

**В.И. Кузин, В.Н. Крупчатников, А.А. Фоменко, А.И. Крылова, Е.Н. Голубева,  
В.М. Моисеев, А.В. Щербаков**

## **Совместная модель «атмосфера–биосфера–почва–океан» для изучения климата Сибири**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

Поступила в редакцию 21.02.2001 г.

Изменения климата, обусловленные естественными и антропогенными факторами, являются результатом сложных нелинейных взаимодействий физических, химических и биологических процессов в атмосфере, океане и почве. Исследование климатической системы представляет собой поиск объяснения поведения климата на период от года до столетий, поэтому основное внимание уделяется изучению механизмов взаимодействия между указанными подсистемами климатической системы. Описана концепция создания модели климатической системы для исследования глобального климата и климата Сибири на основе результатов, полученных в последнее время в отделе математического моделирования в области физики атмосферы, океана и проблем окружающей среды Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

### **Введение**

Оценка влияния изменений климата на развитие биосферы, человеческого сообщества в целом является первостепенной задачей современной науки. Важность решения этой проблемы определяется необходимостью выбора стратегии в дальнейшем развитии общества для предотвращения глобальных и региональных климатических и экологических катастроф.

Из существенных региональных проявлений глобальных изменений климата в Сибири можно выделить следующие:

- трансформация гидрологического цикла в регионе, включающая изменение стока великих сибирских рек и режима Больших Васюганских болот;
- изменение зон вечной мерзлоты и как следствие – увеличение потоков метана в атмосферу;
- повышение уровня океана и связанные с ним возможные катастрофические последствия для региона;
- изменение ледовитости арктических морей и изменение в связи с этим цикла пресной воды на земном шаре.

Исследования, проводимые в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, направлены на изучение климатических изменений глобального и регионального масштабов, которые могут произойти в Сибири. В институте имеется большой опыт в решении сложных задач геофизической гидродинамики, к которым относятся проблемы изучения изменения климата Земли. Разработаны численные модели циркуляции атмосферы и океана, адекватно описывающие сложную нелинейную динамику атмосферных и океанических процессов, и методы усвоения данных наблюдений и верификации моделей.

Основные цели исследований можно сформулировать в виде двух задач:

– определение и оценка региональных проявлений глобальных изменений климата в Сибирском регионе;

– выделение и оценка возможного влияния региональных особенностей на климат в глобальном масштабе.

Проводимые исследования базируются на математических моделях, включающих в себя совместную модель циркуляции атмосферы, океана и суши, модели пограничных слоев, модели переноса и трансформации примесей в атмосфере и океане, а также класс моделей, дающих оценки влияния климатических изменений на различные компоненты экологической обстановки Сибирского региона.

В настоящее время в мировой практике используется достаточно широкий класс совместных климатических моделей. Наиболее известные из них такие, как модель Национального центра атмосферных исследований США [1], модель Макс-Планк Института метеорологии Гамбургского университета [2], а также модели Института вычислительной математики РАН [3] и Главной геофизической обсерватории [4].

Глобальные модели общей циркуляции используются для моделирования климата, исследований влияния внешних факторов на климатические вариации на различных временных масштабах, для изучения обратного влияния на атмосферу подстилающей поверхности, покрытой льдами, растительностью и т.п. Тем не менее они имеют ряд ограничений своей применимости, связанных с недостаточностью разрешения региональных особенностей. Одним из подходов, который позволяет обойти эти трудности, является моделирование регионального климата. Пространственное разрешение в региональных моделях климата увеличивается так, чтобы можно было явно описать мезомасштабные явления, которые обусловлены в том числе

и мезомасштабными особенностями подстилающей поверхности региона. На боковых границах в качестве краевых условий используются либо результаты глобального анализа наблюдений, либо данные численного моделирования общей циркуляции атмосферы. Использование данных глобального анализа предпочтительней, так как в этом случае будут исключены крупномасштабные ошибки моделирования. Идея регионального моделирования получила развитие [5] и нашла применение при исследовании регионального климата Европы [6] и Арктического региона [7].

## **1. Модель климатической системы**

Изменения климата, естественные или вызванные антропогенными причинами, являются результатом сложных нелинейных взаимодействий физических, химических и биологических процессов в атмосфере, океане и поверхности суши. Так как исследование климатической системы представляет собой поиск объяснения поведения климата на период от года до столетий, то основное внимание в настоящее время следует уделить изучению механизмов взаимодействия между физическими, химическими и биологическими подсистемами.

### **1.1. Модель атмосферы**

В настоящее время в этом направлении предпринята попытка создания глобальной совместной модели на базе модели атмосферы Института вычислительной математики (ИВМ) РАН и модели биосферы поверхности Земли ИВМиМГ СО РАН. При этом большое внимание уделяется параметризации физических процессов подсеточных масштабов. Первые результаты реализации этого проекта приведены в [8]. Описание модели общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН и результаты моделирования глобального климата 1979–1995 гг. по международной сравнительной программе АМIP-II, в которой участвовала модель, представлены в работе [3]. Для моделирования глобального климата использованы реальные данные о температуре поверхности океана и распределении морских льдов за тот же период времени. Учитывается суточный и сезонный ход Солнца. Концентрация парниковых газов в атмосфере фиксируется.

