежутку времени, за который оно произошло, но и момент времени, когда то или иное изменение СПС с заданной априори вероятностью можно расценивать как проявление глобального



**Рис. 7. Эволюция площади снега (км<sup>2</sup>) и площади ВМ (км<sup>2</sup>) в XX и XXI вв. (сценарий А2):**  
 а – площадь снега в феврале; б – среднегодовая площадь снега; в – площадь ВМ в границах среднегодовой изотермы 0 °С на глубине 3 м. Поясн. см. в тексте.



**Рис. 8. Условная граница ВМ (среднегодовая изотерма 0 °С на глубине 3 м) по расчетам на базе данных 11 МОЦАО:**

1 – 1980–1999 гг.; 2–4 – 2080–2099 гг. (2 – сценарий В1, 3 – сценарий А1В, 4 – сценарий А2).



**Рис. 9. Изменение глубин СТС (изолинии белого цвета, см) и СМС (изолинии черного цвета, см) в 2080–2099 гг. (сценарий А2) по сравнению с периодом 1980–1999 гг.:**

1 – область, в которой к концу XXI в. сохранится режим сезонного протаивания; 2 – то же, но для режима сезонного промерзания; 3 – область, в которой произойдет смена режима сезонного протаивания на режим сезонного промерзания в 3-метровом слое.



потепления, т. е. как вынужденное изменение, а не результат собственной изменчивости климатической системы. На рис. 7 показана двухвековая (в XX в. и для сценария А2 в XXI в.) эволюция февральской (а) и среднегодовой (б) площади СПС в Северном полушарии. Кривыми представлены средние по ансамблю изменения площади СПС по отношению к базовому периоду 1910–1959 гг., интервал изменчивости для которого обозначен двумя штриховыми линиями. В этот интервал (при сохранении статистической структуры базового климата) теоретически должны попадать 95 % ежегодных значений. Таким образом, если кривая выходит за границы этого интервала, то рассматриваемые изменения в среднем по ансамблю статистически значимы на 5%-м уровне. Серым цветом на рис. 7 показан разброс модельных оценок – область, в которую попадает 75 % средних модельных значений (зона между 12,5 и 87,5 перцентилями). Как видно, в Северном полушарии вынужденные изменения и среднегодовой, и февральской площади СПС имели место между 1980 и 2000 гг. Это происходит на фоне увеличивающегося разброса между моделями.

Аналогичный анализ проведен для площади, занятой ВМ. Расчет выполнен в предположении, что положение нулевой изотермы на глубине 3 м условно определяет границу зоны ВМ. Соответствующие изменения достигли 5%-го уровня значимости в конце 1970-х гг. (см. рис. 7,б).

Влияние выбора сценария эмиссии ПГ на положение условной границы зоны ВМ в конце XXI в. иллюстрирует рис. 8. Видно, что реализация сценария А2 (самого теплого из рассмотренных) приведет к максимально возможным изменениям площади ВМ. В случае реализации сценария А2 продвижение границы ВМ к северу происходит почти в два раза быстрее, чем в случае сценария В1.

Показанные на рис. 9 отклонения глубин СМС и СТС в конце XXI в. от средних значений этих характеристик за базовый период 1980–1999 гг. соответствуют сценарию А2 эмиссии ПГ. Максимальные изменения глубины СТС составляют около 2 м и сосредоточены вблизи южной границы зоны ВМ. Изменения глубины СМС составляют от 10 см до 1 м. На рисунке выделены области, в которых в течение XXI в. сохраняются режимы протаивания и промерзания, а также область, в которой произошла смена режима протаивания на режим промерзания в 3-метровом слое.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ эволюции элементов КС (СПС, многолетне- и сезонномерзлых слоев почвы), выполненный на основе моделирования климатических характеристик с помощью МОЦАО нового поколения, показал следующее.

МОЦАО нового поколения расширяют информационное поле расчетных характеристик и позволяют проводить валидацию модельных оценок, привлекая доступные данные наблюдений в XX в.

