

В.Н. Крупчатников, А.И. Крылова

Численное моделирование распределения метана по данным наблюдений на поверхности Земли

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

Поступила в редакцию 9.02.2000 г.

На основе трехмерной глобальной климатической модели [1], дополненной уравнением неразрывности для трассера – метана, сделана попытка усвоения имеющейся информации о концентрации CH_4 , полученной на разветвленной сети наземных станций за 1984–1987 гг. [2]. Анализ, проведенный на основе данной транспортной модели, показал, что она воспроизводит главные наблюдаемые особенности крупномасштабного переноса метана: межширотный градиент концентрации, направленный с севера на юг, межгодовой тренд и сезонные колебания. Из результатов пространственного моделирования следует, что как отклик на наблюдаемое поверхностное распределение метана модель воспроизводит в средних широтах северного полушария значительные градиенты в районах континентальных источников CH_4 .

Введение

Метан (CH_4) поглощает инфракрасную радиацию в диапазоне длин волн около 7,7 мкм и, таким образом, играет важную роль в энергетическом балансе атмосферы Земли. Считается, что увеличение концентрации метана с 700 ppbv в преиндустриальный период до значений более чем 1700 ppbv в наши дни на 15% произошло за счет антропогенного воздействия. Метан играет также значительную роль в атмосферной химии, являясь основной причиной стока гидроокисного радикала ОН. Хотя основные источники и стоки метана установлены, все еще существуют значительные расхождения в оценках величины мощности источников.

Принято рассматривать три основных источника эмиссии метана:

- за счет деятельности бактерий при определенных анаэробных условиях (переувлажненные земли, рисовые поля, жизнедеятельность животных и т.д.);
- потери при добыче (газ, нефть, уголь и т.д.) на газотранспортных системах;
- сжигание и разложение биомассы.

Одним из главных способов определения мощности источников метана является, конечно, прямое измерение потоков. К сожалению, эти измерения зависят от многих метеорологических и биологических параметров и очень изменчивы в пространстве и во времени, что делает задачу интерполяции измерений на приземных станциях в другие точки поверхности Земли очень трудной. В силу этого можно ожидать, что результат решения такой задачи будет содержать большие ошибки в областях, где отсутствуют регулярные наблюдения. Непрерывные записи измерений содержания метана на глобальной сети производились лабораторией мониторинга климата и диагностики национальной океанографической и атмосферной администрации США (NOAA/CMDL). Данные измерений с 1983 по 1993 г. представляют собой наиболее полный набор измерений концентрации метана в приземном слое атмосферы.

К настоящему времени с помощью климатических моделей проведены исследования по воспроизведению глобального распределения парниковых газов: углекислого

газа (CO_2), хлорфторуглеродов (CFCl_3 , CF_2Cl_2) [3,4]. Выполнены численные эксперименты по моделированию глобального цикла метана, с большой точностью воспроизводящие региональное распределение источников и стоков CH_4 , его сезонных циклов [5].

В данной статье на основе глобальной климатической модели [1], дополненной схемой переноса трассера – метана, сделана попытка усвоения имеющейся информации о концентрации CH_4 , полученной на сети наземных станций NOAA/CMDL за период 1984–1987 гг. Анализ, проведенный на основе данной модели, показал, что она воспроизводит главные наблюдаемые особенности крупномасштабного переноса CH_4 : межширотный градиент концентрации, направленный с севера на юг, межгодовой тренд и сезонные колебания.

1. Модель

Численный эксперимент по глобальному распределению метана в атмосфере проводился на основе трехмерной климатической модели динамики атмосферы [1] с включенным в нее переносом трассерного газа.

Уравнение неразрывности для произвольного трассера можно записать в общем виде

$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + 3\text{DADV} = \text{SOURCE},$$

где ρ – плотность; c – концентрация.

Полную трехмерную адвекцию 3DADV можно разделить на три основные части:

$$3\text{DADV} = \text{HORADV} + \text{VERADV} + \text{VERCONV},$$

где HORADV – горизонтальная адвекция трассера; VERADV – вертикальная адвекция трассера; VERCONV – перенос трассера за счет вертикальной конвекции. Вертикальная конвекция (подсеточные вертикальные потоки) состоит из двух частей:

$$\text{VERCONV} = \text{CLOUDCON} + \text{VERDIFF},$$

где CLOUDCON – перенос трассера конвективными облаками; VERDIFF – турбулентный перенос трассера, который зависит от статической устойчивости атмосферы. Все перечисленные механизмы переноса трассера, кроме CLOUDCON, воспроизводятся моделью общей циркуляции ECSib [1]. Отсутствие в модели такого важного механизма переноса, как CLOUDCON, является ее недостатком как транспортной модели (этот недостаток предполагается устранить введением новой схемы параметризации конвективной облачности типа «mass-flux»), но даже в этом случае удается получить разумное климатическое распределение метана в атмосфере в результате моделирования.

