

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТА СИБИРИ*

В. И. КУЗИН, В. Н. КРУПЧАТНИКОВ, А. И. КРЫЛОВА, А. А. ФОМЕНКО

*Институт вычислительной математики и
математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия*

e-mail: kuzin@sscc.ru, vkrup@ommfao1.sccc.ru,
alla@climate.sccc.ru, foma@climate.sccc.ru

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 the climate model for investigation of the global climate and the regional Siberian climate. This work is based on the results recently obtained at the Department of Mathematical Modeling in the Atmosphere and Ocean Physics and Environment of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics.

Введение

Оценка глобальных изменений климата и их последствий на биосферу Земли, человеческое сообщество в целом является одной из первостепенных задач современной науки. Важность ее решения 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 такие, как:

- трансформация гидрологического цикла в регионе, включающая изменение стока великих сибирских рек и режима Большого Васюганского болота;
- деградация зон вечной мерзлоты и как следствие развитие термокарста, заболоченности, увеличение потоков метана в атмосферу;
- повышение уровня океана и связанные с ним затопления низменных прибрежных территорий, засоление низовьев рек, изменение процессов в дельтах рек;
- изменение ледовитости арктических морей и в связи с этим изменение цикла пресной воды на земном шаре.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05-05-64990, № 05-05-64989, № 05-05-98000, № 03-05-96828, № 02-05-64525) и Института гидродинамики СО РАН (грант № 56).

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2006.

Исследования, проводимые в Институте вычислительной математики и математической геофизики (ИВМиМГ) СО РАН, направлены на изучение климатических изменений глобального и регионального масштабов, которые могут произойти в Сибири. Основные цели исследований можно сформулировать так:

- определение и оценка региональных проявлений глобальных изменений климата в Сибирском регионе;
- выделение и оценка возможного влияния региональных природных особенностей на климат в глобальном масштабе.

Исследования базируются на математических моделях, включающих в себя совместную модель циркуляции атмосферы, океана и процессов на поверхности земли, 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.

Глобальные модели общей циркуляции атмосферы используются для исследования климата, изучения влияния внешних факторов на климатические вариации на различных временных масштабах, 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 региональные явления, которые обусловлены особенностями подстилающей поверхности. На боковых границах в качестве краевых условий используются либо результаты глобального анализа наблюдений, либо данные численного моделирования общей циркуляции атмосферы. Идея регионального моделирования получила развитие [1] и нашла применение при исследовании регионального климата Европы [2] и Арктического региона [3].

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

1. Глобальная модель атмосферы

Основные черты и характерные компоненты модели общей циркуляции атмосферы, разработанной в ИВМ РАН, состоят в следующем [4]:

- обобщенная вертикальная система координат;
- полунейная схема интегрирования по времени;
- выполнение законов сохранения;
- горизонтальная конечно-разностная аппроксимация системы уравнений;
- полунейные схемы решения уравнений;
- полулагранжева схема переноса пассивных субстанций;
- трение за счет внутренних гравитационных волн;
- крупномасштабная конденсация;

- конвекция;
- радиация;
- планетарный пограничный слой.

2. Модель регионального климата Сибири

Региональная модель атмосферы является составной частью глобальной климатической модели ECSib, разработанной в лаборатории динамики климата ИВМиМГ СО РАН [5]. В целом математическая реализация региональной модели практически не отличается от глобальной. Ее 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.

Модель деятельного слоя почвы и параметризация процессов в почве и у ее поверхности представлены в [6].

Эксперимент по исследованию чувствительности модели региональной атмосферы к увеличению разрешения и 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 атмосферы в последний год интегрирования проводился совместный расчет по глобальной и региональной моделям. Пространственное распределение рассчитанных характеристик, таких как приземная температура, приземное давление, осадки, показывает, что увеличение пространственного разрешения и ис-

