

На правах рукописи

Павлова Татьяна Викторовна

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА
НА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ ПОЧВЫ
С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология и агрометеорология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Санкт-Петербург
2007 г.

Работа выполнена в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Мелешко Валентин Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Генихович Евгений Львович

доктор технических наук, профессор
Менжулин Геннадий Викторович

Ведущая организация:

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Защита состоится 23 мая 2007 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д327.005.01 в государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» по адресу: г. Санкт-Петербург, 194021, ул. Карбышева, д.7.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке государственного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

Автореферат разослан « 21 » апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор географических наук



А.В. Мещерская

1. Общая характеристика работы

Актуальность исследования

В современных исследованиях естественных колебаний климата и его изменений в результате антропогенных воздействий широко используются сложные физико-математические модели. Чтобы достоверно оценить будущие изменения климата, модели должны правильно учитывать основные климатообразующие процессы в атмосфере, океане, криосфере и деятельном слое почвы на континентах и в целом хорошо воспроизводить современный климат. При этом важную роль играют процессы на подстилающей поверхности и в деятельном слое суши, оказывающие существенное влияние на термический режим и влагооборот в нижней тропосфере. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в деятельном слое почвы остается в числе приоритетов развития физико-математических моделей. Деятельный слой почвы играет ключевую роль как резервуар влаги, контролирующей, в частности, испарение (эвапотранспирацию). Многочисленные исследования указывают на существование обратной связи между почвенной влагой и осадками. Например, в работе [Douville et al., 2001] обнаружено влияние аномалий влагосодержания почвы на африканский муссон, а результаты работы [Schär et al., 2004] позволяют предположить существенный вклад обратной связи между почвенной влагой и осадками в аномально высокие летние температуры, наблюдавшиеся в Европе в 2003 г. В последние годы систематическому анализу описания и воспроизведения влагообмена между атмосферой и деятельным слоем почвы климатическими моделями уделяется все больше внимания [Koster et al., 2004; Seneviratne et al., 2005; Lawrence and Slingo, 2005]. Особый интерес в контексте ожидаемых антропогенных изменений климата представляют процессы тепло- и влагообмена в деятельном слое почвы в высоких широтах – с участием криосферы. Соответствующий круг проблем особенно актуален для России, почти вся территория которой находится в области сезонных изменений фазового состояния влаги на поверхности суши (снег и лед) и в деятельном слое почвы (мерзлые грунты). Достаточно упомянуть возможные в будущем изменения глубин сезонного протаивания многолетнемерзлых грунтов в результате антропогенного потепления климата и воздействие этих изменений на строения, транспорт, коммуникации и другую инфраструктуру северных регионов России [ACIA, 2005]. Исследования процессов тепло- и влагообмена на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы, результаты которых изложены в настоящей диссертационной работе, находятся в русле задач ряда национальных, а также международных программ, в том числе Всемирной Программы Исследований Климата (ВПИК) и ее крупных проектов – GEWEX («Глобальный эксперимент по энергии и воде») и ClC («Климат и криосфера»).

Цель и задачи исследования

Центральной проблемой исследования климатической системы Земли является проблема предсказания климата – т.е. статистического описания будущих состояний климатической системы в терминах среднего и изменчивости различных характеристик ее компонентов за период времени от нескольких месяцев до тысяч лет и более. Целью настоящей работы является исследование процессов тепло- и влагообмена на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы в условиях современного климата и его будущих изменений.

Задачами настоящего исследования были:

- Разработка и внедрение новой схемы параметризации процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью и деятельным слоем почвы в модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) ГГО, валидация новой версии МОЦА ГГО
- Исследование влияния крупномасштабных аномалий влажности деятельного слоя почвы на предсказуемость режимов атмосферы
- Оценка качества глобальных моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) нового поколения при воспроизведении характеристик гидросферы и криосферы суши в 20-м веке.
- Расчеты изменений характеристик гидросферы и криосферы суши в 21-м веке с помощью ансамбля МОЦАО нового поколения.

Научная новизна

Основу проведенных исследований составляют результаты численных экспериментов с разными версиями глобальной модели общей циркуляции атмосферы (МОЦА) Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО), а так же результаты расчетов по моделям МОЦА и МОЦАО, созданным в других научных организациях разных стран и принимавшим участие в крупных международных программах (AMIP-I, AMIP-II, МГЭИК ОД4 и др.).

Новизной характеризуется разработанная и включенная в МОЦА ГГО схема параметризации процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы, позволяющая учитывать такие процессы, как перехват части осадков растительностью с последующим испарением перехваченной влаги, транспирацию почвенной влаги растениями, подсеточную неоднородность максимальной влагоемкости почвы при расчете поверхностного стока. На основе сравнения с данными наблюдений и результатами моделирования по другим моделям выполнена валидация гидрологического и термического режимов, рассчитываемых МОЦА ГГО на водосборах крупных рек земного шара.

Исследование влияния аномалий влажности почвы на потенциальную предсказуемость режимов погоды также позволило получить новые результаты.

На основе расчетных данных ансамбля МОЦАО нового поколения выполнены оценки современного состояния и возможного в 21-м веке изменения гидрологического режима для водосборов крупных рек, расположенных в зоне вечной мерзлоты, а также пространственных распределений снежного покрова, глубин сезонного слоя (СТС) и глубин сезонномерзлого слоя (СМС). Совместный анализ этих характеристик на основе данных МОЦАО до сих пор не проводился.

Новизна полученных результатов подтверждается их публикацией в ряде рецензируемых, в т.ч. международных, изданий (см. список публикаций).

Научная и практическая значимость

Разработка новых схем параметризации процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы, а также проведение на протяжении многих лет сравнительного анализа воспроизведения различными моделями (в т.ч. моделями разных поколений) гидрологического режима на крупных водосборах суши – внесли вклад в развитие глобальной климатической модели ГГО.

Важность прогноза состояния многолетнемерзлых грунтов в условиях будущего климата обусловлена тем, что таяние вечной мерзлоты может повлечь за собой очень серьезные последствия для строений, коммуникаций и другой инфраструктуры регионов России, расположенных в этой зоне. Расчеты,

выполненные для различных сценариев изменения климата и для различных типов грунтов с использованием ансамбля климатических моделей, позволили получить количественную картину антропогенных изменений криосферы на территории России в 21-м веке.

Научная значимость работы подтверждается использованием отдельных ее результатов при подготовке Четвертого Оценочного Доклада МГЭИК (готовится к публикации), а также «Доклада об оценке климатических воздействий в Арктике» [АСИА, 2005]. Практическая значимость работы состоит в возможности использования ее результатов при разработке адаптационных мер в отношении будущих изменений климата, а также при стратегическом планировании развития экономики и для формирования внутри- и внешнеполитической позиции Российской Федерации по проблемам климата.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность и обоснованность изложенных результатов обеспечена использованием в исследовании физически полных моделей общей циркуляции атмосферы и океана, опирающихся на законы физики и методы вычислительной математики, а также применением ансамблевого подхода и привлечением большого объема данных наблюдений для оценки полученных результатов.