Изменения полей скорости, температуры, приземного давления определяются в модели из системы уравнений, в основе которых лежат законы сохранения момента импульса, массы и первое начало термодинамики. Данная система уравнений обладает интегральными законами сохранения: массы, полной энергии, углового момента, потенциальной энтропии, удельной влажности. Уравнения представлены в сферической геометрии с σ -координатой по вертикали. Кроме граничных условий в модели определяется распределение геопотенциала на поверхности Земли, задаются температура поверхности океана, географическое среднеклиматическое распределение ледяного покрова, широтное распределение угла склонения Солнца, рассчитываются температура и влажность почвы.

Физический блок модели включает схемы параметризации процессов подсеточного масштаба: радиационного нагревания, турбулентного и конвективного обменов, конденсации водяного пара.

Модель имеет пространственное разрешение 4° по широте и 5° по долготе, а вертикальная структура включает 15 σ -уровней. В основе пространственно разностной аппроксимации уравнений лежит C-сетка Аракавы [6], которая обеспечивает выполнение дискретных аналогов основных интегральных инвариантов системы [7]. Численное интегрирование по времени проводится с применением полуневяной схемы [8, 9].

2. Эксперимент

Цель численного эксперимента состояла в том, чтобы на основе климатической модели, используя в качестве начальных и краевых условий для уравнений переноса метана данные наблюдений о среднемесячных концентрациях на поверхности Земли в течение 4-летнего периода, получить динамику изменений поля концентрации внутри модельного года. Это дает возможность оценить способность модели реально описывать глобальное перераспределение метана и выявить согласованность наблюдаемых и предсказанных полей концентрации.

Данные о среднемесячной концентрации метана представляют собой арифметические средние еженедельных измерений CH_4 в период 1984–1987 гг. на 19 станциях, расположенных между 82° с.ш. и 90° ю.ш. [2]. Станции, входящие в глобальную сеть NOAA/CMDL, являются опорными для многолетнего мониторинга содержания основных климатообразующих примесей CO_2 , CH_4 , N_2O . Они, в основном, удалены от континентальных источников метана и расположены в прибрежной зоне материков и океанов. Пространственное и временное изменения CH_4 , например, можно проследить по двум станциям, входящим в систему мониторинга NOAA/CMDL: «Barrow», «South Pole».

Станция «Barrow» ($71^\circ 19'$ с.ш., $156^\circ 36'$ в.д., 11 м над уровнем моря) расположена в арктической прибрежной зоне на Аляске. Измерения CH_4 на ней проводятся с апреля 1983 г. По наблюдениям на «Barrow» среднегодовая концентрация метана в приземном слое возросла с 1724,1 ppbv в 1984 г. до 1806,5 ppbv в 1992 г. Средняя скорость роста за период наблюдений оказалась равной 11,1 ppbv/год [2]. На основе данных за 1984–1987 гг. установлено, что самые северные станции сети, в том числе «Barrow» и «Station “M”», регистрируют основной сезонный минимум концентрации CH_4 в течение лета (обычно в июле).

На станции «South Pole» ($89^\circ 59'$ ю.ш., $24^\circ 48'$ з.д., 2810 м над уровнем моря) среднегодовые концентрации метана увеличивались с 1576,0 ppbv в 1984 до 1666,9 ppbv в 1992 г. За период наблюдений (февраль 1983 – декабрь 1992) средняя скорость роста составила 11,5 ppbv/год [2]. По данным за 1984–1987 гг. концентрации CH_4 , фаза и амплитуда сезонного цикла оказались неразличимыми (в пределах точности измерений) на трех самых южных станциях сети NOAA/CMDL: «South Pole», «Palmer Station», «Cape Grim».