Современные границы СПС удовлетворительно воспроизводятся ансамблем моделей в целом, при этом модели демонстрируют значительный разброс оценок площади и толщины СПС. В среднем согласуясь с наблюдаемыми трендами, модельные тренды характеристик СПС существенно возрастают к концу XX в.

Положение наблюдаемой границы ВМ удовлетворительно воспроизводится по данным ансамбля МОЦАО. Тренды аномалий глубин СТС и СМС, осредненные по соответствующим регионам, согласуются с трендами природных аномалий.

Изменения КС в результате роста содержания ПГ в атмосфере становятся статистически значимыми на уровне 5 % уже в последние десятилетия XX в.

Смещение границы зоны ВМ к северу под влиянием потепления климата к концу XXI в. существенно зависит от сценария эмиссии ПГ и аэрозолей. Диапазон изменений глубины СТС по отношению к современным значениям составляет от 20 см до 2 м, а диапазон изменений глубины СМС – от 10 см до 1 м. Модельные оценки позволяют отчетливо выделить переходную зону, в которой на протяжении XXI в. режим протаивания может смениться режимом промерзания.

Погрешности расчетов современного состояния КС с помощью МОЦАО нового поколения, разброс в модельных оценках современного состояния и будущих изменений КС оставляют большой простор для дальнейших исследований – как модельных, так и эмпирических. Прогресс в уменьшении неопределенности оценок будущих изменений климата следует связывать с совершенствованием криосферных компонентов МОЦАО. В частности, предметом дальнейших исследований должно стать взаимодействие КС с растительностью и гидрологическими процессами, происходящими на водосборах арктических рек [Walsh, 2005].

Развитие региональных климатических моделей может обеспечить воспроизведение более реалистичной пространственной картины распределений СПС и характеристик ВМ на масштабах, которые не могут быть явно разрешены на основе данных МОЦАО.

Наконец, учет положительной обратной связи между потеплением климата и таянием ВМ за счет возможных дополнительных выбросов ПГ в атмосферу непосредственно в расчетах эволюции глобальной климатической системы с помощью МОЦАО может внести коррективы в существующие оценки будущих изменений климата.

Авторы признательны международному сообществу разработчиков климатических моделей за предоставление данных для анализа; участникам Программы диагноза и сравнения климатических моделей (PCMDI) за сбор и хранение модельных данных; рабочей группе по объединенным моделям (WGCM) Объединенного научного комитета (JSC) Всемирной программы исследований климата (WCRP) и программы CLIVAR, их Проекту сравнения объединенных моделей (CMIP) и Группе экспертов по моделированию климата за организацию деятельности по анализу модельных данных; подразделению технической поддержки (TSU) Первой рабочей группы (WG1) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) за техническую помощь. Архив данных IPCC в Национальной лаборатории Лоренса Ливермора поддерживается Офисом по науке Министерства энергетики США. Наблюдаемая площадь снега получена по данным (<http://climate.rutgers.edu/snowcover/>).

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-05-65093, 06-05-64969, 06-05-64660 и 05-05-08064офи\_а) и Национального научного фонда США через посредство Международного центра исследований Арктики (IARC, грант UAF05-0074 OPP-0327664).