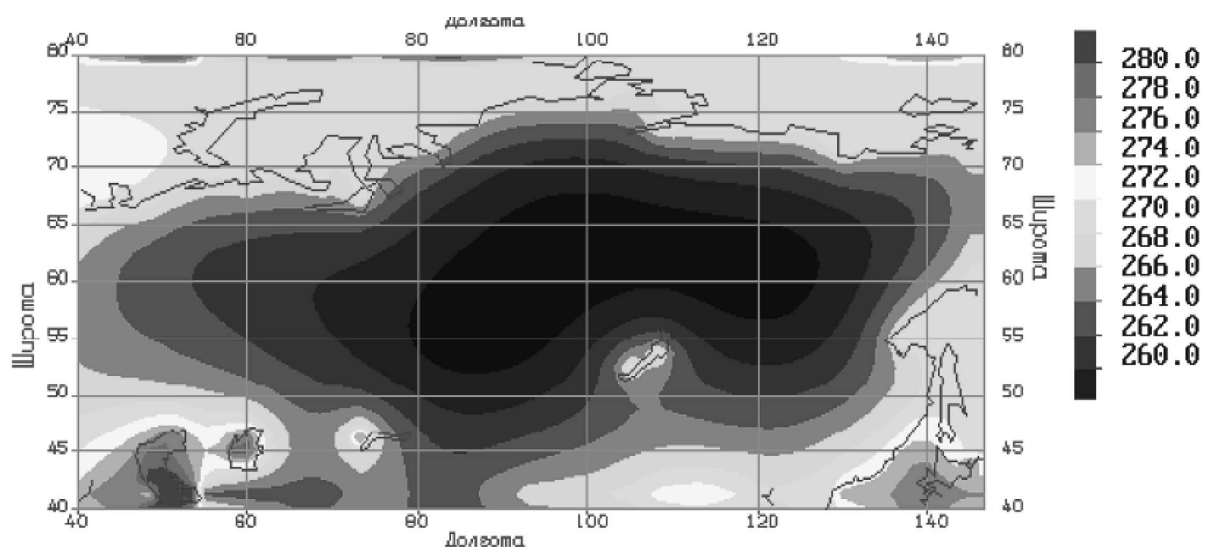


Рис. 1. Среднефевральское распределение приземной температуры (град. Кельвина), рассчитанное по региональной модели.

пользование усовершенствованной параметризации процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью позволяют получать более детальную картину, в которой ярко проявляются региональные особенности. В частности, в региональной модели отчетливо 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. 1). Естественно, что это сказалось на приземном давлении, которое уменьшилось над областями, в которых расположены водные бассейны регионального масштаба. Это привело к изменению общей картины распределения приземного давления.

В летние месяцы картина полностью меняется, поскольку контраст между температурой водной поверхности и температурой суши практически исчезает. 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. Это, в свою очередь, отразилось на динамических характеристиках вблизи поверхности, которые демонстрируют возникновение мезомасштабных циркуляций [7].

3. Модель биосферы 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. Глобальная система биомов вместе с атмосферой и океаном является одной из важнейших и активных составляющих 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 углекислого газа, 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 биосферы объединяет модель процессов на поверхности с учетом растительного покрова и биохимическую модель, которая моделирует потоки CO_2 внутри некоторого биома. Задается глобальное распределение пяти типов поверхности. Данные о типах биомов поверхности [8], данные о типах почвы [9] и данные о распределении озер и заболоченных участков на континентах [10] считаются известными.

4. Биохимические потоки

Газообмен CO_2 между листьями и атмосферой возникает в результате процессов фотосинтеза и дыхания. Модель обмена CO_2 между поверхностью, покрытой растительностью, и атмосферой воспроизводит естественный цикл CO_2 в атмосфере и поверхностных биомах. Основными процессами этого цикла являются фотосинтез, когда растения усваивают CO_2 , поступающий из атмосферы, и дыхание растений, когда CO_2 выделяется в атмосферу.