Поскольку обе станции удалены от источников и стоков метана, то это позволяет выделить влияние динамических процессов на формирование распределения CH_4 во всей толще атмосферы. Что касается всего множества данных по 19 станциям NOAA/CMDL, то их основной особенностью является выраженный градиент концентрации метана по направлению с севера на юг с разностью ~ 150 ppbv (для средних годовых концентраций) между крайней северной и крайней южной станциями. Для высоких южных широт выявлен сезонный цикл метана с максимумом осенью (сентябрь–октябрь) и с минимумом в феврале. Типичная амплитуда сезонного цикла составляет ~ 30 ppbv. В северных широтах сезонный цикл сложнее и обусловлен, в основном, сезонностью природных источников метана. Полученные среднегодовые концентрации выявили наличие возрастающего тренда в среднем 0,5–1% между 1984–1987 гг.

Начальные поля CH_4 , используемые как входные данные в узлах регулярной сетки, были получены на основании результатов наземных наблюдений на станциях с помощью метода коррекции [10]. Использование этого метода позволило получить ошибку анализа не более 2% при сопоставлении проанализированных значений для станций с измерениями на этих станциях.

3. Результаты

Наверное, одним из главных результатов проведенного исследования является то, что климатическая модель с включенным в нее переносом метана позволяет интерполировать и интерпретировать достаточно редкие наземные наблюдения. Получены разумные пространственные и временные структуры изменений полей концентрации CH_4 на основе данных измерений.

Представленные карты среднегодовой поверхностной концентрации CH_4 за 1984–1987 гг. не только констатируют рост содержания метана в атмосфере за этот период, но и дают, по сути, информацию об основных его источниках и стоках (рис. 1, 2).

На рис. 3 представлено модельное поле концентрации CH_4 на ~ 960 мбар, усредненное по 4-летнему периоду и определенное относительно глобальной среднегодовой концентрации. Характерной чертой распределения метана у по-

верхности Земли в средних широтах северного полушария являются значительные меридиональные градиенты, создаваемые континентальными источниками. Наиболее сложной зоной для моделирования распределения метана оказались северные и южные

тропики. Поверхностное поле концентрации указывает на наличие градиентов в зональном направлении. Именно здесь менее всего выражен глобальный меридиональный перенос CH_4 , что не согласуется с данными наблюдений.