На защиту выносятся:

- Новая схема параметризации процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы в модели общей циркуляции атмосферы ГГО.
- Результаты исследования влияния аномалий влагосодержания почвы на месячную и сезонную предсказуемость режимов атмосферы над различными регионами земного шара.
- Результаты расчета эволюции гидросферы и криосферы суши в 20-м и 21-м веках с использованием ансамбля глобальных климатических моделей нового поколения

Личный вклад автора

Автором вместе с научным руководителем была разработана схема параметризации процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы. Автором проведено внедрение этой схемы в МОЦА ГГО. Автором создан комплекс программ регионального анализа результатов. Все эксперименты с МОЦА ГГО проводились автором лично. Автор участвовал в обработке и анализе характеристик гидросферы и криосферы суши на основе данных ансамбля МОЦАО нового поколения. Все эксперименты с многоуровневой моделью теплопередачи в грунтах проводились автором лично.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих отечественных и международных конференциях и совещаниях:

- Конференция молодых ученых национальных гидрометслужб стран СНГ (Москва, 1999 г.);
- Конференция молодых ученых «Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата» (Санкт-Петербург, 2001 г.)

- Научные совещания в рамках двустороннего научно-технического сотрудничества между Росгидрометом и метеорологической администрацией КНР (Санкт-Петербург, 2002 г.; Урумчи, КНР, 2005)
- Рабочее совещание по проблемам вечной мерзлоты (Фэрбенкс, США, 2004 г.)
- Вторая Европейская конференция по проблемам вечной мерзлоты (Потсдам, Германия, 2005 г.)
- Третье научное совещание рабочей группы по численному экспериментированию по проблеме систематических ошибок в климатических моделях и моделях численного прогноза погоды (Сан-Франциско, США, 2007 г.)
- Семинары отдела динамической метеорологии и заседания Ученого Совета ГГО им. А.И. Воейкова.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 22 работы, 9 из которых – в рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях, в том числе в журналах «Известия РАН: Физика атмосферы и океана», «Метеорология и гидрология», «Криосфера Земли», «Journal of Climate», «Journal of Hydrometeorology». Всего за время научной деятельности автора опубликовано 28 работ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем работы составляет 112 страниц, включая 28 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 107 наименований.

2. Содержание диссертации

Введение

Во Введении обоснована актуальность исследования, сформулированы его цели и задачи, изложен метод исследования; а также показана научная новизна полученных результатов.

Глава 1. Современные методы расчета процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы.

В первой главе выполнен обзор существующих методов параметризации тепло- и влагообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой, а также процессов в деятельном слое почвы, используемых в современных глобальных климатических моделях.

Глава 2. Методы параметризации процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы в климатических моделях ГГО.

Во второй главе диссертации дается описание новой схемы параметризации процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы, разработанной и реализованной в глобальной модели атмосферы ГГО. Приводится анализ качества расчетов современного климата при заданной температуре океана и морского льда с учетом прежней и новой схем параметризации процессов на подстилающей поверхности, также с учетом уточненных схем расчета конвекции и многоярусной слоистой облачности. Расчеты и сравнительный анализ проводились в рамках двух международных проектов по сравнению атмосферных моделей AMIP-I и AMIP-II.

В первом параграфе рассматривается система уравнений, описывающих вертикальный перенос тепла в деятельном слое почвы. В предыдущем варианте модели теплообмен рассчитывался в трехметровом деятельном слое почвы, состоящем из трех неодинаковых по толщине слоев: 0.1, 0.9 и 2.0 м. Влажообмен учитывался только в двух верхних слоях почвы. В новом варианте модели тепло- и влагоперенос осуществляется в трехметровом слое почвы, который представлен четырьмя слоями: $\Delta z_1=0.1\text{м}$, $\Delta z_2=0.25\text{м}$, $\Delta z_3=0.65\text{м}$, $\Delta z_4=2.0\text{м}$. При численном описании тепло- и влагопереноса в почве все физические процессы полагаются одномерными, поскольку вертикальные градиенты температуры и влаги значительно больше, чем горизонтальные. Расчет температуры для каждого из рассматриваемых слоев осуществляется с помощью системы разностных уравнений теплопроводности. На границе раздела атмосфера-почва суммарный поток тепла, поступающий в почву, определяется из уравнения теплового баланса. На нижней границе деятельного слоя поток тепла отсутствует.

Во втором параграфе дается описание метода расчета испарения с подстилающей поверхности. Полагается, что каждая ячейка модельной сетки может включать три типа поверхности: вода, лед, суша. В свою очередь суша может включать участки оголенной почвы; участки, занятые различного вида растительностью и участки, покрытые снегом. При этом полагается, что некоторая доля выпадающих осадков не проникает в почву, а перехватывается растительным покровом и накапливается на листе в виде тонкой пленки. Таким образом растительный покров представляет собой водный резервуар (резервуар перехваченных осадков), из которого вода может испаряться при благоприятных условиях. При расчете испарения с почвы свободной от снега рассматриваются три типа поверхности с учетом занимаемой ими площади элементарной ячейки сетки. Вводятся следующие обозначения:

A_w – доля суши, покрытая слоем осадков или сконденсировавшейся влаги на растительности и почве;

$A_v(1 - A_w)$ – доля суши с сухой (без накопленной воды) растительностью, где A_v – доля суши, занятая растительностью в ячейке модельной сетки;

$(1 - A_v)(1 - A_w)$ – доля сухой почвы без растительного покрова.

Полное испарение представляет собой сумму испарений с соответствующих долей почвы:

$$E = A_w E_w + A_v(1 - A_w) E_v + (1 - A_v)(1 - A_w) E_g, \quad (1)$$

здесь

E_w - испарение перехваченных осадков;

$$E_w = -\frac{\rho}{r_a} (q_N - q_m(T_s, p_s)), \quad (1.1)$$

$r_a = (C_H |V_N|)^{-1}$ - аэродинамическое сопротивление; V_N - скорость ветра на нижнем модельном уровне, ρ - плотность воздуха; $q_m(T_s, p_s)$ - удельная влажность насыщения воздуха при температуре T_s на границе раздела воздух-почва; C_H - коэффициент обмена; q_N - удельная влажность на нижнем модельном уровне

E_v – транспирация с сухой доли растительного покрова;

$$E_v = -\frac{\rho}{r_a + r_c} (q_N - q_m(T_s, p_s)), \quad (1.2)$$

r_c - сопротивление растительного покрова

E_g – испарение с оголенной (без растительности) почвы.

$$E_g = -\beta \frac{\rho}{r_a} (q_N - q_m(T_s, P_s)) \quad (1.3)$$

Доля суши A_w , занятая резервуаром перехваченных осадков определяется отношением влагосодержания этого резервуара к его максимально возможному влагозапасу

$$A_w = \min\left(1, \frac{W_w}{W_{wmx}}\right), \quad (2)$$

где W_w – влагосодержание (м) этого резервуара, а W_{wmx} – максимально возможный его влагозапас, который рассчитывается по формуле:

$$W_{wmx} = [A_v L_{AI} + (1 - A_v)] W_{max}, \quad (3)$$

где L_{AI} – индекс лиственного покрова, W_{max} – максимальное количество воды, которое может накапливаться на одном листе или сохраняться в виде пленки на гладкой поверхности. Изменение запаса воды в нем описывается уравнением

$$\frac{dW_w}{dt} = (\rho_w)^{-1} (N_w - A_w E_w), \quad (4)$$

здесь $A_w E_w$ - испаряющаяся (или конденсирующаяся, в зависимости от знака) вода с влажной растительности (почвы) ($\text{кг м}^2 \text{с}^{-1}$); N_w - перехваченная лиственной частью осадков ($\text{кг м}^2 \text{с}^{-1}$), которая затем может испаряться. Поскольку этот водный резервуар имеет очень малую влагоемкость, он может заполняться и полностью испаряться за один временной шаг. Чтобы избежать вычислительных проблем при решении уравнения (4), используется методика, предложенная в работе [Viterbo & Beljaars, 1995]. Принимая во внимание соотношение (2), с учетом которого $A_w(W_w)E_w$ линейно зависит от W_w , уравнение (4) можно представить в виде

$$\frac{W_w^{\tau+1} - W_w^\tau}{\Delta t} = (\rho_w)^{-1} \left[A_w(W_w^\tau) E_w + \frac{E_w}{W_{wmx}} (W_w^{\tau+1} - W_w^\tau) \right] \quad (5)$$