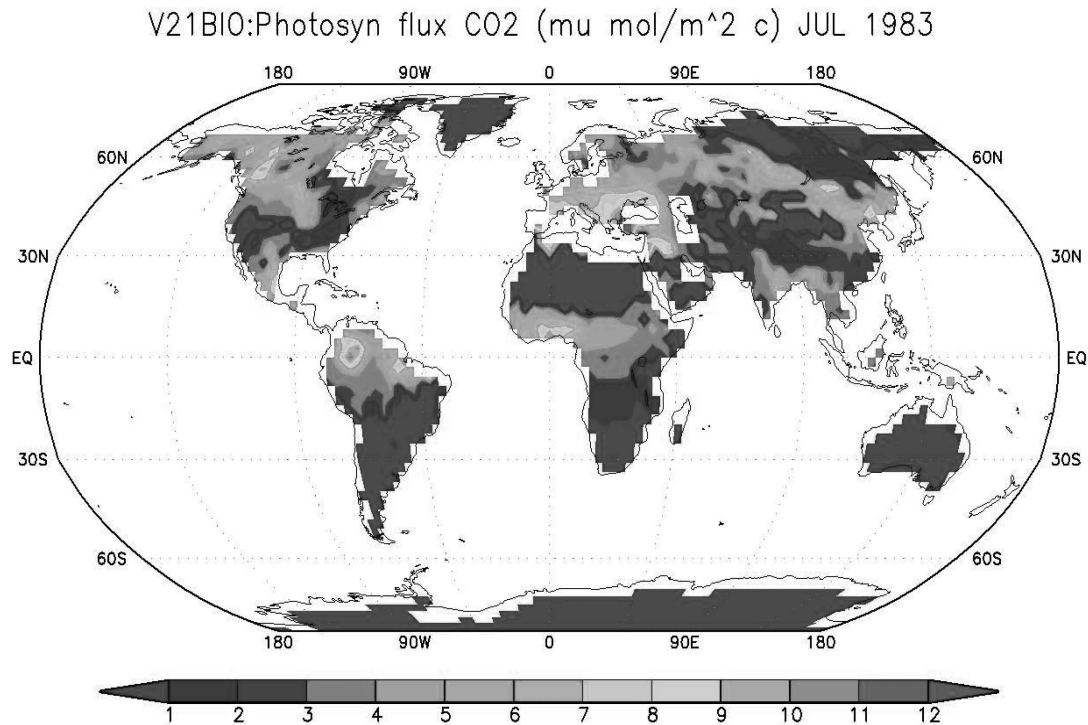


Рис. 2. Потоки CO_2 на поверхности земли. Фотосинтез. Июль 1982 г.

На рис. 2 представлены среднемесячные потоки CO_2 ($\text{моль}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$), полученные в совместной модели за счет фотосинтеза в июле 1981–1982 гг., показывающие, как происходит “озеленение” континентов Северного полушария летом.

Эксперименты выявили возможность успешно моделировать потоки CO_2 на поверхности земли с суточными и сезонными колебаниями, которые являются результатом взаимодействия атмосферной и биосферной моделей.

Метан (CH_4) является третьим по важности атмосферным газом после водяного пара и двуокси углерода, влияющим на процессы парникового эффекта. Систематические глобальные наблюдения за атмосферным метаном 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 [11]. Поскольку метан играет значительную роль в радиационном переносе и фотохимических реакциях в атмосфере, увеличение его содержания в атмосфере способствует усилению парникового эффекта.

На основе трехмерной транспортной модели, разработанной в лаборатории динамики климата ИВМиМГ СО РАН [12], данных о концентрации метана в атмосфере на наземной сети станций [11] и крупномасштабных тропосферных полях гидроксила OH [13] проведено моделирование глобального распределения и сезонной изменчивости концентрации CH_4 .

Моделирование глобального распределения метана в атмосфере показало, что его характерной особенностью является широтный градиент, направленный с севера на юг, с максимальными концентрациями метана в Северном полушарии (рис. 3). Существование планетарного градиента у поверхности земли служит доказательством того, что северные торфоболотные системы — это один из самых мощных естественных источников атмосферного метана.

Анализ результатов моделирования показал, что сезонный цикл метана для Северного полушария проявляется в двойном осенне-зимнем максимуме. Возможно, что первый