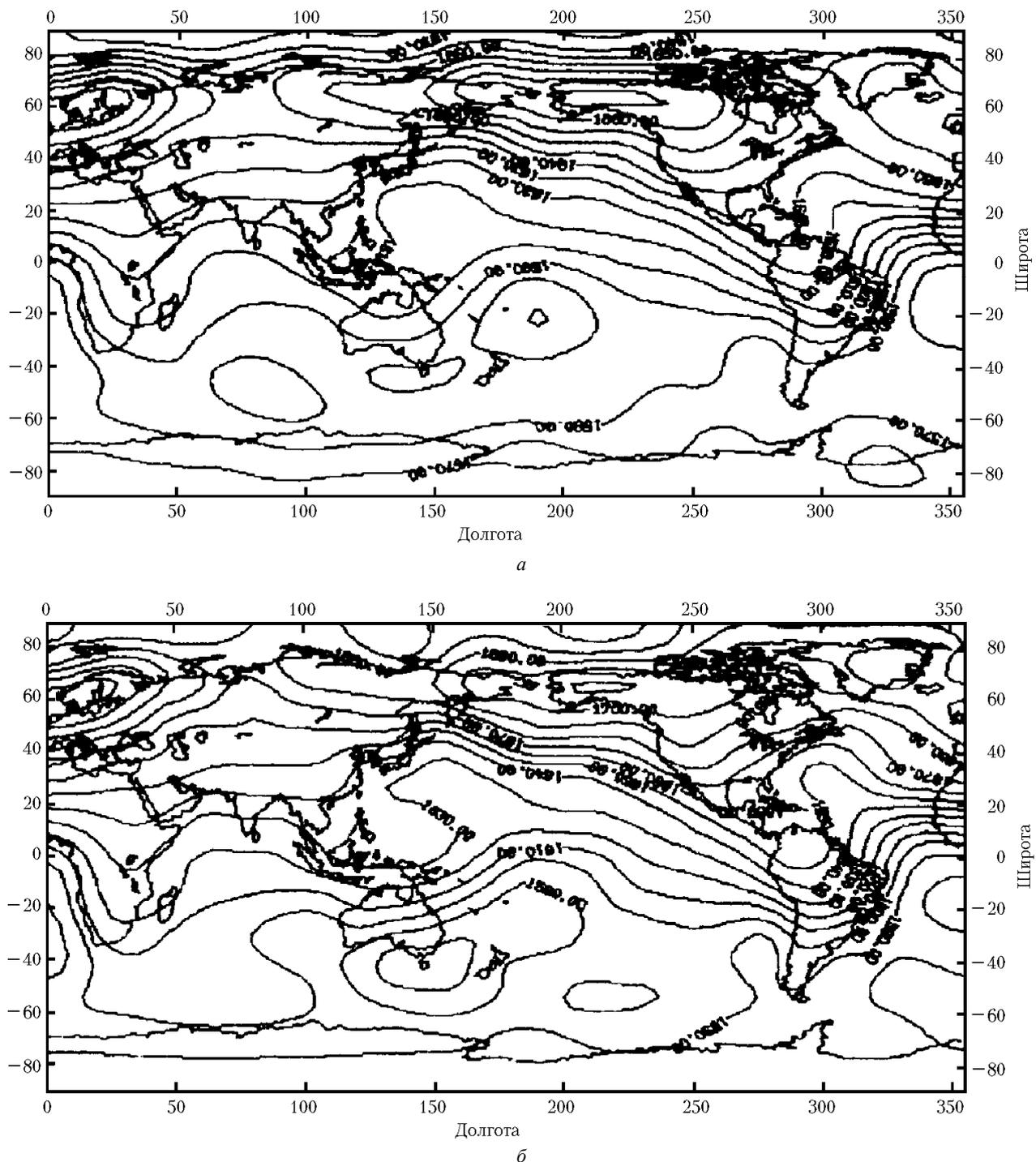
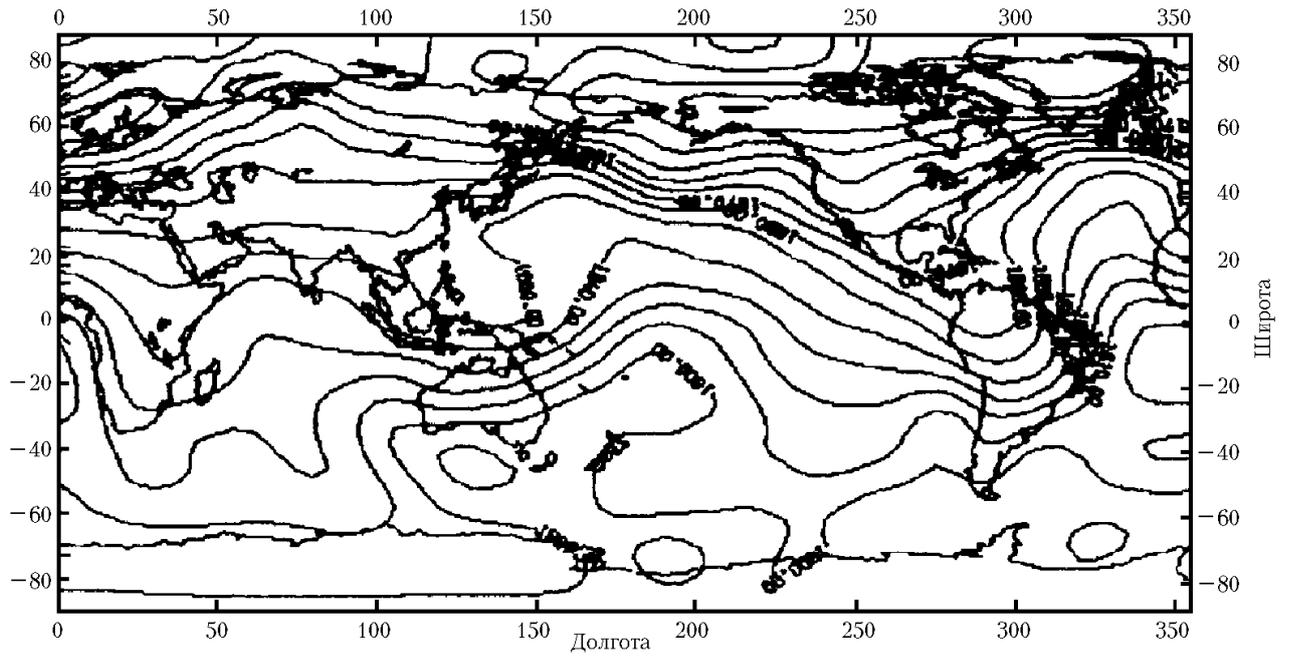