Здесь $W_w^{\tau+1}$ - новая величина влагозапаса резервуара перехваченных осадков после учета испарения. Уравнение (5) гарантирует положительное значение $W_w^{\tau+1}$. Фактическая скорость испарения из водного резервуара на растительности E_w^* вычисляется по разности $\rho_w (\Delta t)^{-1} (W_w^{\tau+1} - W_w^\tau)$. Часть осадков, перехватываемая лиственной и накапливаемая в водном резервуаре, вычисляется по формуле

$$N_w = \min\left(c_i A_v P^*, \rho_w \frac{W_{wmx} - W_w^{\tau+1}}{\Delta t}\right) \quad (6)$$

$P^* = P / \mu$ - количество осадков с учетом неоднородности их распределения в ячейке. Осадки выпадают на доли площади μ ячейки сетки; P - фактические атмосферные осадки; c_i - эффективный коэффициент перехвата осадков лиственной ($c_i = 0.25$). Параметр, характеризующий неоднородное выпадение осадков в ячейке сетки зависит от типа осадков; для конвективных осадков $\mu = 0.5$, для крупномасштабных осадков $\mu = 1$.

Метод параметризации перехвата осадков лиственной, предложенный в работе [Viterbo and Beljaars, 1995] и основанный на первоначальной идее Руттера [Rutter et al., 1972; Rutter et al., 1975], является одним из наиболее упрощенных методов, обеспечивающих сохранение массы воды.

Транспирация. Корневая система растений располагается равномерно в трех верхних слоях почвы, рассматриваемых в модели, а для высокой растительности (лес) – в четырех слоях. Извлекаемая корневой системой вода со всего деятельного слоя почвы равна транспирации воды с растительного покрова в атмосферу. Скорость испарения с растительности той части влаги, которая извлекается корневой системой, зависит от ряда факторов, в том числе от активной части солнечной радиации и от доступной для транспирации почвенной влаги, определяемой в зависимости от величины полевой влагоемкости и влажности увядания растений.

При вычислении испарения с почвы без растительного покрова используется параметр β , характеризующий эффективность испарения.

В третьем параграфе приводится описание расчета поверхностного стока в модели. Поверхностный сток рассчитывается по методу, предложенному в работе [L.Dumenil and E.Todini, 1992], предполагающему неявный учет подсеточной неоднородности максимальной влагоемкости почвы. Величина поверхностного стока зависит от влагосодержания верхнего слоя и количества влаги, поступающей на поверхность почвы.

В четвертом параграфе рассматривается система уравнений для описания водного баланса деятельного слоя почвы. Водный баланс почвы определяется интенсивностью осадков, таянием снега, испарением, 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 используется объемная влажность почвы θ ($\text{м}^3/\text{м}^3$). Расчет влагосодержания деятельного слоя почвы производится с помощью четырехслойной модели, толщины слоев которой совпадают с толщинами слоев в модели теплообмена. В расчетах используются уравнения, описывающие диффузию и транспирацию воды растениями и гидравлическую проводимость в рассматриваемом слое почвы. На границе раздела атмосфера-почва используется условие баланса влаги, на нижней границе деятельного слоя почвы полагается, что отсутствует гидравлическая диффузия и проводимость.

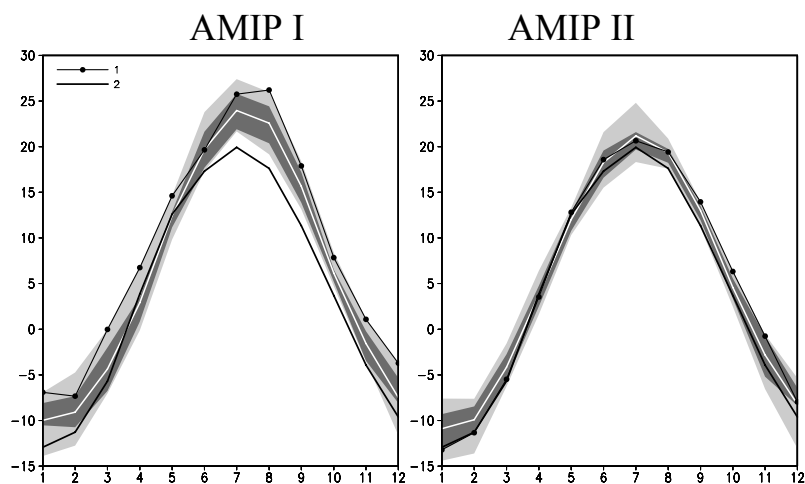
При реализации описанной схемы использовались следующие глобальные архивы данных: географические распределения растительного покрова и лесов (доля растительности и леса в ячейке сетки), индекса лиственного покрова, полевой влагоемкости почвы, шероховатости растительного покрова, альбедо бесснежной поверхности.

В пятом параграфе выполнен анализ качества воспроизведения современного климата моделями ГГО в рамках Международного проекта по сравнению атмосферных моделей AMIP. Во второй фазе этого проекта (AMIP-II) участвовала версия модели ГГО T30L14 (MGO-2), в которую, помимо новой схемы параметризации процессов тепло- и влагообмена на подстилающей поверхности и в деятельном слое суши, был внесен ряд изменений в описание других физических процессов, включая расчет облачности. В рамках испытания новой версии модели атмосферы MGO-2 проводился всесторонний анализ расчетных характеристик климата и валидация их относительно данных наблюдений на водосборах крупных рек (Амазонка, Волга, Енисей, Конго Лена, Миссисипи, Обь), водосборе Балтийского моря и в регионах с особыми условиями климатического режима (Антарктида, Аравия, Гренландия, Индостан, арктический бассейн, отдельные акватории Атлантического и Тихого океанов). Сравнения данных, рассчитанных по моделям и полученных из наблюдений, проводились для отдельных составляющих теплового баланса

(температура воздуха у поверхности Земли, радиационный баланс у поверхности, а также основных составляющих водного баланса (осадки, испарение, сток, влагосодержание в столбе атмосферы)).

На рис.1 показан сезонный ход температуры воздуха у поверхности Земли, рассчитанный в моделях и полученный по данным наблюдений на водосборах. Результаты анализа показывают, что, как правило, ансамблевые характеристики климата лучше согласуются с данными наблюдений, чем каждая отдельно взятая модель. Причиной тому являются следующие обстоятельства: каждая модель содержит только ей присущие систематические ошибки, разные по величине и знаку. Если рассматривается ансамбль независимых моделей, ошибки каждой такой модели являются, как правило, случайными и поэтому фильтруются при осреднении по достаточно большой выборке моделей. Это означает, что расчеты характеристик климата по ансамблю можно рассматривать как заслуживающие доверия для тех переменных, наблюдения за которыми вообще отсутствуют.

