

В.Н. Крупчатников, А.И. Крылова

Моделирование атмосферного цикла метана по данным глобального мониторинга

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

Поступила в редакцию 29.11.2000 г.

На основе трехмерной транспортной модели, данных о концентрации метана на наземной сети станций NOAA/CMDL за 1984–1987 гг. и крупномасштабных тропосферных полей радикала ОН проведено моделирование глобального распределения и сезонной изменчивости концентрации CH_4 . Полученные результаты свидетельствуют о способности модели воспроизводить глобальный атмосферный цикл метана. Сезонное распределение CH_4 в модели обусловлено динамическими источниками и химическим стоком.

Введение

В предыдущем исследовании в качестве трассерной транспортной модели рассматривалась трехмерная климатическая модель динамики атмосферы, дополненная уравнением неразрывности для метана (CH_4) [1]. На основе этой модели было проведено моделирование атмосферного отклика на глобальное поверхностное распределение CH_4 , полученное по данным NOAA/CMDL среднемесячной концентрации метана у поверхности Земли за 1984–1987 гг. [2].

В результате численного эксперимента в средних широтах северного полушария в пограничном слое были получены замкнутые контуры максимальных концентраций, расположенные над географическими районами источников и прилегающим к ним областям с большими градиентами. Основным результатом эксперимента состоял в том, что данная транспортная модель позволяет интерполировать достаточно редкие наземные наблюдения со станций, в основном удаленных от континентальных источников и стоков метана. Поскольку в модели не учитывались атмосферные стоки метана, действующие главным образом в свободной тропосфере, то интерпретировать модельное пространственное распределение CH_4 было возможным лишь в пределах пограничного слоя атмосферы.

В данной статье представлены результаты численного эксперимента по моделированию глобального атмосферного цикла метана в тропосфере на основе данных NOAA/CMDL за период 1984–1987 гг., для которого были выявлены средние закономерности глобального цикла.

В трассерную транспортную модель [1] был включен основной механизм вывода метана из атмосферы – химический сток (реакция окисления метана гидроксидом ОН в нижнем и верхнем слоях тропосферы). Доля этого канала стока метана составляет ~0,91 [3]. На стратосферные потери метана при генерации водяного пара и поглощение метана почвой

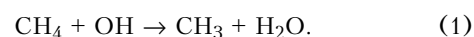
приходится менее 10%. Являясь основным каналом вывода из атмосферы не только метана, но и широкого ряда антропогенных примесей, радикал ОН (его общее содержание) определяет время их пребывания в атмосфере.

В отсутствие фотохимического блока в модели, с помощью которого можно было бы рассчитать фоновое пространственное и временное распределение ОН в атмосфере, для определения тропосферных потерь метана использовались среднемесячные крупномасштабные трехмерные поля ОН, полученные на основе трассерной фотохимической модели [4].

Включение механизма химического стока в транспортную модель [1] позволило провести моделирование глобального атмосферного цикла метана. Особенности пространственного распределения CH_4 , его годовой цикл в северном полушарии качественно согласуются с аналогичными результатами [5, 6] для 1984–1987 гг.

1. Эксперимент

Численный эксперимент по моделированию глобального атмосферного цикла метана проводился на основе трассерной транспортной модели [1]. В модель наряду с конвективными процессами, обеспечивающими поступление метана в атмосферу с поверхности Земли, были включены фотохимические потери метана в тропосфере. В качестве единственного, но основного механизма вывода CH_4 из атмосферы рассматривалась реакция окисления метана радикалом ОН:



Данная реакция служит толчком в многостадийном процессе трансформации углеводородов [7]. В результате разложения метана до конечных продуктов вместо одной исчезнувшей в атмосфере молекулы метана возникает 3,5 молекулы озона (O_3) и 0,5 радикала ОН. Тенденции, обусловленные реакцией взаимодействия метана с гидроксидом ОН, вычислялись

на основе

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -LC, \quad (2)$$

где C – объемное отношение смеси, см^{-3} ; $L = kC_{\text{ОН}} C_{\text{CH}_4}$ – скорость потери метана, с^{-1} . Константа скорости реакции (1) согласно [8] принималась равной

$$k = 2,3 \cdot 10^{-12} \cdot \exp(-1700/T) \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Глобальное фоновое распределение ОН в тропосфере внутри модельного года было получено интерполяцией зонально осредненных концентраций для четырех сезонов, вычисленных на основе трехмерной фотохимической модели [4].