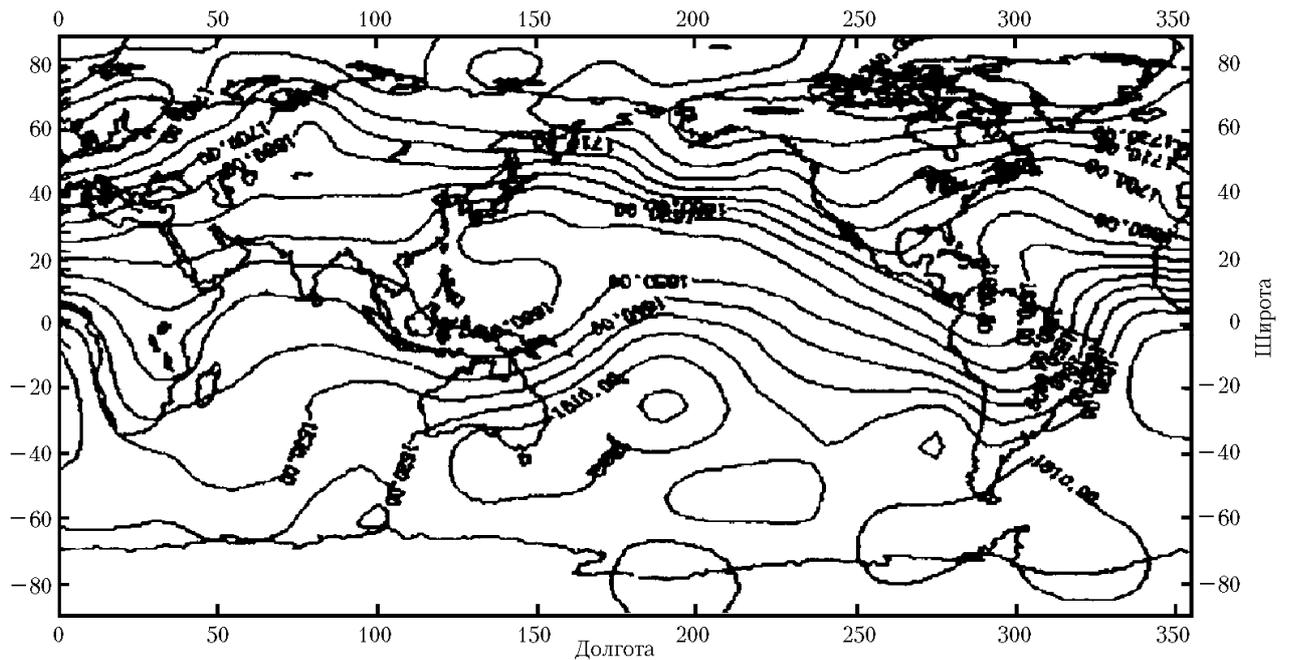