Волга-Урал



Енисей

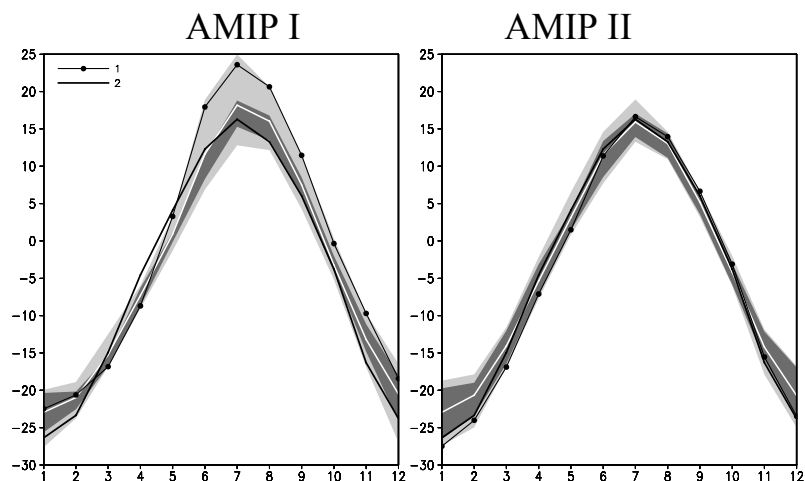


Рис.1. Годовой ход приземной температуры воздуха (град. С) на водосборах рек Волга-Урал и Енисей, рассчитанный в модели атмосферы ГГО (для АМIP-I и АМIP-II), и полученный по данным наблюдений. 1-модель ГГО, 2- данные наблюдений. Темная штриховка - область, в которую попадают 50% средних модельных значений характеристики, светлая штриховка – то же, но для 80%. Белая линия - среднее по ансамблю моделей данной выборки.

Проведенный анализ показал, что современные модели достаточно реалистично воспроизводят региональный климат, особенно его термический режим. Несколько меньший разброс оценок годового хода также показывает,

что качество моделей АМІР-II выше по сравнению с моделями АМІР-I практически по всем рассмотренным характеристикам. Это в равной степени относится и к новой версии модели атмосферы ГГО. Однако правильный расчет региональных осадков является наиболее сложной задачей для многих моделей атмосферы, включая модель ГГО. Заметные погрешности осадков обнаруживаются в расчетах амплитуды и фазы годового хода на ряде водосборов (например, р. Енисей, рис.2). Корреляция модельных осадков с данными наблюдений оказывается ниже, чем корреляции по другим характеристикам. Более того, независимо полученные климатические архивы осадков показывают значительные расхождения между собой, указывая тем самым, что качество этих баз данных невысокое.

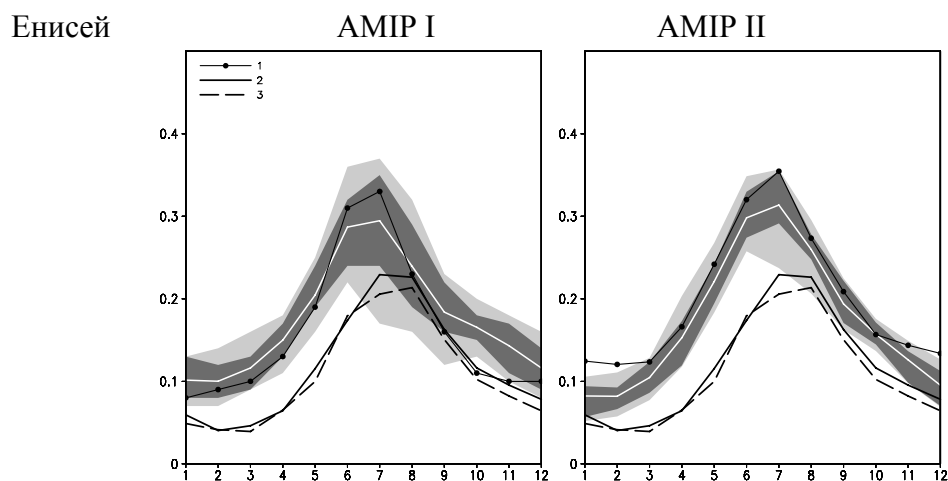


Рис.2. Сезонный ход осадков (см/сут) водосбор р.Енисея, рассчитанный в моделях и полученный по данным наблюдений. 1-модель ГГО, 2, 3- данные наблюдений.

Глава 3. Влияние аномалий влажности почвы на предсказуемость режимов атмосферы.

В этой главе исследуется влияние аномалий влагосодержания почвы на месячную и сезонную предсказуемость атмосферных режимов в различных регионах земного шара, включая территорию России и рассматривается потенциальная возможность улучшения качества месячных и сезонных прогнозов приземной температуры воздуха и осадков путем возможного использования в прогностической системе крупномасштабных характеристик влажности почвы. В современных прогностических системах в качестве начальных используются рассчитанные по модели (климатические) распределения влажности. Исследование выполнено на основе серии экспериментов с моделью общей циркуляции атмосферы T42L14, включающей новую схему параметризации процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы.

Первый параграф описывает постановку экспериментов, целью которых было определение так называемой потенциальной месячной (сезонной) предсказуемости приземной температуры воздуха и осадков, т. е. максимально достижимого теоретически уровня предсказуемости, обусловленного влиянием аномалий влажности деятельного слоя почвы на континентах. Такого рода оценки можно получить, если принять в качестве реального состояния атмосферы результаты расчетов по «идеальной» модели общей циркуляции атмосферы, считая, что эта модель не содержит систематических ошибок, а используемые данные наблюдений обладают достаточной точностью и

полнотой. Серия численных экспериментов была выполнена с указанной моделью атмосферы и деятельного слоя почвы при заданных фактических значениях среднемесячных ТПО за период 1979-1999 годы. Средние суточные глобальные поля большого набора переменных, как для атмосферы, так и для деятельного слоя почвы, рассчитанные за период 1979-1999 годы, рассматривались как отражающие реальное (контрольное) состояние атмосферы, при котором атмосфера и деятельный слой почвы являются термодинамически согласованными.

Затем были проведены две серии ансамблевых сезонных прогнозов для того же самого периода. В первой серии прогнозов в качестве начальных условий использовались инициализированные поля характеристик атмосферы и деятельного слоя почвы, то есть учитывались аномалии влагосодержания и температуры деятельного слоя почвы, полученные в контрольном эксперименте. Во второй серии инициализированными были лишь атмосферные поля, а за начальное состояние влажности и температура почвы были взяты осредненные поля за 1979-1999 годы. Другими словами, в первом случае на континентах учитывались аномалии влажности почвы в начальных данных (если таковые присутствовали). Во втором случае в качестве начального распределения влажности и температуры почвы использовался модельный климат. Каждый прогноз включал шесть членов ансамбля и выполнялся сроком на четыре месяца от первого дня апреля, мая, июня и июля, когда роль влагообмена между атмосферой и подстилающей поверхностью становится наиболее заметной.

Второй параграф посвящен анализу выполненных экспериментов.