На рис. 1 представлено используемое в численном эксперименте зонально осредненное распределение ОН как функция широты и давления для четырех месяцев (января, апреля, июля и октября). Основными особенностями распределения радикала ОН в тропосфере являются:

– уменьшение концентрации ОН с высотой вплоть до тропопаузы (вертикальный профиль ОН отражает скорость генерации ОН в реакции взаимодействия атома кислорода с водяным паром);

– максимальные концентрации радикала ОН имеют место в обоих полушариях в летние месяцы на высотах, соответствующих максимальной плотности озона и максимуму солнечной инсоляции (600–800 мбар);

– согласно сезонному положению Солнца самые высокие концентрации ОН в январе и июле сосредоточены около 30° ю.ш. и 30° с.ш. соответственно.

Тропосферные концентрации ОН подвержены значительным сезонным колебаниям в субтропиках, средних широтах и субполярных районах. Для летнего полушария от экватора до субполярных широт характерны среднемесячные значения концентрации ОН большие, чем 10^6 см^{-3} , в то время как в зимнем полушарии, начиная от 20° и до полюса, они ниже 10^6 см^{-3} .

Численный эксперимент по моделированию годового цикла метана начинался с модельного времени,

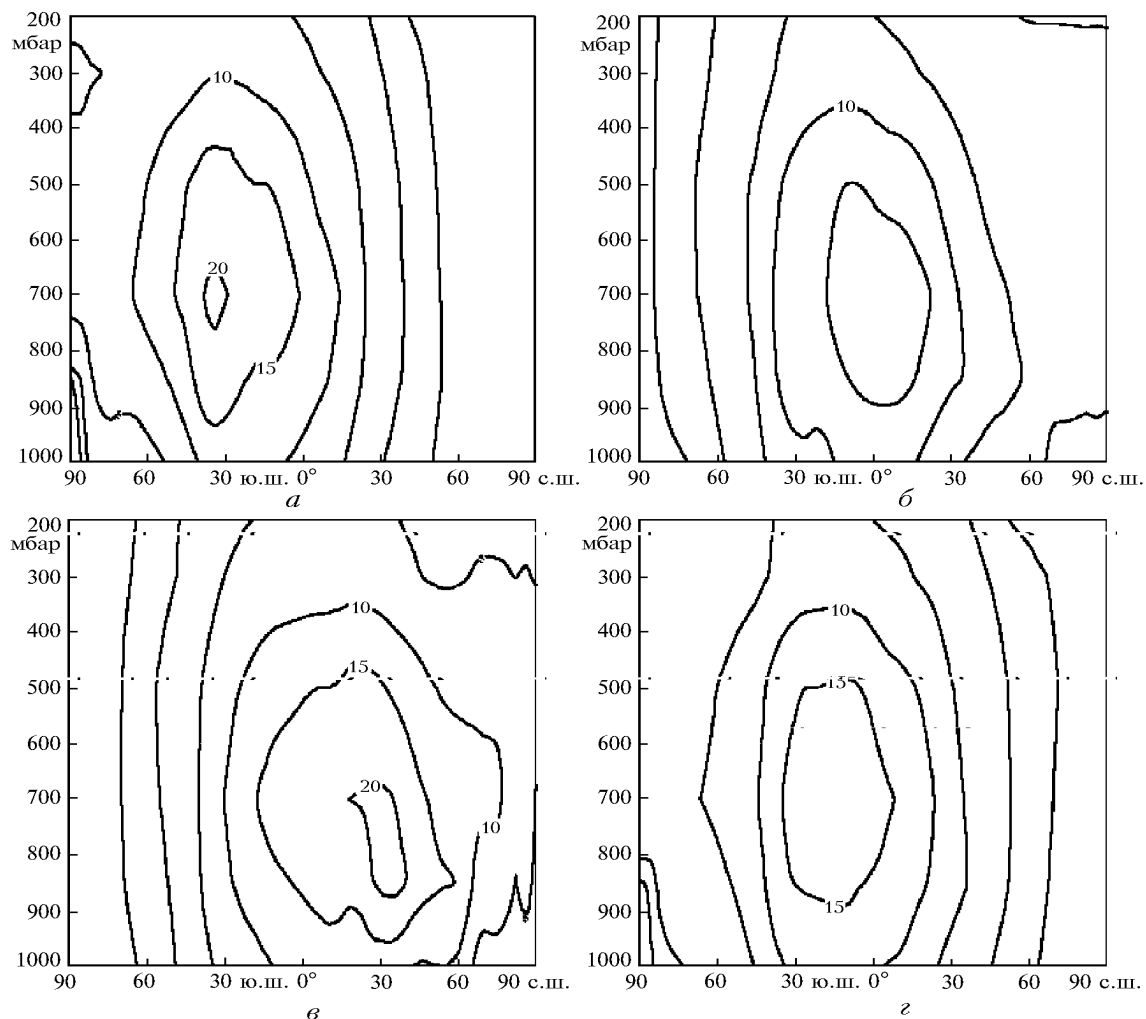


Рис. 1. Среднемесячное распределение тропосферного ОН ($10^5 \text{ мол} \cdot \text{см}^{-3}$), полученное по трехмерной фотохимической модели [4] и осредненное зонально для: *a* – января, *б* – апреля, *в* – июля, *г* – октября

соответствующего 1 января, и продолжался в течение 4 лет – периода, достаточного для выявления устойчивых закономерностей в атмосферных полях метана: межширотного градиента, направленного с севера на юг, сезонных колебаний.

В качестве начального поля для концентрации была выбрана глобально однородная фоновая концентрация, равная нулю на всех уровнях модели кроме поверхности Земли, где глобальное распределение концентрации метана было получено на основе численного анализа данных NOAA/CMDL за 1984–1987 гг. по 19 станциям геофизического мониторинга [1]. Для анализа сезонных колебаний из модельных атмосферных концентраций был выделен линейный тренд со скоростью роста, равной глобальной среднегодовой.