Рис. 1. Среднегодовое распределение метана (анализ) на 1000 мбар (ppbv) за 1984 г. (а), за 1985 г. (б)



a



б

Рис. 2. Среднегодовое распределение метана (анализ) на 1000 мбар (ppbv) за 1986 г. (а), за 1987 г. (б)

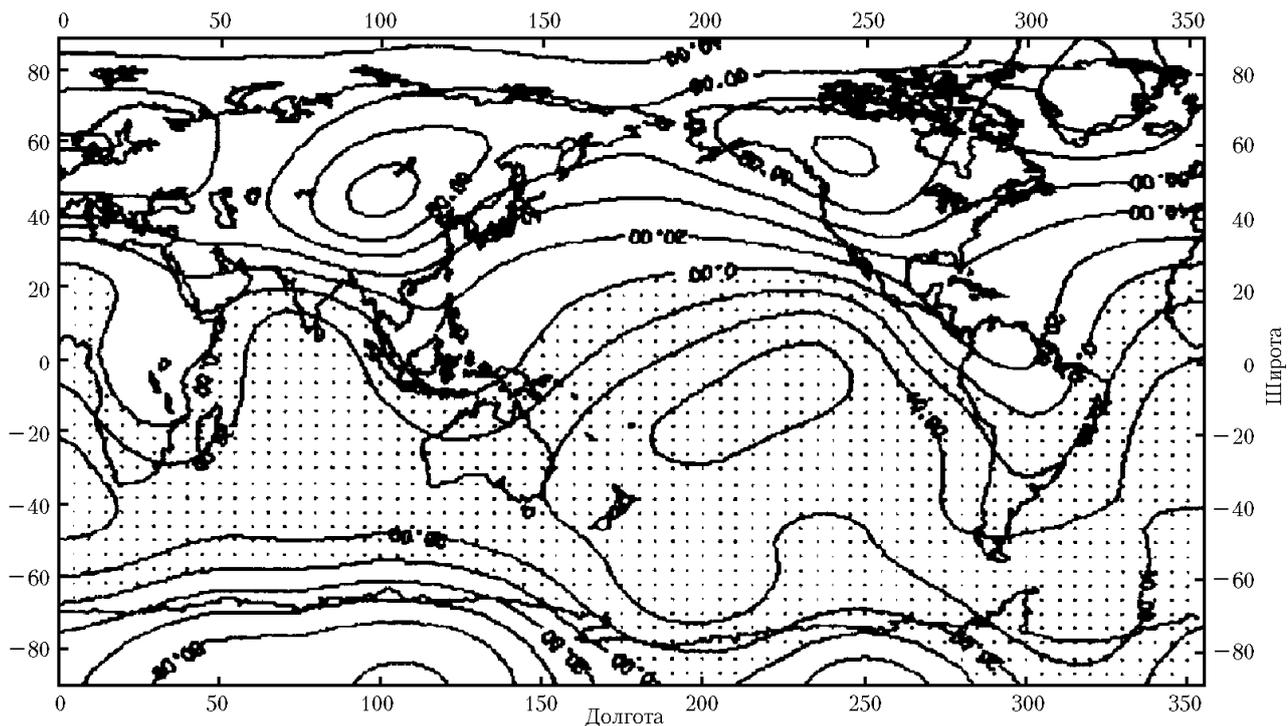


Рис. 3. Модельное среднегодовое распределение концентрации CH_4 (ppbv) на 960 мбар

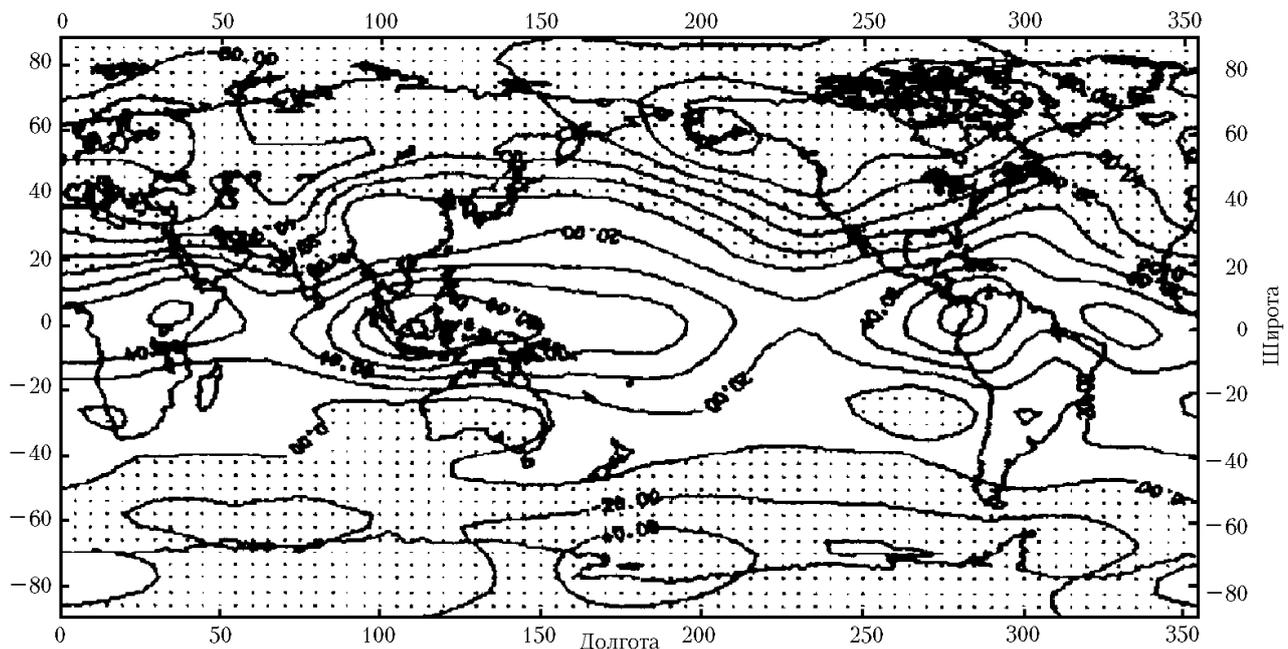


Рис. 4. Модельное распределение разности среднегодовой концентрации CH_4 (ppbv) между 500 и 1000 мбар