### **1.2. Модели биосферы поверхности земли**

Являются одними из основных компонентов климатической системы. Сейчас широко известны модели обмена между атмосферой и поверхностью земли [9–11]. Модели поверхности земли снабжают приземными потоками скрытого и явного тепла, момента, коротковолновой и инфракрасной радиации модель общей циркуляции атмосферы. Потоки CO<sub>2</sub> у поверхности земли, которые имеют ярко выраженный суточный и сезонный циклы, являются составной частью глобального цикла CO<sub>2</sub> и, следовательно, частью климатической системы.

### **1.3. Модели океана**

Занимают одно из ключевых мест в создании базовой модели климата. Океан является важным фактором, влияющим на изменение климата Земли на временных масштабах больше года. Так, межгодовая изменчивость, проявляющаяся в возникновении явления Эль-Ниньо, существенным образом зависит от волновых процессов тропического океана. Периоды взаимодействий порядка столетий связаны с изменениями в термодинамической структуре Мирового океана. Региональная направленность исследований выдвигает в качестве акваторий, требующих особого внимания, северную часть Тихого океана и Арктический бассейн.

Океан также является одним из основных регуляторов парниковых газов, так как наличие гидрофизических и биохимических процессов делает его как источником, так и стоком. Таким образом, океан и его гидрохимические системы играют значительную роль в климатических изменениях. Вследствие этого необходима разработка моделей углеродного цикла в океане, моделей распространения сопутствующих биогенных элементов, а также моделей переноса и трансформации метана.

На основе всего вышесказанного развитие моделей океана проводится в двух направлениях:

- моделирование циркуляции Мирового океана и его частей;
- моделирование гидрохимических процессов в океане.

### **1.4. Модели морского льда**

Морской лед является важной частью климатической системы. Льды полярных океанов привлекают внимание климатологов по двум причинам. Во-первых, глобальный цикл пресной воды управляется процессами формирования донных вод на севере и юге Атлантики. Вынос льда в низкие широты играет основную роль в этом цикле. Во-вторых, сценарные эксперименты по изучению отклика климатической системы на увеличение CO<sub>2</sub> показывают существенное потепление в полярных районах. Связанные с этим изменения гидрологического цикла и процессов льдообразования требуют детального изучения. Модели льда представляются как двумерный континуум, характеризующийся такими переменными, как толщина льда и снега, сплоченность льда и скорость его дрейфа [12]. Важной характеристикой является учет внутренних напряжений в массе льда.

### **1.5. Методы усвоения данных наблюдений и верификация моделей**

Моделирование климатических характеристик связано с необходимостью использования больших массивов данных наблюдений. По сути дела, математическое моделирование в климатических задачах связано с созданием взаимодействующих комплексов «модель – данные», объединенных в единое целое специальными алгоритмами, основанными на динамико-стохастических и вариационных подходах.

### **1.6. Организация модели климатической системы (МКС)**

МКС представляет собой систему, состоящую из отдельных компонентов, которые взаимодействуют между собой с помощью специального программного блока – интегратора совместной модели. Интегратор организует гибкое управление обменом данными между подмоделями атмосферы, биосферы, льда и океана. Такая программа позволяет выполнять климатические эксперименты, параллельно считая отдельные компоненты системы на разных процессорах (используя, например, систему MPI).

## **2. Моделирование компонентов климатической системы**

В настоящем разделе представлены результаты моделирования отдельных компонентов климатической системы как предпосылок для создания совместной модели климата.

### **2.1. Глобальная модель атмосферы**

Описание модели общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с результатами моделирования современного климата дано в работе [3]. Ниже перечислены основные черты и характерные компоненты этой модели:

- обобщенная вертикальная система координат,
- полушарная схема интегрирования по времени,
- выполнение законов сохранения,
- горизонтальная конечно-разностная аппроксимация системы уравнений,
- полушарные схемы решения уравнений,
- полулагранжева схема переноса пассивных субстанций,
- трение за счет внутренних гравитационных волн,
- крупномасштабная конденсация,
- конвекция,
- радиация,
- планетарный пограничный слой.

### **2.2. Модель поверхности земли**

Биосферные модели используются для оценки влияния климатических изменений на экологические системы. Глобальную систему растительного покрова можно разделить на ряд структурных типов, называемых биомами, каждый из которых характеризуется наличием одного или нескольких функциональных доминантных типов. Условия окружающей среды контролируют их географическое распределение. Например, в зоне умеренного климата продолжительность теплого летнего периода и суровость зимы влияют на конкуренцию между вечнозелеными и листопадными лесами. Глобальная система биомов, атмосфера и океан являются важнейшими активными составляющими климатической системы. По некоторым оценкам в период глобального биохимического цикла фотосинтеза за год потребляется около 100 млн. т углерода и примерно столько же выделяется при разложении

растительности. Поэтому важно уметь моделировать потоки  $\text{CO}_2$ , чтобы понять их влияние на парниковый эффект в атмосфере. Кроме явного влияния на углеродный цикл существует не менее важное влияние биохимических процессов на гидрологический цикл.

Модель представляет собой объединение стандартной модели процессов на поверхности с учетом растительного покрова и простой биохимической модели, которая моделирует потоки  $\text{CO}_2$  внутри некоторого биома. Задается глобальное распределение пяти типов поверхности: поверхность Земли, переувлажненные участки поверхности, озера и реки, участки, покрытые льдом, и океан. Данные о типах биомов поверхности [13], о типах почвы [9] и о распределении озер и заболоченных участков на континентах [14] считаются известными.