2. Пространственное распределение метана в тропосфере

На рис. 2 представлено модельное распределение CH_4 , полученное как среднегодовое за 4-летний период в отклонении от глобальной среднегодовой концентрации на уровне 960 мбар. Характерной его особенностью является межширотный градиент, направленный с севера на юг, с максимальными концентрациями метана в северном полушарии.

В Северной Америке отмечены замкнутые контуры максимальных концентраций, которые на ~90 ppbv выше глобальной среднегодовой и расположены над районами, где, как известно, действуют такие континентальные источники метана, как переувлажненные и заболоченные территории, места захоронения твердых и жидких муниципальных отходов.

В Центральной Европе высокие концентрации метана (на ~80 ppbv выше глобальной среднегодовой) выделяют районы, где источниками метана являются энтеритная ферментация жвачных животных, переувлажненные почвы, места муниципальных отходов.

Северо-восточные районы России, относящиеся к Арктике, отмечены разностью в ~70 ppbv выше гло-

бальной среднегодовой. Известно, что это районы действия газогидратов. Значительные широтные градиенты моделируются в северных и южных тропиках, указывая на границы внутритропической зоны конвергенции. Согласно модельным результатам на уровне 960 мбар широтный градиент в основном обусловлен атмосферным переносом, а не химическим стоком метана. Влияние гидроксила OH становится преобладающим в нижней и верхней тропосфере в районе тропиков.

В северном полушарии вблизи поверхности концентрация метана над океаническими районами ниже, чем над районами континентальных источников, на ~30 ppbv. Над Южной Америкой можно отметить подобную разницу в концентрации с окружающими океанами.

На рис. 3, а представлена разница концентраций в нижней тропосфере между 550 и 960 мбар. Согласно модельным результатам в северном полушарии концентрация уменьшается с высотой как над сушей, так и над океанами, а в южном полушарии – над континентальными районами. Относительно этих районов можно сделать вывод, что эмиссия метана с поверхности, переносимая адвективными и конвективными процессами, доминирует над химическими потерями метана при формировании вертикального профиля.