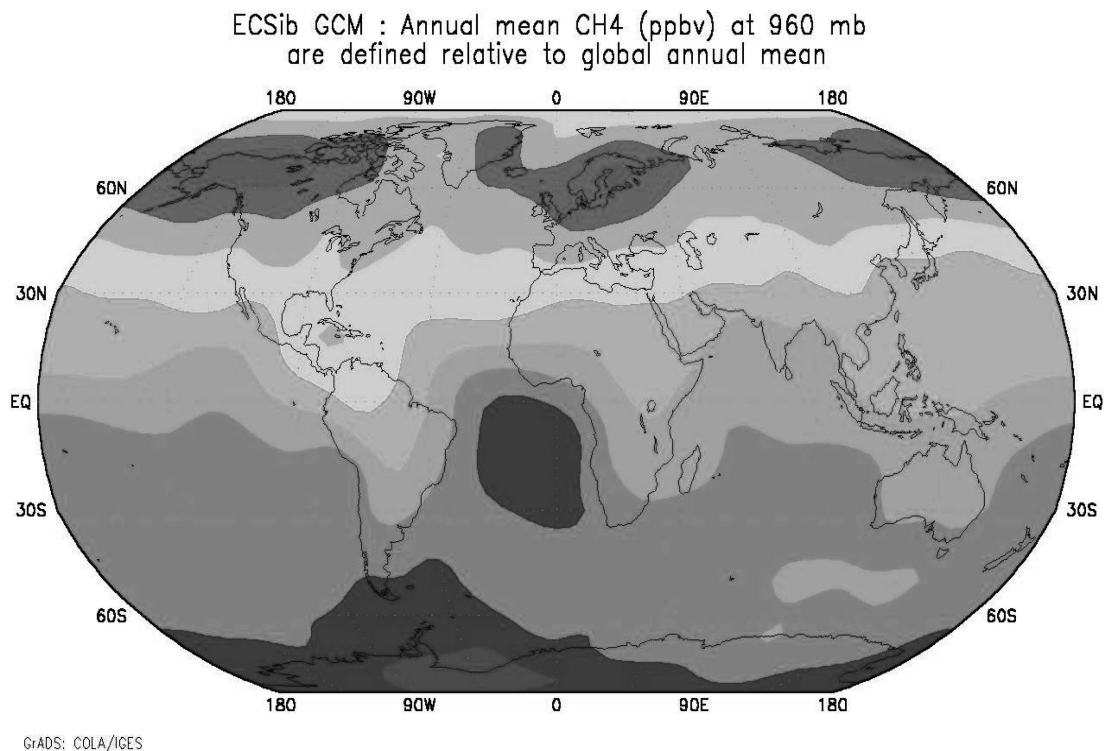


Рис. 3. Глобальное распределение метана у поверхности земли, рассчитанное по модели.

максимум в октябре обуславливают эмиссии от торфоболотных экосистем, достигающие своего пика в сентябре, а второй — ослабление механизма стока метана в зимние месяцы, представленного в модели реакцией окисления CH₄ гидроксидом ОН.

5. Модель климатического речного стока

Модель климатического поверхностного и речного стоков для Сибирского региона представляет собой линейную резервуарную модель, расходы в ячейках которой управляются наклонами рельефа и свойствами почвы. Модель описывает три взаимосвязанных компонента стока: поверхностный, грунтовый и речной стоки. Входными данными для модели являются данные из региональной модели атмосферы: осадки, испарение и время перехода влаги в твердую и жидкую фазы.

Учет речных стоков в региональной модели показал пути улучшения гидрологических характеристик поверхности и исследования транспорта пресной воды в системе атмосфера — гидрология суши — Арктический океан — Северная Атлантика.

6. Моделирование климатических процессов Арктического океана

Моделирование термодинамических процессов в океане является необходимым компонентом исследования климата. Основой океанического блока является крупномасштабная модель циркуляции Арктического океана и Северной Атлантики. Модель основана на комбинации методов конечных элементов и метода расщепления по физическим процессам

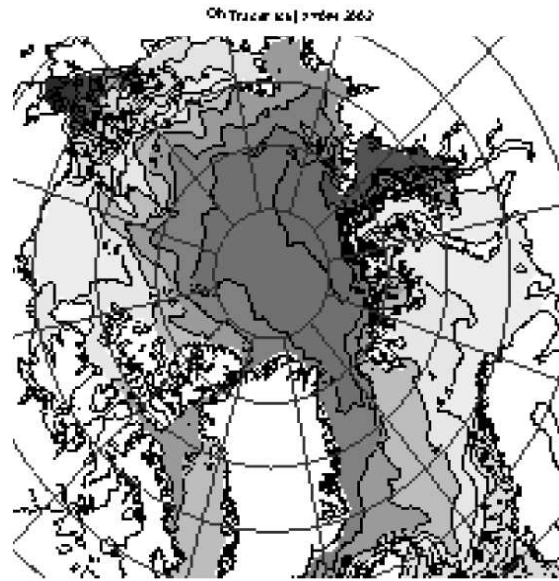


Рис. 4. Рассчитанное по модели распространение вод Обского бассейна в Арктике и Северной Атлантике. Пресная вода распространяется в виде трассера.