### **2.3. Биохимические потоки**

Газообмен  $\text{CO}_2$  между листьями и атмосферой возникает в результате процессов фотосинтеза и дыхания. Модель обмена  $\text{CO}_2$  между поверхностью, занятой растительностью, и атмосферой воспроизводит естественный цикл  $\text{CO}_2$  в атмосфере и поверхностных биомах. Основными процессами этого цикла являются фотосинтез, когда растения усваивают  $\text{CO}_2$ , поступающий из атмосферы, и дыхание растений, когда  $\text{CO}_2$  выделяется в атмосферу.

Рассмотрим среднемесячные потоки  $\text{CO}_2$ , ммоль/( $\text{m}^2 \cdot \text{c}$ ), полученные в совместной модели за счет фотосинтеза в январе (рис. 1,а) и в июле 1981 – 1982 гг. (рис. 1,б). Эти рисунки показывают, как происходит «озеленение» континентов северного полушария от зимы к лету.

Эксперименты продемонстрировали возможность успешно моделировать потоки  $\text{CO}_2$  на поверхности земли с суточными и сезонными колебаниями, которые являются результатом взаимодействия атмосферной и биосферной моделей поверхности земли. В биосферной модели существует ряд ограничений, которые связаны с недостатком данных о динамике структуры растительного покрова, о содержании в почве питательных веществ. Все это ограничивает ее применение на сроки до нескольких декад. Для того чтобы моделировать на сроки до нескольких столетий и более, необходимо включать блок динамики биомов с учетом биохимических потоков внутри и между биомами.

Метан ( $\text{CH}_4$ ) является третьим по важности атмосферным компонентом после водяного пара и двуокиси углерода, влияющим на процессы парникового эффекта. Систематические глобальные наблюдения атмосферного метана показали, что среднеглобальная концентрация метана в 1992 г. составила около 1710 ppbv и в течение периода с 1983 по 1992 г. увеличивалась со средней скоростью 0,8% в год [15]. Поскольку  $\text{CH}_4$  играет значительную роль в радиационном переносе и фотохимических реакциях в атмосфере, то увеличение содержания метана в атмосфере может способствовать усилению парникового эффекта.