Замкнутые контуры отрицательной разности в концентрации (самая значительная разность приблизительно – 80 ppbv) достаточно четко указывают на местоположение основных континентальных источников метана на поверхности Земли. В некотором смысле результаты моделирования можно рассматривать как решение обратной задачи, в которой по наблюдаемым концентрациям на редкой сети наземных станций определено местоположение источников эмиссии метана.

В южном полушарии над океанами в нижней тропосфере формируется положительный вертикальный градиент. Это можно объяснить тем, что сигнал, распространяемый от континентальных источников

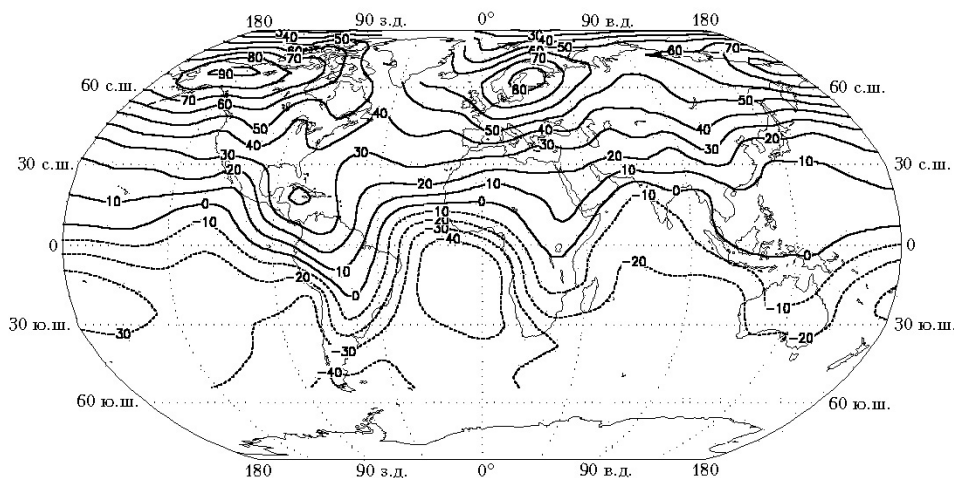


Рис. 2. Модельное среднегодовое распределение концентрации метана, ppbv, на ~960 мбар. Концентрации определены относительно глобальной среднегодовой