По результатам ансамблевых расчетов были выполнены оценки потенциальной предсказуемости ряда характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Для получения этой оценки использовался метод дисперсионного анализа, известный в зарубежной литературе как ANOVA. За оценку предсказуемости R^2 принимается отношение изменчивости, обусловленной влиянием граничных условий (аномалиями температуры океана и влажности почвы), к полной изменчивости исследуемой характеристики.

$$R^2 = S_{bc}^2 / S^2,$$

где S_{bc}^2 - изменчивость, вызванная влиянием граничных условий, $S^2 = S_{bc}^2 + S_{ic}^2$ - суммарная изменчивость; S_{ic}^2 - изменчивость, обусловленная непредсказуемыми вариациями атмосферной циркуляции.

Оценки успешности прогнозов проводились для средних за декаду и месяц аномалий приземной температуры воздуха, осадков, температуры воздуха на 850 гПа, геопотенциала на 700 гПа и 500 гПа. Эти оценки рассчитывались как в целом для земного шара, так и для территории России и соседних регионов (Балтийский регион, водосборы рек Днепр-Дон, Печора-Северная Двина, Волга-Урал, Обь, Енисей и Лена), а также для ряда регионов низких широт. Аномалии рассчитывались как отклонения средних декадных и месячных величин от соответствующих средних многолетних их значений за период 1979-1999 гг., полученных из контрольного расчета.

Анализ показал, что прогнозы, выполненные от начальной даты 1 апреля за период 1979-1999 гг. с учетом и без учета аномалии влажности почвы на континентах не показывают заметных различий в успешности расчетов средних месячных и 10-суточных значений приземной температуры воздуха и осадков на территории России. Это было вызвано тем, что влаго- и теплообмен между подстилающей поверхностью и атмосферой еще недостаточно интенсивен в это время года в средних широтах и поэтому не оказывает заметного влияния на процессы вблизи поверхности Земли и в нижней

тропосфере. Однако в сериях расчетов, которые начинались от 1 июня, влияние аномалий влажности почвы становятся уже заметными. Сравнительный анализ месячных прогнозов, рассчитанных при инициализированной (с учетом аномалий) и климатической (без учета аномалий) влажности почвы в начальный момент показывает, что первые имеют более высокую успешность для некоторых переменных вблизи поверхности Земли по сравнению со вторыми. Это преимущество особенно хорошо выражено в распределениях коэффициентов корреляции для аномалий приземной температуры воздуха в средних и низких широтах на первый месяц прогноза (Рис.3). На второй месяц более высокие коэффициенты корреляции при инициализации влажности почвы сохраняются только для низких широт. Аналогичная картина обнаруживается в распределениях коэффициента корреляции для аномалий температуры воздуха на уровне 850 гПа и высоты геопотенциала на уровне 700 гПа.

Что касается повышения качества прогноза месячных осадков в результате учета начального распределения аномалий влажности почвы, то такая возможность практически отсутствует для средних широт и слабо проявляется лишь в отдельных регионах тропической зоны на первый и второй месяцы прогноза.

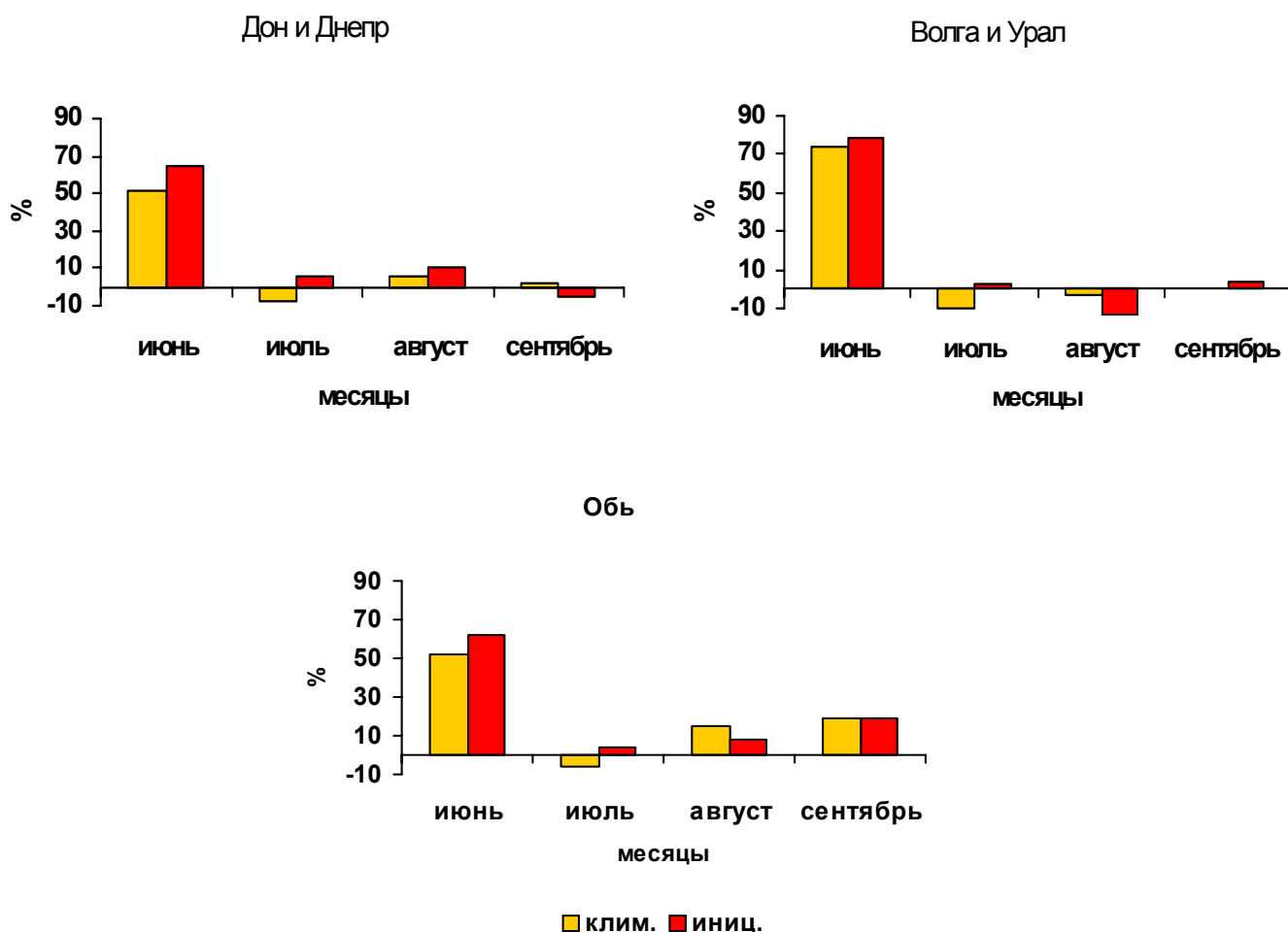


Рис.3 Корреляция между прогностическими и «фактическими» средними месячными аномалиями приземной температуры воздуха в экспериментах с инициализированными и климатическими начальными значениями влажности почвы

Глава 4. Расчет эволюции характеристик гидросферы и криосферы суши в 20-м и 21-м веках с использованием ансамбля глобальных климатических моделей нового поколения.

В четвертой главе приведены результаты исследования водного баланса на водосборах крупных рек и элементов криосферы (снежного покрова и многолетнемерзлых и сезонномерзлых грунтов) на основе ансамблевых расчетов с МОЦАО нового поколения. В качестве МОЦАО нового поколения рассматривались глобальные модели климата, которые принимали участие в подготовке 4-го доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата. В анализе использованы результаты расчетов по 21 МОЦАО. Основное внимание уделяется российским регионам.