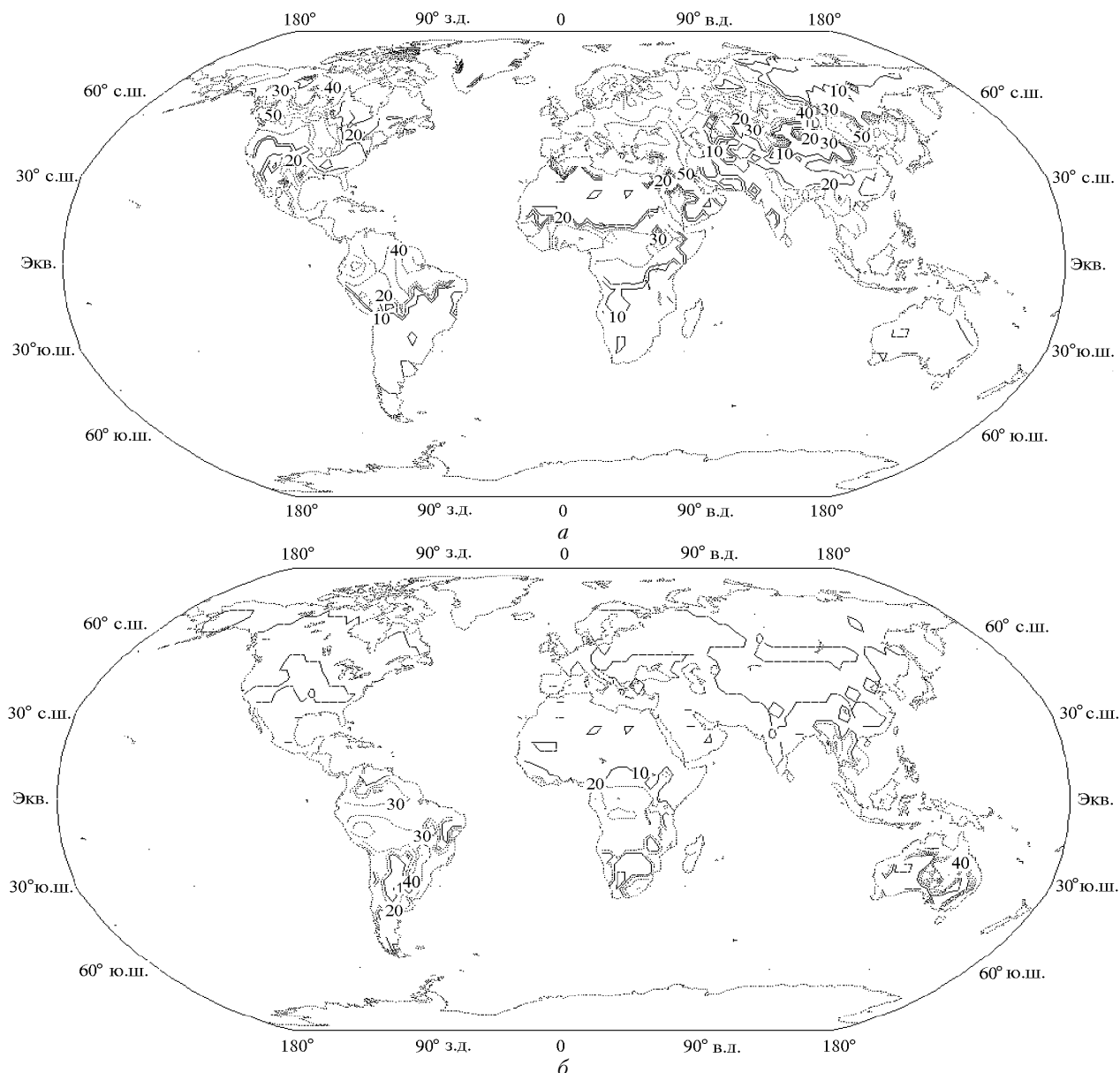


Рис. 1. Поток  $\text{CO}_2$  на поверхности Земли. Фотосинтез: *а* – январь, *б* – июль 1982 г.

Для предсказания изменяющихся уровней концентрации атмосферного метана необходимо качественное и количественное понимание его глобального цикла на поверхности Земли, природы естественных и антропогенных источников/стоков метана. Первым шагом в решении этой задачи явилось численное моделирование глобального атмосферного цикла метана и его сезонной изменчивости. На основе трехмерной транспортной модели, разработанной в лаборатории динамики климата ИВМиМГ СО РАН [16], данных о концентрации метана на наземной сети станций [15] и крупномасштабных тропосферных полей радикала ОН [17] проведено моделирование глобального распределения и сезонной изменчивости концентрации  $\text{CH}_4$ .

Основной результат эксперимента заключался в том, что данная транспортная модель позволяет интерполировать достаточно редкие наземные наблюдения со станций, удаленных от континентальных источников и стоков метана.

Моделирование глобального распределения метана в атмосфере показало, что характерной особенностью распределения является межширотный градиент, направленный с севера на юг, с максимальными концентрациями в северном полушарии. Существование планетарного градиента служит доказательством того, что северные торфоболотные экосистемы являются одним из самых мощных естественных источников атмосферного метана. Согласно результатам моделирования межширотный градиент обусловлен в основном атмосферным переносом. Влияние гидроксила ОН становится преобладающим в нижней и верхней тропосфере в районе тропиков.

Сезонный цикл в модели для северного полушария проявляется в двойном осенне-зимнем максимуме. Эмиссии от торфоболотных экосистем, которые достигают своего максимума в сентябре, обуславливают первый максимум в октябре. Окисление метана гидроксидом ОН достигает минимума в зимние месяцы. Поэтому

двойной максимум в сезонных колебаниях метана обусловлен, с одной стороны, увеличением эмиссии осеably, с другой – уменьшением стока в течение зимы.

#### 2.4. Моделирование регионального климата Сибири

Региональная модель атмосферы является составной частью глобальной климатической модели ECSib, разработанной в лаборатории динамики климата ИВМиМГ СО РАН [18]. Результаты математического моделирования климата на основе глобальной модели позволяют в целом получить качественно верную картину распределения основных атмосферных характеристик. Однако горизонтальное пространственное разрешение в глобальной модели не позволяет изучать детально тонкую структуру региональных особенностей. В связи с этим и была разработана региональная модель динамики атмосферы, имеющая повышенное пространственное разрешение. В целом математическая реализация региональной модели практически не отличается от глобальной. Специфика заключается в необходимости постановки боковых граничных условий, обеспечивающих ее взаимодействие с глобальной моделью. В качестве боковых граничных условий задаются значения эволюционных переменных на границах области, полученные из глобальной модели с помощью интерполяции на более мелкую сетку. Боковые граничные условия в настоящей версии модели представляют одностороннее взаимодействие, т.е. информация из крупномасштабной модели поступает в региональную, и не рассматривается ситуация, когда крупномасштабная модель дополнительно учитывает информацию из региональной модели.

В модели деятельного слоя почвы учитываются растительный покров, наличие снега на поверхности суши, процессы в верхнем почвенном слое. Учитываются процессы таяния, уменьшения влаги на поверхности за счет ее фильтрации в глубину почвы, процесс стока влаги на поверхности, поступление влаги за счет крупномасштабных и конвективных осадков и осадков в виде снега, перехват осадков растительным покровом. Рассчитываются температура поверхности почвы, температура четырех почвенных слоев, турбулентный поток тепла от поверхности, поток тепла в

глубь почвы, влажность поверхности почвы, влага в поверхностном слое, поток влаги от поверхности [19].

Эксперимент по исследованию чувствительности модели региональной атмосферы к увеличению разрешения и к новой схеме параметризации взаимодействия с подстилающей поверхностью проводился следующим образом. Вначале было получено квазиравновесное климатическое состояние атмосферы на основе 10-летнего интегрирования глобальной модели с учетом годового хода солнечной радиации.

На основе полученного состояния в последний год интегрирования проводился расчет по глобальной и региональной моделям. Пространственное распределение рассчитанных характеристик, таких как приземная температура, приземное давление, осадки, показывает, что увеличение пространственного разрешения и использование усовершенствованной параметризации процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью позволяет получать более детальную картину, в которой ярко проявляются региональные особенности. В частности, в региональной модели хорошо выражены острова тепла над водной поверхностью в зимние месяцы (Байкал, Балхаш, Арал). Этого не наблюдается в глобальной модели, поскольку данные образования не описываются при используемом в ней пространственном разрешении (рис. 2). Естественно, что это сказалось на приземном давлении, уменьшающемся над областями, в которых расположены водные бассейны регионального масштаба. Это, в свою очередь, привело к изменению общей картины распределения приземного давления.