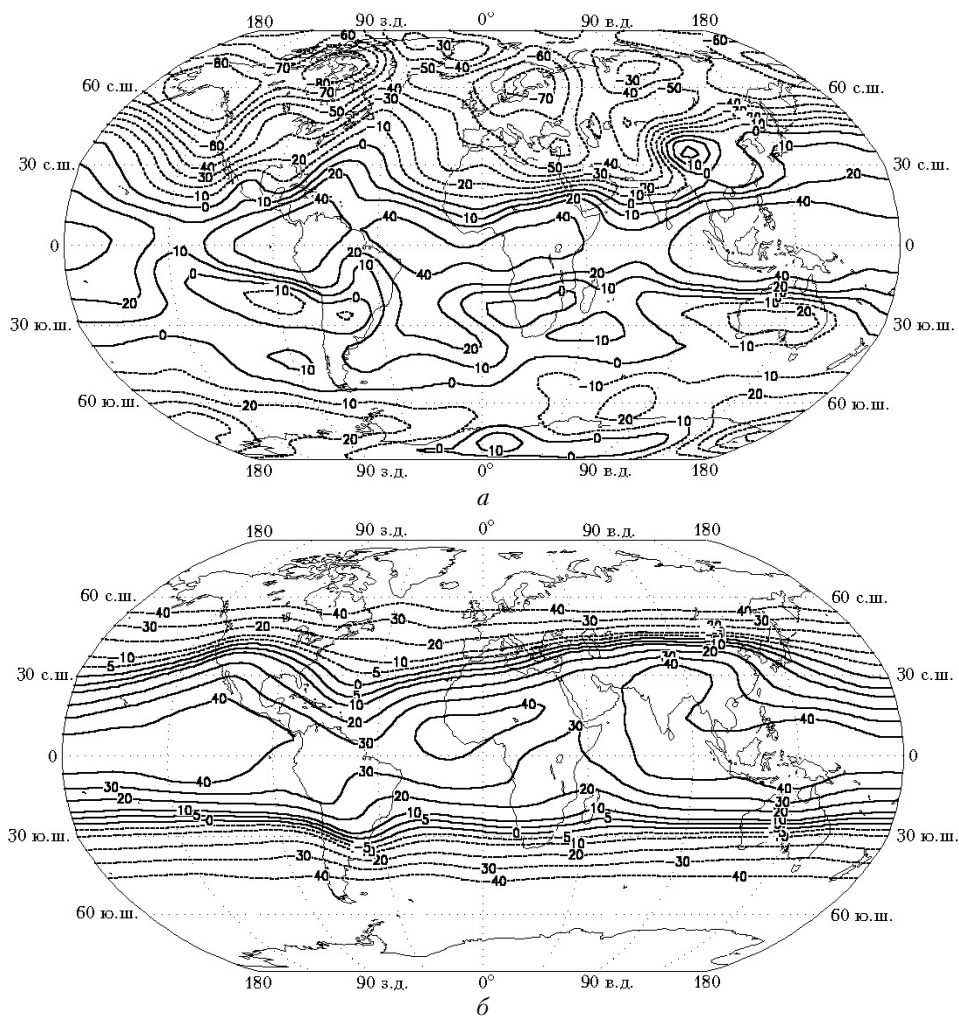


Рис. 3. Модельное среднегодовое распределение разностей концентрации метана, ppbv: *a* – между ~ 550 и ~ 960 мбар; *б* – между ~ 200 и ~ 550 мбар

в меридиональном направлении, и сигнал в широтном направлении, приходящий из северного полушария, слабы по сравнению с химическим стоком. В этом слое метан увеличивается с высотой на 10–40 ppbv.

Для верхней тропосферы, которая представлена разностью между 200 и 550 мбар (рис. 3, *б*), знак вертикального градиента в основном совпадает со знаком градиента в нижней тропосфере. Однако над континентальными районами южного полушария градиент поменял знак. Если в нижней тропосфере над этими районами вертикальный градиент определялся преобладанием источников над стоком, то в верхней тропосфере они поменялись местами. Выше 500 мбар метан почти однородно перемешан в меридиональном направлении, а основным механизмом, формирующим вертикальный профиль, является химический сток метана.

Сезонный цикл в модели для северного полушария на уровне 960 мбар проявляется в двойном осенне-зимнем максимуме (рис. 4). Эмиссии от торфоболотных экосистем, которые достигают своего максимума в сентябре, обуславливают первый максимум в октябре. Этот модельный максимум проявляется на

месяц раньше, чем его показывают данные наблюдений. Окисление метана гидроксидом ОН достигает минимума в зимние месяцы. Поэтому двойной максимум в сезонных колебаниях метана обусловлен, с одной стороны, увеличением эмиссий осенью, с другой – уменьшением стока в течение зимы.

Минимум в сезонных колебаниях CH_4 , обнаруженный в летние месяцы, можно, в первую очередь, объяснить максимальным стоком метана, как следствие максимальных концентраций гидроксила ОН в летние месяцы. Кроме воздействия этого механизма, по-видимому, необходимо учитывать тот факт, что воздушные потоки в тропиках, переносимые нижним отделением ячейки Гадлея, весной много больше, чем потоки через тропопаузу.

Увеличенный перенос метана в тропиках в течение весны создает определенный вклад в минимум CH_4 , который наблюдается в модели на поверхности 960 мбар в июне–июле.

Как было отмечено ранее, в южном полушарии распределение CH_4 в значительной степени определяется тропосферным распределением ОН. В силу небольших по сравнению с северным полушарием ам-

плитуд колебаний OH сезонный цикл CH_4 в этом полушарии достаточно слаб.