В первом параграфе анализируются особенности воспроизведения современными МОЦАО осадков и испарения на водосборах Оби, Енисея и Лены. Сравнение модельных расчетов с оценками [Serreze et al., 2003], полученными на основе данных наблюдений, а также с данными реанализа ERA-40 для периода 1960-1989 гг. показало, что рассчитанные осадки заметно различаются между моделями, особенно летом, но при этом большинство моделей реалистично воспроизводят сезонный ход осадков, характеризующийся летними максимумами и зимними минимумами. Исключение составляют две модели (GISS-ER и GISS-EH), в которых сезонный ход осадков над бассейнами Оби и Енисея имеет минимум летом. По сравнению с оценками ERA-40 и [Serreze et al., 2003], среднее по ансамблю из 21 модели (равно как и по ансамблю из 19 моделей, из которого исключены две модели GISS) занижает летние осадки в бассейне Оби и завышает осадки в отдельные сезоны в остальных бассейнах. Среди вероятных причин отклонений расчетных осадков от наблюдаемых следует отметить погрешности в расчетах атмосферной циркуляции зимой и разнообразие используемых в МОЦАО параметризаций атмосферной конвекции и гидрологии суши. Относительно среднегодового количества осадков можно сказать, что модели успешно воспроизводят наблюдаемые значения для рассматриваемых бассейнов. Различия между средними по ансамблю и данными наблюдений для Оби и Енисея не превышают 0.1 мм/сут, для Лены различия составляют 0.2 мм/сут.

Среднегодовая разность Р-Е над крупными водосборами суши является мерой среднегодового речного стока. Среднегодовые оценки Р-Е, полученные по ансамблю моделей, также хорошо согласуются с данными наблюдений: соответственно, 0.41 против 0.48 мм/сут. для Оби, 0.52 против 0.55 мм/сут. для Енисея, 0.49 против 0.51 мм/сут. для Лены. Эволюция модельных осадков и стоков с водосборов в первые две трети 20-го века не показывает каких-либо систематических тенденций.

В 21-м веке осадки на рассматриваемых водосборах возрастают не во все сезоны. Например, в бассейне Оби примерно половина моделей к концу 21-го века дает уменьшение летних осадков для сценария А2. Среднегодовые значения Р-Е над водосборами и, соответственно, речного стока возрастают во всех сценариях. Из трех рассматриваемых крупнейших российских рек наиболее значительное относительное увеличение стока получилось для Лены (33% к концу 21-го века для сценария А2); наименьшее – для Оби (14% для А2, ср. с 20% Лены для «слабого» сценария В1). Увеличение накопленной к концу зимы массы снега и увеличение скорости его таяния весной повышает вероятность крупных весенних паводков на водосборах Енисея и Лены.

Во втором параграфе кратко изложено описание криосферных компонентов МОЦАО и метод расчета параметров многолетнемерзлых грунтов. МОЦАО позволяют рассчитывать климатические изменения

отдельных элементов криосферы, а также исследовать их связь с другими характеристиками климатической системы. 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, однако положительная обратная связь между таянием многолетнемерзлых грунтов и потеплением климата за счет дополнительной эмиссии парниковых газов ни в одной из этих моделей не учитывается.

В последнее десятилетие традиционным стал автономный метод расчета эволюции многолетнемерзлых грунтов, в котором на границе раздела поверхность земли-атмосфера задается температура и толщина снежного покрова, полученные в МОЦАО, а также задаются характеристики тех или иных типов грунтов и видов растительности. В настоящей работе для расчета характеристик многолетнемерзлых грунтов использована одномерная многоуровневая модель 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, рассчитанные в узлах регулярной сетки.

В третьем параграфе анализируются расчеты современного состояния и эволюции криосферы в 20-м веке. МОЦАО показывают большой разброс в расчетах эволюции площади снежного покрова суши в 20-м веке, согласуясь, в целом, в оценках сокращения ее в конце 20-го века. Линейные тренды среднегодовой площади снежного покрова в Северном полушарии были рассчитаны для всего 20-го века и для периода 1980-1999 гг. Эти периоды выбраны в соответствии с исходным предположением о наличии антропогенного сигнала в глобальном потеплении климата в 20-м веке в целом и, особенно, в его конце [IPCC, 2001]. В обоих случаях почти все члены ансамбля демонстрируют сокращение снежного покрова. Для периода 1980-99 гг. исключение составляют 2 модели (INM_CM3.0 и ECHAM5/MPI-OM). Величина тренда для всей совокупности модельных данных оказывается сопоставимой с соответствующей оценкой по данным наблюдений: соответственно, -325 тыс. против -396 тыс. км²/10 лет. Тренды площади снега для всего 20-го века систематически меньше, а величина среднего по ансамблю тренда среднегодовой площади снега составляет -62 тыс. км²/10 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.

К числу наблюдаемых характеристик вечной мерзлоты (ВМ) и наиболее востребованных для практических целей относится глубина сезонноталого слоя (СТС), а в регионах, в которых ВМ отсутствует – глубина сезонномерзлого слоя (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. Недавно была предпринята попытка обобщения данных стандартных наблюдений за температурой почвы на разных глубинах в слое 0-3.2 м [Frauenfeld et al., 2004] для территории России. Статистический анализ был 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 трехметровом слое почвы. Расчетные глубины СТС и СМС осреднены

по соответствующим регионам. Применение аналогичного анализа к расчетным вертикальным распределениям температуры в узлах регулярной одноградусной сетки, позволяет сопоставить модельные данные и данные, полученные на основе наблюдений. Результат такого сопоставления для периода 1930-1990 гг. показан на рис.4. На рисунке приведены отклонения глубин СТС и СМС от среднего значения соответствующих характеристик за период 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 20-го века. 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. Анализ показывает, что линейный тренд модельной эволюции осредненных значений глубин СТС во второй половине 20-го века меньше выражен, чем соответствующий экспериментальный тренд за период 1956-1990 гг. (6 см за 10 лет). Для глубин СМС линейный тренд удовлетворительно согласуется с трендом, полученным по данным наблюдений для периода 1956-1990 гг. (-10 см за 10 лет).

В четвертом параграфе приводятся оценки изменений криосферы суши (КС) в 21-м веке. Анализ показал, что наибольшие изменения площади вечной мерзлоты, а также глубин сезонного протаивания (промерзания) происходят при реализации сценария А2 эмиссии парниковых газов. Максимальные изменения глубины СТС в конце 21-го века по отношению к базовому периоду 1980-1999 гг. оставляют около 2 м и сосредоточены вблизи южной границы зоны ВМ. Изменения глубины СМС составляют от 10 см до 1 м. Очевидный интерес представляет момент времени, когда то или иное изменение снежного покрова с заданной априори вероятностью можно расценивать как проявление глобального потепления: т.е. как вынужденное изменение, а не результат собственной изменчивости климатической системы. Анализ показал, что в Северном полушарии вынужденные изменения и среднегодовой, и февральской площади снега произошли 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.

В пятом параграфе обсуждаются приоритетные исследования, направленные на дальнейшее совершенствование учета криосферных процессов в МОЦАО.