В летние месяцы картина полностью меняется, поскольку практически исчезает контраст между температурой водной поверхности и температурой суши. При этом разница в воспроизведении приземного давления обусловлена в основном динамическими факторами. Использование региональной модели позволило получить более тонкую структуру распределения осадков, влажности почвы, явных и скрытых потоков тепла на поверхности, чего невозможно достичь с помощью глобальной модели. Это, в свою очередь, отражается на динамических характеристиках вблизи поверхности, которые демонстрируют возникновение мезомасштабных циркуляций [20].

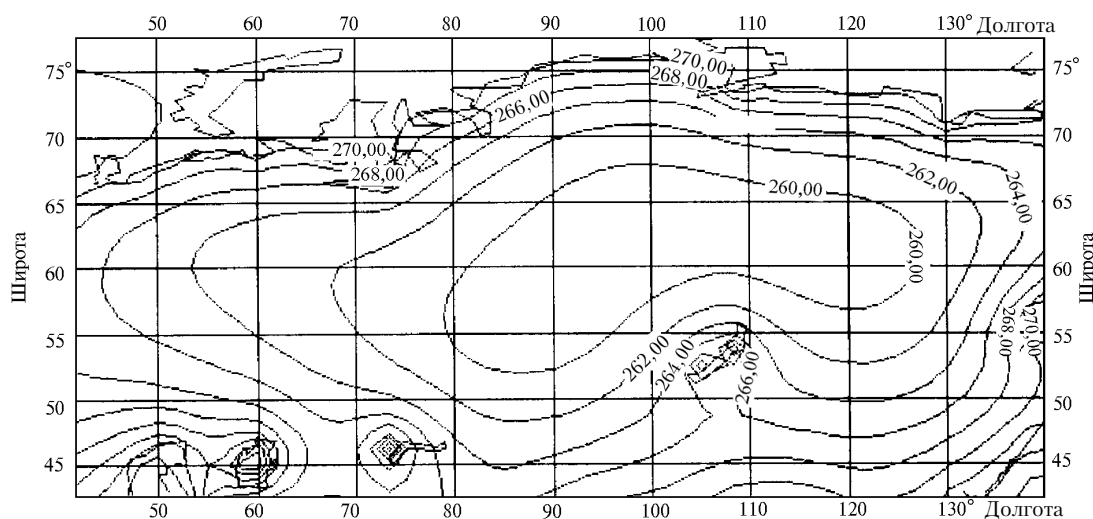


Рис. 2. Среднефевральское распределение приземной температуры, К, рассчитанное по региональной модели

## 2.5. Моделирование климата Мирового океана и его частей

Моделирование термодинамических процессов в океане является необходимым компонентом исследования климата. Региональная направленность исследований выдвинула в качестве бассейнов, требующих особого внимания, тропики Тихого океана, северную часть Тихого океана, Арктический бассейн и весь Мировой океан в целом. Каждая из моделей может являться составной частью общей совместной климатической модели и исследовать вопросы, связанные с взаимодействием таких климатических компонентов, как тропики Тихого океана и глобальная атмосфера, Мировой океан и глобальная атмосфера, Арктический бассейн и Сибирские региональные элементы циркуляции.

Основными чертами моделей динамики океана, разработанных в лаборатории математического моделирования гидросферы ИВМиМГ СО РАН, являются [21]:

- использование сдвинутых сеток по пространственным переменным;
- естественные и приведенные системы координат по вертикали;
- разделение баротропной и бароклинной составляющих движения;
- трансформация адвективных членов модели к специальной форме;
- расщепление уравнений по физическим процессам;
- конечно-элементная дискретизация по пространству с сохранением основных интегральных инвариантов;
- покоординатное расщепление;
- использование неявных и полунеявных алгоритмов при аппроксимации по времени;
- учет процессов в верхнем квазиоднородном слое [22].

### 2.5.1. Моделирование циркуляционных процессов Тихого океана

Тихий океан является важным компонентом климатической системы, влияющим не только на прилегающие районы Америки и Азии, но и на общую климатическую картину. С тропиками Тихого океана связан один из наиболее сильных сигналов короткопериодной климатической изменчивости – Эль-Ниньо – Южная осцилляция (ЭНЮО), проявляющийся каждые 3–5 лет. С ним связаны разрушительные атмосферные последствия: ливни, наводнения, засухи.

При моделировании процессов, связанных с явлением Эль-Ниньо и междекадной климатической изменчивостью в Тихоокеанском регионе, особое внимание уделяется качеству численных моделей циркуляции океана [23, 24].

Для исследования климата Тихого океана и его изменчивости разработана трехмерная модель циркуляции северной части Тихого океана, включающая тропическую зону [25].

На основе модели проведены диагностические и короткопериодные прогностические расчеты по определению климатической циркуляции Тихого океана. Результаты свидетельствуют о правильности описания моделью основных циркуляционных систем и их изменений в климатическом годовом ходе.