и пространственным переменным. Основные черты модели динамики океана, разработанной в лаборатории математического моделирования гидросферы ИВМиМГ СО РАН, представлены в [14].

Проведенные численные эксперименты по исследованию чувствительности модели к атмосферным воздействиям и источникам на поверхности океана выявили особую чувствительность в распространении атлантических вод в Арктическом океане к описанию процессов подсеточного масштаба и процессов переноса. В ходе этих экспериментов изучено принципиальное влияние стока основных рек на климатическое состояние арктического бассейна, кроме того, континентальные воды, транспортирующиеся через Арктический океан в Северную Атлантику, являются важным звеном глобального гидрологического цикла. В результате численных экспериментов промоделированы пути распространения пресной воды от основных сибирских рек через Арктический океан в Северную Атлантику. В качестве примера на рис. 4 приведено распространение вод реки Оби в Арктическом бассейне.

Заключение

Сибирский регион, характеризующийся большими пространственными масштабами, является климатической зоной с континентальным и резко-континентальным климатом в ее центральной части. Следствием этого может быть то, что изменения климата на Земле в глобальном масштабе определенным образом проявятся в данном регионе, вызывая изменения характерных региональных составляющих климатического цикла.

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

Результаты моделирования, проведенные для каждого 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.

Список литературы

- [1] GIORGI F., MEARNS L. Approaches to the simulation of regional climate change. A review // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 29. P. 191–216.
- [2] 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 fur Meteorologie, N 183).
- [3] DETLOFF K., RINKE A., LEHMANN R. ET AL. Regional climate model of the Arctic atmosphere // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101. P. 23401–23422.
- [4] МОДЕЛИРОВАНИЕ современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. Описание модели А5421 версии 1997 года и результатов эксперимента по программе АМІР ІІ / В.А. Алексеев, Е.М. Володин, В.Я. Галин и др. М.: ИВМ РАН, 1998. 121 с.
- [5] FOMENKO A.A., KRUPCHATNIKOFF V.N. A finite-difference model of atmospheric dynamics with conservation laws // Bull. Nov. Comp. Center. Num. Model in Atmosph. 1993. Vol. 1. P. 17–31.
- [6] FOMENKO A.A., KRUPCHATNIKOFF V.N., YANTZEN A.G. A finite-difference model of atmosphere (ECSib) for climatic investigations // Bull. Nov. Comp. Center. Num. Model. in Atmosph. 1996. Vol. 4. P. 11–19.
- [7] КРУПЧАТНИКОВ В.Н., ФОМЕНКО А.А. Математическое моделирование регионального климата Сибири // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12, № 6. С. 1–6.
- [8] OLSON J.S., WATTS J.A., ALLISON L.J. Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystem. Oak Ridge, 1983 (TN/Oak Ridge National Laboratory, ORNL 5862).
- [9] DICKINSON R.E., HENDERSON-SELLERS A., 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] WEBB R.S. Specifying land surface characteristics in general circulation models: Soil profile data set and derived water-holding capacities // Global Biogeochemical Cycles. 1993. Vol. 7. P. 97–108.
- [11] Trends'93: A Compendium of Data on Global Change / Eds M.A. Boden, D.P. Kaiser, R.J. Sepanski, F.W. Stoss. Tennessee, 1994. 1012 p.
- [12] КРУПЧАТНИКОВ В.Н., КРЫЛОВА А.И. Численное моделирование распределения метана по данным наблюдений на поверхности Земли // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 622–626.
- [13] SPIVAKOVSKY C.M., YEVICH R., LOGAN J.A. ET AL. Troposphere OH in 3-dimensional tracer model, an assessment based on observations CH₃CCl₃ // J. Geoph. Res. 1990. Vol. 95, N D11. P. 18441–18471.
- [14] КУЗИН В.И. Метод конечных элементов в моделировании океанических процессов. Новосибирск: СО АН СССР, 1985. 190 с.

Поступила в редакцию 9 ноября 2006 г.