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. Дальнейший прогресс в уменьшении неопределенностей оценок будущих изменений климата следует связывать с совершенствованием криосферных компонентов МОЦАО. В частности, предметом дальнейших исследований должны стать взаимодействие КС с растительностью и гидрологическими процессами, происходящими на водосборах арктических рек.

Развитие региональных климатических моделей может обеспечить воспроизведение более реалистичной картины распределения снежного покрова на суше и характеристик ВМ на пространственных масштабах, которые не могут быть явно описаны с помощью глобальных МОЦАО.

Наконец, учет положительной обратной связи между потеплением климата и таянием ВМ за счет возможной дополнительной эмиссии

парниковых газов в атмосферу в расчетах эволюции глобальной климатической системы с помощью МОЦАО может внести коррективы в существующие оценки будущих изменений климата.

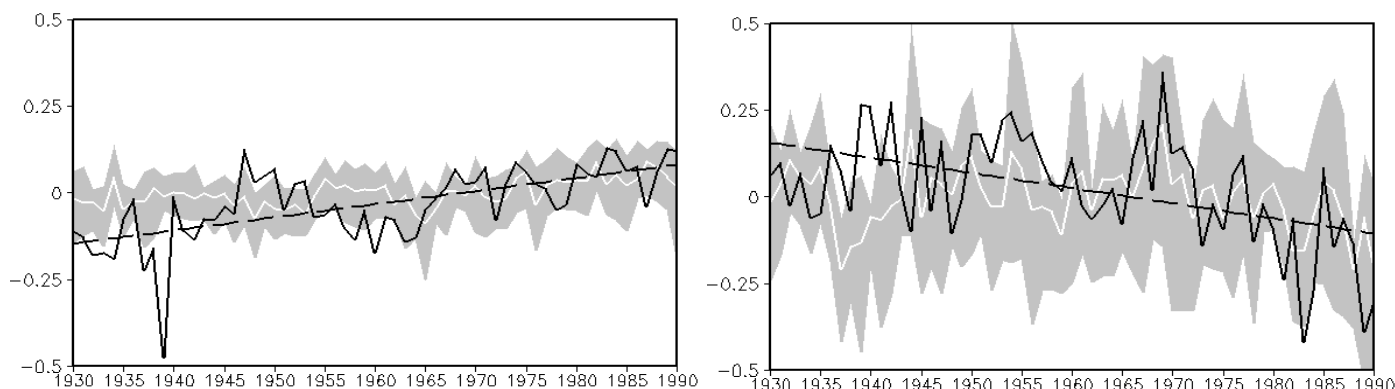


Рис.4 Отклонения [м] глубин сезонного протаивания (слева) и сезонного промерзания (справа) от соответствующего среднего значения за период 1930-1990 гг. по данным модельных расчетов (белая линия) и данным наблюдений (черная линия) [Frauenfeld et al., 2004]. Выделенная серым цветом область показывает разброс модельных оценок – зону, в которую попадают 75% средних модельных значений. Черная прерывистая линия – линейный тренд, рассчитанный по данным наблюдений за период 1930-1990 гг.

Заключение

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана и использована в исследованиях новая схема параметризации процессов на подстилающей поверхности и в деятельном слое почвы, включающая учет влияния растительности и более детальное описание гидрологических процессов на поверхности и в деятельном слое почвы.
2. По результатам экспериментов, выполненных в рамках международных проектов АМІР-I и АМІР-II, проведен анализ качества воспроизведения современными МОЦА сезонных особенностей различных характеристик климата на водосборах крупных рек земного шара. Показано, что:
 - современные модели достаточно реалистично воспроизводят основные характеристики регионального климата, особенно термический режим вблизи подстилающей поверхности;
 - качество моделей АМІР-II улучшилось, по сравнению с АМІР-I;
 - результаты моделирования современного климата с помощью новой версии МОЦА ГГО, которая участвовала в АМІР-II, оказались существенно лучше полученных с предыдущей версией модели (АМІР-I);
 - во всех без исключения рассмотренных моделях атмосферы качество расчета региональных осадков остается недостаточно высоким и требует дальнейшего улучшения.
3. С помощью МОЦА ГГО исследовано влияние аномалий влагосодержания почвы на месячную и сезонную предсказуемость режимов атмосферы над различными регионами земного шара и особенно над территорией России. В результате проведенных экспериментов установлено следующее:
 - учет аномалий влагосодержания деятельного слоя почвы может увеличивать успешность предсказания средних аномалий некоторых

- метеорологических переменных, в частности, приземной температуры воздуха, на временных масштабах до сезона;
- повышение успешности зависит от многих факторов и, особенно, от рассматриваемого региона и сезона. Заметное повышение успешности прогнозов приземной температуры наблюдается летом в северной Евразии на сроки до одного месяца. В низких широтах более высокая успешность прогнозов приземной температуры может наблюдаться на сроки до сезона;
 - для летних месяцев учет влажности почвы может повысить месячную и даже сезонную предсказуемость приземной температуры воздуха преимущественно в южных регионах России;
 - начальные аномалии влажности почвы практически не сказываются на прогнозе осадков;
 - данные оценки, по-видимому, зависят от разрешения используемой в исследовании модели атмосферы, а также от того, насколько реалистично модель воспроизводит аномалии влагосодержания почвы и реакцию атмосферы на эти аномалии. Вместе с тем, полученные результаты, по-видимому, качественно верно отражают сезонную и региональную зависимость успешности прогнозов приземной температуры и осадков от аномалий влажности почвы.
4. На основе ансамблевых расчетов с МОЦАО нового поколения проанализирована эволюция осадков и испарения на водосборах Оби, Енисея и Лены в 20-м и 21-м веках. Проведенный анализ показал, что:
- характерной особенностью модельных расчетов гидрологических характеристик для рассмотренных водосборов является значительный разброс между моделями, но применение ансамблевого осреднения позволяет получить удовлетворительное согласие с данными наблюдений
 - в 21-м веке осадки на рассматриваемых водосборах возрастают преимущественно зимой. Среднегодовые значения Р-Е на водосборах и, соответственно, речной сток в Северный ледовитый океан возрастают при всех сценариях роста парниковых газов.
 - Рост накопленной в конце зимы массы снега и увеличение скорости его таяния весной повышает вероятность крупных весенних паводков на водосборах рек Енисея и Лены.
5. На основе ансамблевых расчетов с МОЦАО нового поколения и одномерной многоуровневой моделью теплопередачи в грунтах, выполнен расчет эволюции криосферы суши в 20-м и 21-м веках. Анализ эволюции элементов криосферы (снежного покрова суши и многолетнемерзлых и сезонномерзлых слоев почвы) показал следующее:
- современные границы снежного покрова суши удовлетворительно воспроизводятся ансамблем моделей в целом; при этом модели показывают значительный разброс оценок площади и толщины снега. В среднем, согласуясь с наблюдаемыми трендами, модельные тренды характеристик снежного покрова суши существенно возрастают к концу 20-го века.
 - Положение наблюдаемой границы многолетнемерзлых грунтов удовлетворительно воспроизводится по данным ансамбля МОЦАО. Тренды аномалий глубин СТС и СМС, осредненные по соответствующим регионам, согласуются с трендами природных аномалий.
 - Изменения криосферы суши в результате роста содержания парниковых газов в атмосфере становятся статистически значимыми на уровне 5% уже в последние десятилетия 20-го века.