### Литература

- Анисимов О.А., Нельсон Ф.Е.** Влияние изменения климата на вечную мерзлоту в Северном полушарии // *Метеорология и гидрология*, 1997, № 5, с. 71–80.
- Володин Е.М., Лыков В.Н.** Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность–почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных наблюдений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 1998а, т. 34, № 4, с. 453–465.
- Володин Е.М., Лыков В.Н.** Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность–почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 2. Численные эксперименты по воспроизведению климата // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 1998б, т. 34, № 5, с. 622–633.
- 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.
- Катцов В.М., Мелешко В.П.** Сравнительный анализ моделей общей циркуляции атмосферы и океана, используемых для оценок будущих изменений климата // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, 2004, т. 40, № 2, с. 723–736.
- Малевский-Малевич 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.
- Павлов А.В.** Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, кн. изд-во, 1975, 302 с.
- 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.
- 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, vol. 15, p. 61–78.
- Bony S., Colman R., Kattsov V. et al.** How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? // *J. Climate*, 2006, vol. 19, p. 3445–3482.
- Essery R.H., Pomeroy J., Parviainen J., Storck P.** Sublimation of snow from boreal forests in a climate model // *J. Climate*, 2003, vol. 16, p. 1855–1864.
- Essery R.H., Pomeroy J.** Vegetation and topographic control of wind-blown snow distributions in distributed and aggregated simulations // *J. Hydrometeorol.*, 2004, vol. 5, No. 5, p. 735–744.
- Fichefet T., Poncin C., Goose H. et al.** Implications of changes in freshwater flux from the Greenland ice sheet for the climate of the 21st century // *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, No. 17, p. 1911, doi:10.1029/2003GL017826.
- 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.
- Huybrechts P., Janssens I., Poncin C., Fichefet T.** The response of the Greenland ice sheet to climate changes in the 21st century by interactive coupling of an AOGCM with a thermomechanical ice sheet model // *Ann. Glaciology*, 2002, vol. 35, p. 409–415.
- IPCC, 2001:** *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third assessment report of the Intergovernmental panel on climate change* / J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs et al. (eds). Cambridge, N.Y., Cambridge Univ. Press, 2001, 881 p.
- Lawrence D.M., Slater A.G.** A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century // *Geophys. Res. Lett.*, 2005, vol. 32, L24401, doi:10.1029/2005GL025080.
- Liston G.** Representing subgrid snow cover heterogeneities in regional and global models // *J. Climate*, 2004, vol. 17, p. 1381–1397.
- Malevsky-Malevich S.P., Molkentin E.K., Nadyozhina E.D., Shklyarevich O.B.** Numerical simulation of permafrost parameters distribution // *Cold Regions Sci. and Technol.*, 2001, No. 32, p. 1–11.
- McAvaney B.J., Covey C., Joussaume S. et al.** Model evaluation // *Climate Change 2001: The scientific basis*. Cambridge, N.Y., Cambridge Univ. Press, 2001, 881 p.
- Oleson K.W., Dai Y., Bonan G. et al.** Technical description of the Community Land Model (CLM). Boulder, Colorado, USA, 2004, 173 p. (Techn. Note / National Center for Atmospheric Res.; NCAR/TN-461+STR).
- 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.
- Robinson D.A., Dewey K.F., Heim R., Jr.** Global snow cover monitoring: an update // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1993, No. 74, p. 1689–1696.
- Robinson D.A., Frei A.** Seasonal variability of northern hemisphere snow extent using visible satellite data // *Professional Geographer*, 2000, vol. 51, p. 307–314.

- Roesch A.** Evaluation of surface albedo and snow cover in AR4 coupled climate models // J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, D15111, doi:10.1029/2005JD006473.
- Romanovsky V.E., Osterkamp T.E.** Permafrost: changes and impacts // Permafrost response on economic development, environmental security and natural resources. Dordrecht, Kluwer Acad. Publ., 2001, p. 297–315.
- Sazonova T.S., Romanovsky V.E., Walsh J.E., Sergeev 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.
- Walsh J.E.** Cryospheric and hydrologic variability // Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2005, 1042 p.
- Warrach K., Mengelkamp H.T., Raschke E.** Treatment of frozen soil and snow cover in the land surface model SEWAB // Theoret. and Appl. Climatology, 2001, vol. 69, No. 1/2, p. 23–37.
- Winton M.** Surface albedo feedback estimates for the AR4 climate models // J. Climate, 2006, vol. 19, p. 359–365.
- Zhang T., Barry R.G., Knowles K. et al.** Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere // Polar Geography, 1999, vol. 23, No. 2, p. 132–154.
- Zhuang Q., 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 simulating soil thermal dynamics // J. Geophys. Res., 2001, vol. 106, NO D24, p. 33649–33670.

*Поступила в редакцию  
8 августа 2006 г.*