В то же время изучение изменчивости климата, связанного с процессами Тихого океана, требует от моделей корректного описания волновой тропической динамики и чувствительности циркуляции во внетропических зонах. Цель дальнейших экспериментов состояла в оценке адекватности реакции модели на реальные атмосферные воздействия, соответствующие периоду Эль-Ниньо. При проведении эксперимента использовались данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов (ECMWF). Результаты расчетов свидетельствуют о том, что в период Эль-Ниньо 1982 г. в океане под влиянием атмосферных воздействий в экваториальной зоне формируется теплая температурная аномалия, которая переносится на уровне термоклина к восточной периферии Тихого океана, достигая поверхностных слоев в ноябре – декабре 1982 г., что соответствует в наблюдениях максимальной фазе Эль-Ниньо.

На рис. 3 представлены результаты эксперимента, которые свидетельствуют об адекватности описания моделью тропической динамики Тихого океана.

### 2.5.2. Моделирование климата Мирового океана

Исследование циркуляции Мирового океана на основе глобальных моделей и совершенствование мониторинга океана способствуют пониманию климатической изменчивости. В представляемых исследованиях использовалась модель динамики Мирового океана, разработанная в лаборатории математического моделирования гидросферы ИВМиМГ СО РАН.

Целью эксперимента было получение климатической термодинамической структуры Мирового океана. В качестве внешнего воздействия на поверхности океана задавался сезонный ход климатических характеристик. На основе модели были проведены численные эксперименты на 3000 лет модельного времени, начиная с состояния покоя при постоянной температуре и солености. При анализе результатов особое внимание уделялось качеству восстановления моделью поверхностной температуры и солености, общей структуры промежуточных и глубинных водных масс и циркуляции вод океана. Полученное распределение гидрофизических полей характерно для крупномасштабных моделей и отражает основные характеристики динамики Мирового океана (рис. 4). Этот вывод подтверждается детальным сравнением с результатами расчетов, проведенных на основе модели Лаборатории геофизической гидродинамики Принстонского университета при идентичных входных условиях и времени интегрирования.

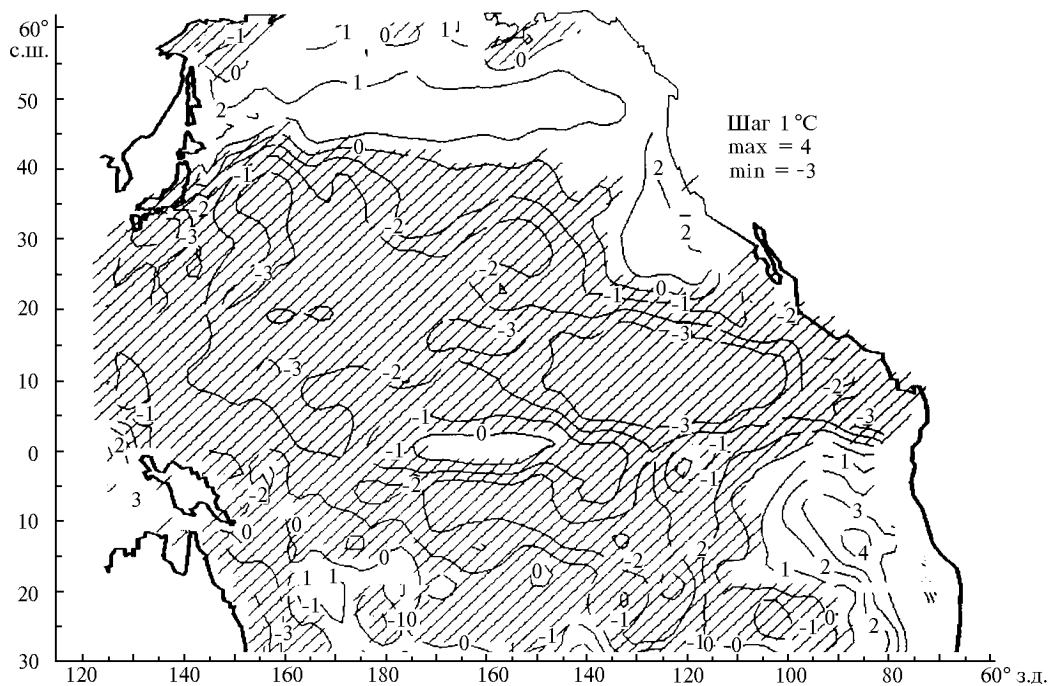


Рис. 3. Рассчитанная по модели температура поверхности Тихого океана, °С. Декабрь 1982 г.