- Смещение границы зоны вечной мерзлоты к северу под влиянием потепления климата к концу 21-го века существенно зависит от сценария эмиссии парниковых газов и аэрозолей. Диапазон изменений глубины СТС по отношению к современным значениям составляет от 20см до 2м, а диапазон изменений глубины СМС – от 10 см до 1м. Модельные оценки позволяют отчетливо выделить переходную зону, в которой на протяжении 21-го века режим протаивания может смениться режимом промерзания.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК

1. Павлова Т.В., В.М. Катцов, Е.Д. Надежина, П.В. Спорышев, В.А. Говоркова. Расчет эволюции криосферы в 20-м и 21-м веках с использованием глобальных климатических моделей нового поколения // Криосфера Земли. – 2007. (в печати)
2. Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надёжина Е.Д., Павлова Т.В., Семиошина А.А. Моделирование и анализ возможностей экспериментальной проверки эволюции термического состояния многолетнемерзлых грунтов // Криосфера Земли. – 2007. – т. 11. – № 1. – С. 29-36.
3. Kattsov V.M., Walsh J.E., Chapman W.L., Govorkova V.A., Pavlova T.V., Zhang, X. Simulation and projection of arctic freshwater budget components by the IPCC AR4 global climate models // Journal of Hydrometeorology. – 2007. – Vol.8. (in press)
4. Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надёжина Е.Д., Павлова Т.В. Модельные оценки изменений температуры воздуха и эволюция теплового состояния многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли, 2005. – т.9 – № 3. – С. 36-44
5. Малевский-Малевич С.П., Молькентин Е.К., Надёжина Е.Д., Павлова Т.В., Шкляревич О.Б. Оценки возможных изменений глубин протаивания многолетнемерзлых грунтов на территории России в XXI веке. // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 12. – С. 80-88.
6. Катцов В.М., Вавулин С.В., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Сценарии изменения климата Арктики в 21-м веке // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 10. – С. 5-19.
7. Walsh, J.E., Kattsov V., Chapman W., Govorkova V., Pavlova T. Comparison of Arctic climate simulations by uncoupled and coupled global models // Journal of Climate. – 2002. – Vol. 15. – P. 1429-1446.
8. Школьник И.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В. Региональная гидродинамическая модель атмосферы для исследования климата на территории России // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 4. – С.32-49.
9. Катцов В.М., Мелешко В.П., Гаврилина В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Пресноводный бюджет полярных регионов по оценкам моделей общей циркуляции атмосферы. // Известия РАН: Физика атмосферы и океана. – 1998. – № 4. – С. 479-489.

Публикации в других изданиях:

10. Спорышев П.В., Мелешко В.П., Павлова Т.В., Говоркова В.А., Матюгин В.А. Влагодоборот бассейна Каспийского моря, наблюдаемый и рассчитанный по моделям общей циркуляции атмосферы. // В сборнике:

- Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. Ред. И.А. Шикломанов, А.С.Васильев. – 2003. – СПб, Гидрометеоиздат. С. 6-23.
11. Павлова Т.В., Мелешко В.П., Говоркова В.А. Характеристики теплового и водного баланса на водосборах крупных рек в модели атмосферы ГГО, рассчитанные в рамках международного сравнения моделей атмосферы АМІР-I и АМІР-II. // Моделирование общей циркуляции атмосферы и климата. Труды ГГО им. А.И.Воейкова. 2001. – Вып. 550. – С. 85-109.
 12. Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Матюгин В.А., Спорышев П.В., Павлова Т.В., Вавулин С.В., Школьник И.М., Зубов В.А., Гаврилина В.М., Говоркова В.А. Современное состояние глобальной модель общей циркуляции атмосферы ГГО (версия MGO-2) // Моделирование общей циркуляции атмосферы и климата. Труды ГГО им. А.И. Воейкова. 2001. – Вып. 550. – С. 3-43.
 13. Pavlova T., V. Kattsov, V. Meleshko Systematic Errors in the IPCC AR4 Model Simulations of Atmospheric and Terrestrial Components of the Arctic Ocean Freshwater Budget // WGNE/PCMDI Systematic Errors Workshop (12-16 February, 2007, San Francisco, USA). – 2007. – P.79.
 14. Pavlova, T.V., Malevsky-Malevich, S.P., Molkentin E.K., Nadyozhina E.D. An Assessment of Deep Ground Temperature Spatial Distributions in Permafrost Regions of Russia // Terra Nostra. Abstracts of the Second European Conference on Permafrost, 12-16 June 2005. Potsdam, Germany, P.143.
 15. Kattsov V., Pavlova T., Govorkova V. High-latitude climate in the 20th and 21st century as simulated with IPCC AR4 models // Proc. “The 3rd Korea-Russia Joint Workshop on Climate Change and Variability”. June 7-8, 2005, KMA, Korea. – 2005. – P. 1.2.2-1.2.3.
 16. Катцов В.М., Алексеев Г.В., Бекряев Р.В., Вавулин С.В., Говоркова В.А., Павлова Т.В., Спорышев П.В. Высокие широты в глобальных климатических моделях: расчеты современного климата и его возможных изменений в 21-м веке // Всемирная конференция по изменению климата (29 сентября – 3 октября 2003, Москва). Тезисы докладов. – 2003. – С.215.
 17. Meleshko V.P. and T.V. Pavlova Impact of Soil Moisture on Seasonal Predictability in the Northern Eurasia. // Proceeding of APCN Symposium on Multi-Model Ensemble Prediction, 7-10 October 2003, Jeju Island, Republic of Korea.
 18. Meleshko V.P., T.V. Pavlova, and V.A. Govorkova AMIP Simulations of the Heat and Water Budgets over Major River Watersheds. // Proc. WCRP/WGNE Workshop “The Second Phase of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP2): Toward Innovative Model Diagnostics. Gleckler P. (ed.).-Meteo-France, Toulouse, France, 11-14 November, 2002.-UCRL-PROC-209115.-P.187 - 188.
 19. Павлова Т.В. Моделирование составляющих теплового и водного баланса на водосборах крупных рек с помощью модели общей циркуляции атмосферы ГГО. // Сборник трудов конференции молодых ученых «Гидродинамические методы прогноза погоды и исследования климата», посвященной 80-летию Отдела динамической метеорологии ГГО. – 2002. – С. 104-120
 20. Kattsov V.M., Govorkova V.A., Pavlova T.V., Walsh J.E., Chapman W. GCM simulations of atmospheric fields affecting air-sea-ice coupling in the Arctic // “Model Systematic Errors”: 12th Annual BMRC Modelling Workshop 16-20 October 2000. / Jasper J.D., Meighen P.J. (eds.). – 2001. – BMRC Rpt.No.80. – P. 79-82.

21. Шнееров Б.Е., Мелешко В.П., Соколов А.П., Шейнин Д.А., Любанская В.А., Спорышев П.В., Матюгин В.А., Катцов В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Глобальная модель общей циркуляции атмосферы и верхнего слоя океана ГГО // Прогноз погоды и физика атмосферы. Тр. Главной геофизической атмосферы им. А.И. Воейкова. – 1997. – вып.544. – С. 3-123.
22. Kattsov V.M., Pavlova T.V., Govorkova V.A. Heat and Water Budgets over the Northern Polar Region as Estimated from 14 Atmospheric General Circulation Models // WCRP: Proc. ACSYS Conference on the dynamics of the Arctic Climate System (7-10 November 1994, Goteborg, Sweden). – 1994. – WCRP-94, WMO/TD-No.760. – P. 199-203.