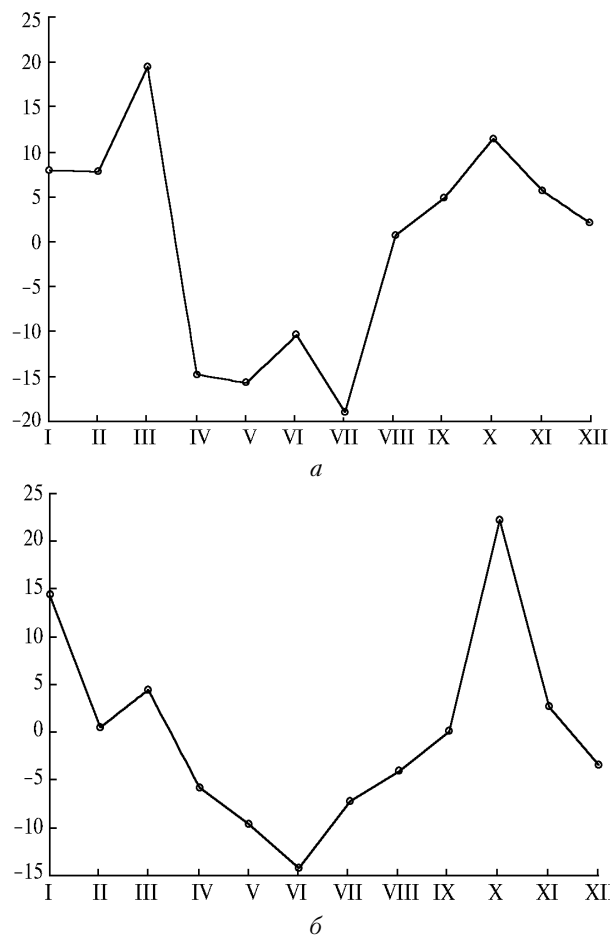


Рис. 4. Сезонный цикл концентрации метана, ppbv, в северном полушарии на ~ 960 мбар: *a* – для станции Mould Bay (Канада, 76° с.ш., 119° з.д.); *б* – для района Беларуси (53° с.ш., 30° з.д.)

Заключение

На основе глобальной транспортной модели, данных о концентрации CH_4 на сети наземных станций за 4-летний период (1984–1987 гг.) и трехмерных полей гидроксила OH получено пространственно-временное распределение метана в атмосфере. Для

исследования химически реактивных трассеров в атмосфере в качестве глобальной транспортной модели использовалась реалистичная климатическая модель динамики атмосферы, дополненная уравнением неразрывности для метана [1]. Полученные результаты свидетельствуют о способности данной модели воспроизводить глобальный атмосферный цикл метана, сезонные колебания концентрации. Модельные результаты качественно соответствуют аналогичным результатам работ [5, 6] для 1984–1987 гг., что подчеркивает достаточность 4-летнего периода для выявления основных закономерностей распределения метана в атмосфере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-05-65459) и Интеграционного гранта СО РАН № 00-76.

1. *Крупчатников В.Н., Крылова А.И.* Численное моделирование распределения метана по данным на поверхности Земли // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. № 6–7. С. 622–626.
2. *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.
3. *Crutzen P.J.* Geophysiology of Amazonia / Ed. R.E. Diskenson. N.Y.: Wiley, 1987. P.107–130.
4. *Spivakovsky 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 observational of CH_3CCl_3 // *J. Geophys. Res. D.* 1990. V. 95. N 11. P. 18441–18471.
5. *Fung I., John J., Lerner J., Matthews E., Prater M., Steele L.P. and Fraser P.J.* 3-dimensional model synthesis of the global methane cycle / *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. N D7. P. 13033–13065.
6. *Hein R., Crutzen P.J., Heimann M.* An inverse modeling approach to investigate the global atmosphere methane cycle // *Global Biogeochem. Cycles.* 1997. V. 11. N 1. P. 43–76.
7. *Бажин Н.М.* Источники и стоки атмосферного метана // *Химия в интересах устойчивого развития.* 1993. P. 1. С. 381–396.
8. *DeMore W.B., Molina M.J., Sander S.P., Golden D.M., Hampson R.F., Kurylo M.J., Howard C.J. and Ravishankara A.R.* Chemical kinetics and photochemical data for use in atmospheric modelling // *JPL Publ.* 1987. P. 87–91.

V.N. Krupchatnikov, A.I. Krylova Simulation of atmospheric methane cycle based on data of global monitoring.

Simulation of the global distribution and seasonal variability of methane have been made on the basis of a three-dimensional transport model, and the NOAA/CMDL methane data for the period 1984–1987 and large-scale tropospheric fields of OH radical. The obtained results evidence for the ability of the model to reproduce the global atmospheric methane cycle. The seasonal distribution of CH_4 in the model is governed mainly by dynamical sources and the chemical sink.