Изменения в скоростях переноса, осуществляемого конвективными движениями в пограничном слое атмосферы, смена интенсивности глобальной циркуляции и сезонность поверхностных природных источников метана приводят к характерным сезонным колебаниям концентраций CH_4 . Разница по вертикали между концентрациями на поверхности (~1000 мбар) и в средней тропосфере (~500 мбар) представлена на рис. 4. Отчетливо видно наличие интенсивных отрицательных вертикаль-

ных градиентов в северном полушарии в районах действия поверхностных источников метана, которые и создают его глобальное распределение. Что касается южного полушария, то, по-видимому, единственным активным из источников и стоков является химическое разложение метана (реакция с гидроокисным радикалом OH), которое в отсутствие других физических процессов создает вертикальный профиль с растущей по высоте концентрацией.

Заключение

На основе представленной климатической модели с включенным в нее крупномасштабным переносом метана проанализированы данные поверхностных измерений концентраций CH_4 . Результаты пространственного моделирования показывают, что как отклик на существующую картину наблюдаемого содержания метана в пограничном слое атмосферы модель воспроизводит в средних широтах северного полушария значительные градиенты в районах поверхностных источников метана.

Наличие характерных особенностей в приземных полях концентраций CH_4 за период 1984–1987 гг., таких как сезонные циклы, растущий тренд, широтный градиент с севера на юг, фактически дают информацию об источниках и стоках метана в средних широтах.

Авторы выражают искреннюю признательность А.А. Фоменко за полезные обсуждения и благодарят сотрудников лаборатории мониторинга климата и диагностики при национальной океанографической и атмосферной администрации США за предоставленные данные по глобальному изменению Trends'93.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-05-65459а).

1. *Fomenko A.A., Krupchatnikoff V.N., Yantzen A.G.* // Bull. Nov. Comp. Center. Num. Mod. in Atmosph., etc. 1996. Iss. 4. P. 11–19.
2. *Trends'93: A Compendium of Data on Global Change* / Ed. T.A. Boden, D.P. Kaiser, R.J. Sepanski, F.W. Stoss. Tennessee, 1994. 1012 p.
3. *Fung I. et al.* // J. Geoph. Res. 1983. V. 88. N C2. P. 1281–1294.
4. *Prather M. et al.* // J. Geoph. Res. 1987. V. 92. N D6. P. 6579–6613.
5. *Fung I. et al.* // J. Geoph. Res. 1991. V. 96. № D7. P. 13033–13065.
6. *Arakawa A., Lamb V.R.* // MWR. 1981. V. 109. P. 11–26.
7. *Фоменко А.А.* Гидродинамическая глобальная модель общей циркуляции атмосферы (адиабатическая формулировка). Новосибирск, 1984. 16 с. (Препринт/ВЦ СО АН СССР, № 532).
8. *Burridge D.M., Haseler J.* A model for medium range weather forecasting, Adiabatic formulation: ECMWF Tech. Rep. 1977. N 4. P. 46.
9. *Крупчатников В.Н., Маев В.К., Фоменко А.А. и др.* // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1992. Т. 28. № 1. С. 33–45.
10. *Bergthotsson P., Doos B.R.* // Tellus. 1955. V. 7. N 3. P. 329–340.

V.N. Krupchatnikoff, A.I. Krylova. Numerical modeling of the atmospheric methane based on observational data over the Earth's surface.

On the basis of three-dimensional global climatic model [1], complemented by the continuity equation governing the transport of methane, an attempt has been made to assimilate the available data on concentrations of CH_4 obtained from the extensive network of surface stations for the period of 1984–1987 [2]. The analysis made on the basis of this transport model has shown that it reproduces the main observed features of the large-scale transport of methane, such as the north-south gradient, the interannual trend and seasonal variations. The results of the spatial modeling represent that in response to the observed CH_4 concentration in the surface layer, the model simulation reproduces significant gradients over continental source regions in the northern mid-latitudes.