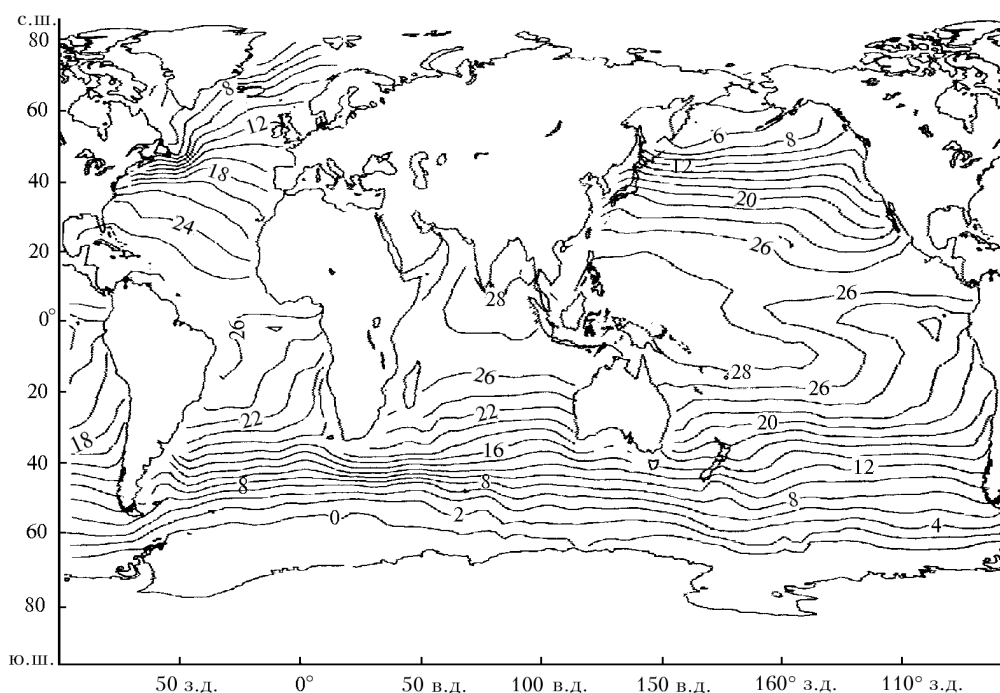


Рис. 4. Рассчитанная по модели температура поверхности Мирового океана, °С

### 2.5.3. Моделирование гидрохимических процессов Мирового океана

Как уже отмечалось ранее, гидрохимические процессы в Мировом океане могут существенным образом влиять на газовый состав атмосферы. Одним из газов, усиливающих парниковый эффект, является метан. Как показали исследования последних десятилетий, в Мировом океане сосредоточены большие запасы метана в виде газогидратов. Изменение термического

состояния океана может вызвать дестабилизацию метангидратов с последующим выходом  $\text{CH}_4$  в атмосферу.

В связи с этой проблемой в ИВМиМГ была разработана модель распространения растворенных газов в Мировом океане, которая в комплексе с моделью циркуляции позволила провести сценарные эксперименты по возможному выносу газогидратов шельфа в атмосферу.

На основе модели проведен численный эксперимент по моделированию реакции Мирового океана на

потепление поверхностных вод. Кратковременное повышение поверхностной температуры с периодом в 100 лет создает условия для возможного разложения метангидратов. Если метангидраты присутствуют в достаточном количестве на поверхности материковых склонов и дна, то их разложение может начаться практически одновременно с началом потепления.

Увеличение поверхностной температуры вызывает длительное, на период более 1200 лет, насыщение вод Мирового океана растворенным метаном. Наиболее подвержены тепловому воздействию метангидраты Гренландского моря, Ньюфаундлендской банки, западного континентального склона Южной Америки и Антарктического континентального склона на долготе Австралии, что связано с особенностями океанских течений.

### Заключение

Сибирский регион, характеризующийся большими пространственными масштабами, является климатической зоной с континентальным и резко континентальным климатом в ее центральной части. Следствием этого своеобразия может являться то, что изменения климата на Земле в глобальном масштабе будут определенным образом проявляться в данном регионе, вызывая изменения характерных региональных составляющих климатического цикла. С другой стороны, активное использование ресурсов Сибири, Дальнего Востока и Арктического региона, включая Сибирский шельф, с сопутствующими процессами вырубки лесов, осушения болот на больших площадях, загрязнения воздуха и прибрежных вод Тихого и Ледовитого океанов, могут проявляться в глобальных изменениях климатической системы.

Основные причины глобальных изменений климата определяются годовым балансом количества тепла, полученного планетой, его распределением в пространстве и сезонным распределением этого баланса.

Все факторы, воздействующие на климат, взаимосвязаны, и их сложное нелинейное взаимодействие может быть оценено только на основе комплексного моделирования с использованием совместных климатических моделей.

В работе представлена концепция развития климатической системы «атмосфера – биосфера – почва – океан» и приведен ряд результатов по математическому моделированию термодинамических и биохимических процессов в компонентах системы. Результаты моделирования, проведенные для каждой из компонентов климатической системы, позволяют сделать вывод об адекватном описании моделируемых характеристик. Этот факт создает предпосылки для дальнейшей интеграции блоков совместной климатической модели в целях изучения климата Сибири

Работа поддержана грантами РФФИ, № 99-05-64684, 00-05-65459, 01-05-65420, ИГ СО РАН, № 56, 73, INTAS, № 96-1935, 96-2074.

1. Boville B.A. and Gent P.R. The NCAR Climate System Model One // J. Climate. 1998. V. 11. P. 1115–1130.
2. Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Brinkop S., Dümenil L., Esch M., Kirk E., Lunkeit F., Ponater M., Rockel B., Somsen R., Schlese U., Shubert S. and Windelband M. Simulation of the present-day climate with the ECHAM model: Impact of model physics and resolution. Hamburg, 1992 (Report / Max-Planck-Institut für Meteorologie, № 93).
3. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лысков В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. Описание модели A5421 версии 1997 года и результатов эксперимента по программе АМIP II. М.: ИВМ РАН, 1998. 121 с.
4. Шнейеров Б.Е., Мелешко В.П., Соколов А.П. и др. Глобальная модель общей циркуляции атмосферы и верхнего слоя океана ГГО // Труды ГГО. 1997. № 544. С. 3–123.
5. Giorgi F., Mearns L. Approaches to the simulation of regional climate change. A review // J. Geophys. Res. D. 1991. V. 29. P. 191–216.
6. Cubasch U., von Storch H., Waszkewitz J., Zorita E. Estimates of climate change in southern Europe using different downscaling techniques. Hamburg, 1996. 46 p. (Report/Max-Planck-Institut für Meteorologie, № 183).
7. Detloff K., Rinke A., Lehmann R., Christensen J.H., Botzet M., Machehauer B. Regional climate model of the Arctic atmosphere // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101. P. 23401–23422.
8. Krupchatnikoff V. Simulation of CO<sub>2</sub> exchange processes in the atmosphere surface biomes system by climatic model // Russian J. Num. Anal. and Math. Modelling. 1998. V. 13. № 6. P. 479–492.
9. Dickinson R.E., Henderson-Sellers A., and Kennedy P.J. Biosphere – atmosphere scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. Boulder, Colo., 1993. (Tech. Note NCAR / Nati. Center for Atmos. Res., N TN – 387 +STR).
10. Sellers P.J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalcher A. A simple biosphere model (SiB) for use within General Circulation Models // J. Atmos. Sci. 1986. V. 43. № 6. P. 505–531.
11. Versegny D.L., McFarlane N.A., and Lazare M. CLASS-A canadian land surface schme for GCM's, II, Vegetation model and coupled runs // Int. J. Climatol. 1993. V. 13. P. 347–370.
12. Arbetter T.E., Curry J.A., and Maslanik J.A. Effects of Rheology and Ice Thickness Distribution in a Dynamic-Thermodynamic Sea Ice Model // J. Phys. Oceanography. 1999. V. 29. P. 2656–2670.
13. Olson J.S., Watts, J.A. and Allison L.J. Carbon in live vegetation of major world ecosystem. Oak Rodge, 1983. (TN / Oak Ridge National Laboratory, ORNL – 5862).
14. Webb R.S. Specifying land surface characteristics in general circulation models: Soil profile data set and derived water-holding capacities // Global Biogeochemical Cycles. 1993. V. 7. P. 97–108.
15. Trends'93: A Compendium of Data on Global Change / Ed.: M.A. Boden, D.P. Kaiser, R.J. Sepanski, F.W. Stoss. Tennessee, 1994. 1012 p.
16. Крупчатников В.Н., Крылова А.И. Численное моделирование распределения метана по данным наблюдений на поверхности Земли // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 622–626.
17. Spivakovskiy C.M., Yevich R., Logan J.A., Wofsy S.C. and McElroy M.B. Troposphere OH in 3-dimensional tracer model, an assessment based on observations



- CH<sub>3</sub>CCl<sub>3</sub> // J. Geophys. Res. D. 1990. V. 95. № 11. P. 18441–18471.
18. *Fomenko A.A., Krupchatnikoff V.N.* A finite-difference model of atmospheric dynamics with conservation laws // Bull. Nov. Comp. Center. Num. Model. in Atmosph. etc. 1993. Iss. 1. P. 17–31.
  19. *Fomenko A.A., Krupchatnikoff V.N., and Yantzen A.G.* A finite-difference model of atmosphere (ECSib) for climatic investigations // Bull. Nov. Comp. Center. Num. Model. in Atmosph. etc. 1996. Iss. 4. P. 11–19.
  20. *Крупчатников В.Н., Фоменко А.А.* Математическое моделирование регионального климата Сибири // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 6. С. 1–6.
  21. *Кузин В.И.* Метод конечных элементов в моделировании океанических процессов. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1985. 190 с.
  22. *Голубева Е.Н., Иванов Ю.А., Кузин В.И., Платов Г.А.* Численное моделирование циркуляции Мирового океана с учетом верхнего квазигомогенного слоя // Океанология. 1992. Т. 32. № 3. С. 395–401.
  23. *Oberhuber J., Roeckner E., Christoph M., Esch M., Latif M.* Predicting the '97 El Nino event with a global climate model. Hamburg, 1998 (Report / Max-Planck-Institut für Meteorologie, № 254).
  24. *Venzke S., Latif M., Villwock A.* The coupled GCM ECHO-2. Part II: Indian ocean response to ENSO. Hamburg, 1997. (Report / Max-Planck-Institut für Meteorologie, № 246).
  25. *Кузин В.И., Моисеев В.М.* Анализ результатов диагностических и адаптационных расчетов в северной части Тихого океана // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1996. Т. 32. № 5. С. 680–689.

*V.I. Kuzin, V.N. Krupchatnikov, A.A. Fomenko, A.I. Krylova, E.N. Golubeva, V.M. Moiseev, A.V. Shcherbakov.* **The joint model «atmosphere – biosphere – soil – ocean» for studying the climate of Siberia.**

The climate variations caused by natural and anthropogenic factors are the result of the complex nonlinear interaction of physical, chemical and biological processes in the Atmosphere, Ocean, and the Earth. The investigation of the climate system represents a search for explanation of the climate behavior on the time scales from interannual to centennial. The main attention is paid to the examination of the interaction mechanisms between the pointed subsystems in the global climatic system. The paper is devoted to the description of the conception of development of the climate model for investigation of the global climate and the regional Siberian climate. This work is based on the results recently obtained in the Department of Mathematical Modeling in the Atmosphere and Ocean Physics and Environment of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics.