

С.П. Смышляев, Е.А. Мареев, В.Я. Галин, М.В. Черепова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ К ИЗМЕНЧИВОСТИ АРКТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ МЕТАНА

S.P. Smyshlyaev, E.A. Mareev, V.Ya. Galin, M.V. Cherepova

A MODEL STUDY OF THE ATMOSPHERIC GASEOUS COMPOSITION SENSITIVITY TO THE ARCTIC METHANE EMISSIONS

Проведены численные эксперименты с химико-климатической моделью атмосферы высокого пространственного разрешения с целью исследования чувствительности химического состава атмосферы к увеличению потоков метана с земной поверхности в Арктической зоне. Получены оценки изменения содержания метана, гидроксильных радикалов, озона и водяного пара в региональном и глобальном масштабах при разных величинах выбросов метана в Арктике.

Ключевые слова: метан, газовые гидраты, Арктика, химическое окисление в тропосфере, локальная продукция озона и водяного пара.

A set of numerical experiments with a chemistry-climate model of the atmosphere with fine spatial resolution has been done to study chemical composition sensitivity to the enhanced methane emissions from Arctic surface hydrates. The assessment of methane, hydroxyl radicals, ozone and water vapor variability in response to the different Arctic methane emissions is accomplished for the regional and global scale.

Key words: aerosol, solar radiation, heterogeneous chemical reactions, temperature, gaseous composition.

Введение

Метан — наиболее важный представитель органических веществ в атмосфере. Его концентрация существенно превышает концентрацию остальных органических соединений [1]. В 60-е и 70-е гг. количество метана в атмосфере возрастало со скоростью 1 % в год, и это объяснялось хозяйственной деятельностью человечества. Увеличение содержания метана в атмосфере способствует усилению парникового эффекта, так как метан интенсивно поглощает тепловое излучение Земли в инфракрасной области спектра на длине волны 7,66 мкм [4]. Метан занимает второе место после углекислого газа по эффективности поглощения теплового излучения Земли. Вклад метана в создание парникового эффекта составляет примерно 30 % от величины, принятой для углекислого газа. С ростом содержания метана изменяются

химические процессы в атмосфере, что может привести к ухудшению экологической ситуации на Земле [3, 16].

Метан относится к тем газам, которые попадают в атмосферу только с земной поверхности и не имеют внутренних источников в атмосфере. В табл. 1 представлены основные источники метана в атмосфере. Метан попадает в атмосферу как из естественных, так и из антропогенных источников. Мощность антропогенных источников в настоящее время существенно превышает мощность естественных. К естественным источникам метана относятся болота, тундра, водоемы, насекомые (главным образом термиты), метангидраты, геохимические процессы. К антропогенным — рисовые поля, шахты, животные, потери при добыче газа и нефти, горение биомассы, свалки [13].

Значительное количество метана накоплено в Арктических газовых гидратах [15], где в процессе жизнедеятельности производящих метаногенных бактерий образуется метан, который содержится в многолетней мерзлоте в пузырьках в смеси с воздухом, в виде гидратов метана. Содержание метана в воздушных пузырьках достигает 6000 ppmv. Содержание метана в породах многолетней мерзлоты составляет от 0,5 до 6,9 мг на 1 кг породы при среднем значении 2,3 мг/кг. Каждый метр пород многолетней мерзлоты на планете может содержать до 60 млн т метана [17]. В результате потепления климата газовые гидраты могут распасться и выделять в атмосферу большое количество метана в масштабах, сравнимых с другими глобальными источниками (табл. 1).

Таблица 1

Источник	Поток (Тг/год)	Пределы изменчивости	Ссылка
Природные			
Болота	100	92–232	Matthews, 2000
Термиты	20	2–22	Sanderson, 1996; Sugimoto et al., 1998
Океаны	4	0,2–4	Holmes et al., 2000
Морские осадки	5	0,4–12.2	Judd, 2000
Геологические	14	12–36	Judd, 2000
Природные пожары	2		Levine et al., 2000
Всего природные	145		
Антропогенные			
Животноводство	81	65–100	Johnson et al., 2000
Рисовые плантации	60	25–90	Shearer and Khalil, 2000
Газовые месторождения	30	25–50	Kirchgeßner, 2000
Добыча угля	46	15–64	Kirchgeßner, 2000
Сжигание топлива	30	6–60	Piccot et al., 1996
Сжигание биомассы	50	27–80	Levine et al., 2000
Переработка отходов	61	40–100	Johnson et al., 2000
Всего антропогенные	358		
Все источники	503	410–660	

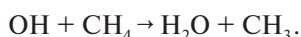
Попадающий в атмосферу метан может претерпевать локальное химическое разрушение при взаимодействии с гидроксильными радикалами ОН, влияя тем самым

на региональной газовой состав, разрушаться на почвенной поверхности, а также переноситься атмосферными потоками в вышележащие слои атмосферы и распространяться горизонтально по всему земному шару, приобретая, тем самым, глобальную значимость для состава атмосферы и влияя на радиационные и динамические эффекты в региональном и глобальном масштабах. В табл. 2 показаны оценки роли различных процессов разрушения метана в тропосфере.

Таблица 2

Стоки	(Тг/год)	Пределы изменчивости	Ссылка
Химическое взаимодействие с ОН в тропосфере	445	360–530	IPCC
Поглощение почвой	30	15–45	
Поток в тропосферу	40		
Все стоки	515	430–600	

Химическое разрушение метана в атмосфере происходит, главным образом, в результате взаимодействия с гидроксильными радикалами:



Образующийся в данной химической реакции водяной пар вносит существенный вклад в гидрологический режим стратосферы, поэтому данная реакция учитывалась в первом слагаемом в правой части уравнения баланса для водяного пара, которое решалось для стратосферы [12]. В тропосфере гидрологический режим в большей степени определяется физическими процессами фазовых переходов, испарения с поверхности и облакообразования, которые учитываются в моделях численного прогноза погоды и общей циркуляции атмосферы [9].

Образующийся в данной химической реакции органический радикал CH_3 дает старт цепочке образования озона в тропосфере, которая является эффективным источником локального образования озона в присутствии окислов азота [14]. Для учета этих процессов в разработанных параметризациях учитывались процессы эволюции газов, влияющих на формирование и разрушение атмосферного озона [10]. В целом в химико-климатической модели высокого разрешения учитывается изменчивость 74 атмосферных газов, преобразующихся в 137 химических реакциях и 51 процессе фотодиссоциации [6].

Объединение разработанной модели трансформации метана и связанных с ним газов с моделью общей циркуляции атмосферы позволило учесть обратные связи между химическими и климатическими последствиями локального увеличения метана, так как расчетное изменение концентраций метана учитывалось при расчете нагрева атмосферы в модели общей циркуляции атмосферы, который влиял на изменение температуры и циркуляции атмосферы, а они, в свою очередь, влияют на изменение скоростей температурно зависимых химических реакций и перенос газов в атмосфере, как показано в правой части уравнения баланса [2].

Результаты моделирования

Разработанные физические параметризации, позволяющие моделировать физические механизмы воздействия метана на гидрологический цикл в атмосфере и обратные связи между химическими и климатическими последствиями локального увеличения содержания приземного метана использовались для оценки величины потоков метана в Арктической зоне, которые могут оказать влияние на региональные и глобальные изменения состава и структуры атмосферы.

Расчеты проводились на 20 лет, в течение которых в широтной зоне 70–90° с.ш. увеличивались потоки метана в атмосферу. Результаты модельных экспериментов показали, что региональные эффекты изменения метана становятся существенными при увеличении потоков в Арктической зоне в 5 раз (рис. 1). При этом увеличение концентрации метана в приземном слое достигает 30–40 %, а выход на стационарный режим сезонной изменчивости вокруг нового уровня концентраций метана достигается к 4–5 году увеличенных выбросов с поверхности.

На высотах стратосферы увеличение содержания метана при таких выбросах с поверхности достигает 10–12 %, а выход на стационарный режим происходит к 10 году увеличенных выбросов (рис. 1). Глобальные эффекты изменения содержания метана при таком уровне увеличения выбросов в Арктике в стратосфере одинаковы по всему земному шару и так же как в Арктической зоне составляют 10–12 % (рис. 2). В тропосфере влияние Арктических выбросов метана равномерно уменьшается по направлению от северного полюса к южному полюсу. Минимальный эффект достигается в приземном слое вблизи южного полюса. Данный результат показывает роль глобальной стратосферной циркуляции в распределении газов с поверхностным источником по атмосфере. Тропосферная циркуляция приводит к меньшему выравниванию метана, чем стратосферная и, более того, изменение метана в тропосфере вблизи южного полюса в большей степени определяется переносом в стратосфере и последующим опусканием массы в тропосферу вблизи южного полюса.

Содержание озона в регионе выбросов в Арктике при пятикратном увеличении потоков метана не превосходит 3–5 % в тропосфере, колеблется около нуля в нижней и средней стратосфере и уменьшается в верхней стратосфере (рис. 3). Это является результатом увеличения локальной продукции озона при увеличении метана в тропосфере, увеличения разрушения озона в водородных каталитических циклах в верхней стратосфере и мезосфере, где водородное разрушение озона доминирует, и компенсация этих эффектов в нижней и средней стратосфере.

В глобальном масштабе увеличение озона в тропосфере сохраняется в течение всего года на всех широтах, однако в Северном полушарии заметен сезонный ход с максимальным увеличением весной и летом, когда в условиях максимального солнечного освещения озона образуется больше, чем осенью и зимой (рис. 4). Отсутствие сезонного хода в Южном полушарии показывает важность динамических процессов, так как даже в течение полярной ночи содержание озона сохраняется. В стратосфере заметно увеличение озона в период формирования Антарктической «озоновой дыры», что может быть связано с влиянием метана на образовании полярных стратосферных облаков через влияние на гидрологический режим стратосферы.

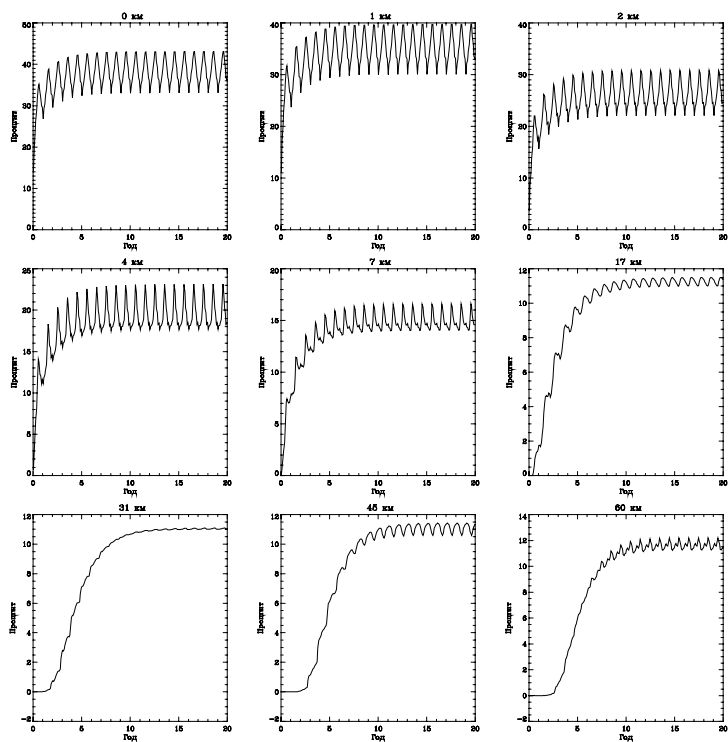


Рис. 1. Процентное изменение концентрации метана на разных высотах атмосферы в Арктической зоне при увеличении потоков метана в 5 раз

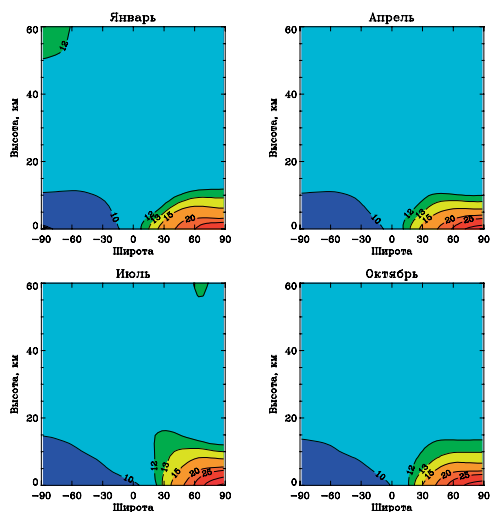


Рис. 2. Среднезональное процентное изменение концентрации метана при увеличении потоков метана в 5 раз (20-й год моделирования)

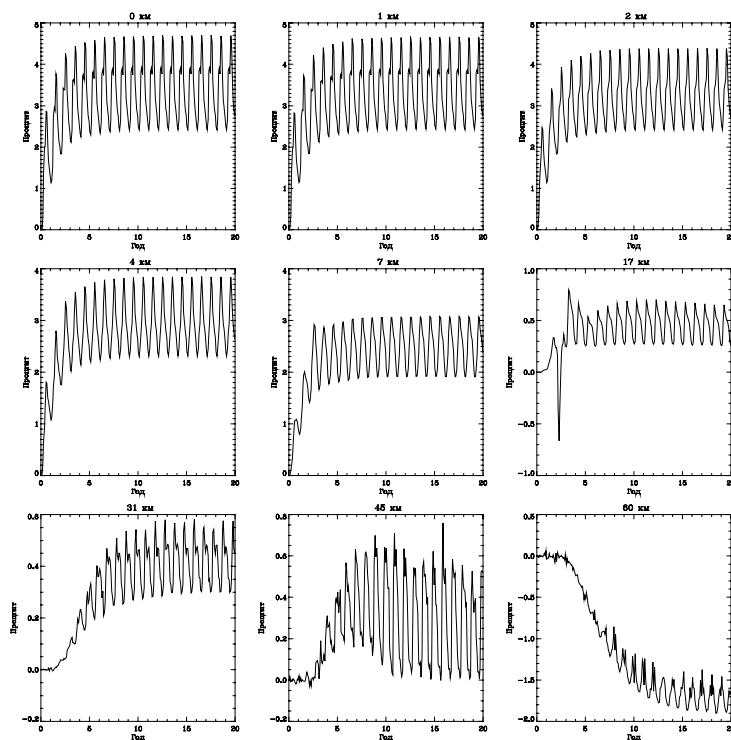


Рис. 3. Процентное изменение концентрации озона на разных высотах атмосферы в Арктической зоне при увеличении потоков метана в 5 раз

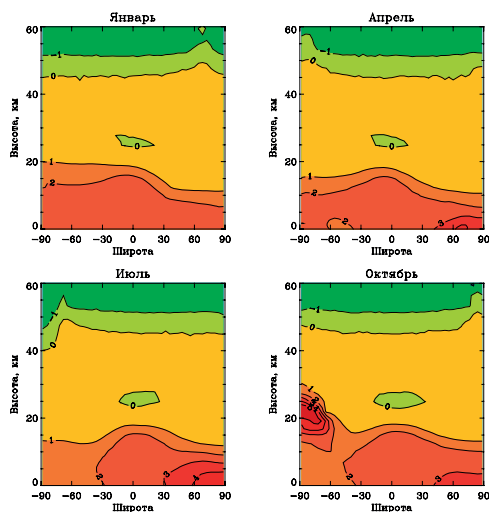


Рис. 4. Среднезональное процентное изменение концентрации озона при увеличении потоков метана в 5 раз (20-й год вычислений)

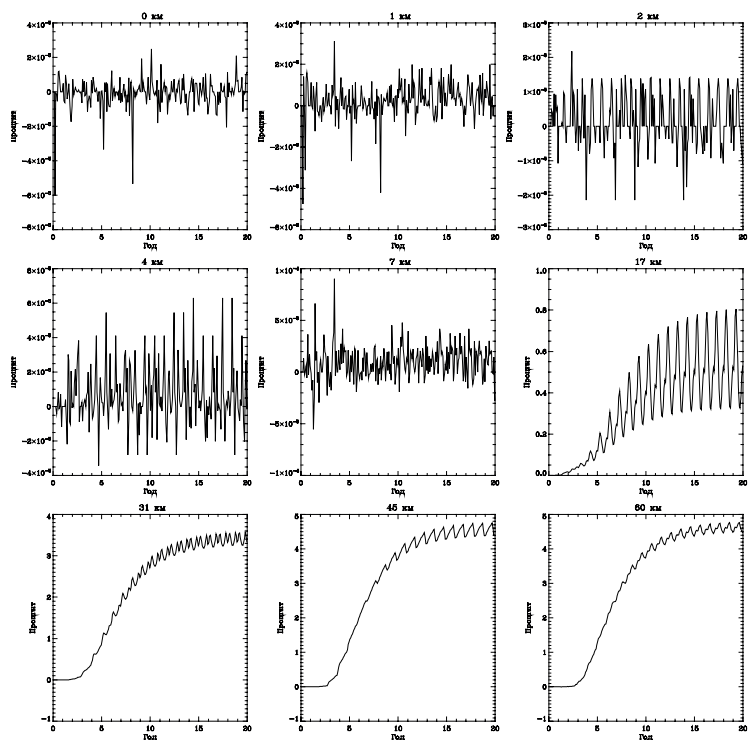


Рис. 5. Процентное изменение концентрации водяного пара на разных высотах атмосферы в Арктической зоне при увеличении потоков метана в 5 раз

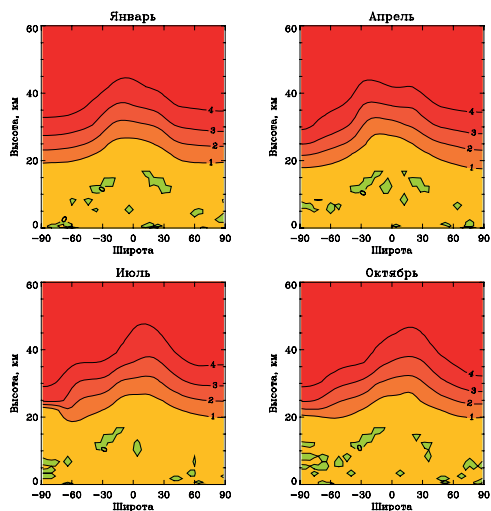


Рис. 6. Среднезональное процентное изменение концентрации водяного пара при увеличении потоков метана в 5 раз (20-й год вычислений)

Влияние потоков метана на содержание водяного пара в регионе выбросов ощущается в стратосфере (рис. 5). Это приводит к дополнительному разрушению озона в верхней стратосфере и мезосфере.

В глобальном масштабе анализ изменения водяного пара показывает, что его содержание равномерно увеличивается в стратосфере, при этом существенного изменения в период формирования озоновой дыры не отмечается (рис. 6).

Анализ изменчивости другого газа, влияющего на формирование полярных стратосферных облаков, а именно паров азотной кислоты HNO_3 , показывает, что его концентрация существенно уменьшается полярной ночью перед формированием озоновой аномалии в Антарктике (рис. 7). Это, вероятнее всего, и является причиной увеличения содержания озона Антарктической весной (рис. 4).

Концентрация метана при 10-кратном увеличении потоков метана в атмосферу в Арктической зоне в приземном слое увеличивается почти в два раза (рис. 8), что соответствует результатам наблюдений в зонах деградации подводной мерзлоты и разрушения гидратов шельфа морей. При этом период достижения стационарного сезонного хода слегка увеличивается по сравнению с увеличением потоков в 5 раз (рис. 1).

Глобальные эффекты при увеличении потоков в Арктической зоне в 2 раза качественно похожи: в 2 раза меньшее увеличение, но количественный эффект, соответственно, больше (рис. 9).

Соответствующее изменение содержания озона при десятикратном увеличении потоков метана в Арктике показаны на рис. 10 для региональных эффектов и на рис. 11 для глобальных эффектов, а для 20-тикратного увеличения потоков метана — на рис. 12 и 13.

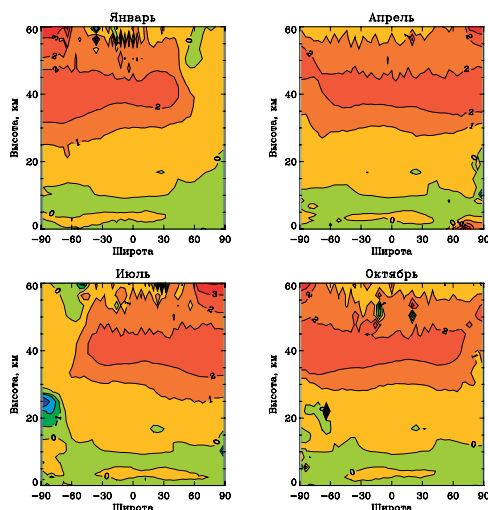


Рис. 7. Среднезональное процентное изменение концентрации паров азотной кислоты при увеличении потоков метана в 5 раз (20-й год вычислений)

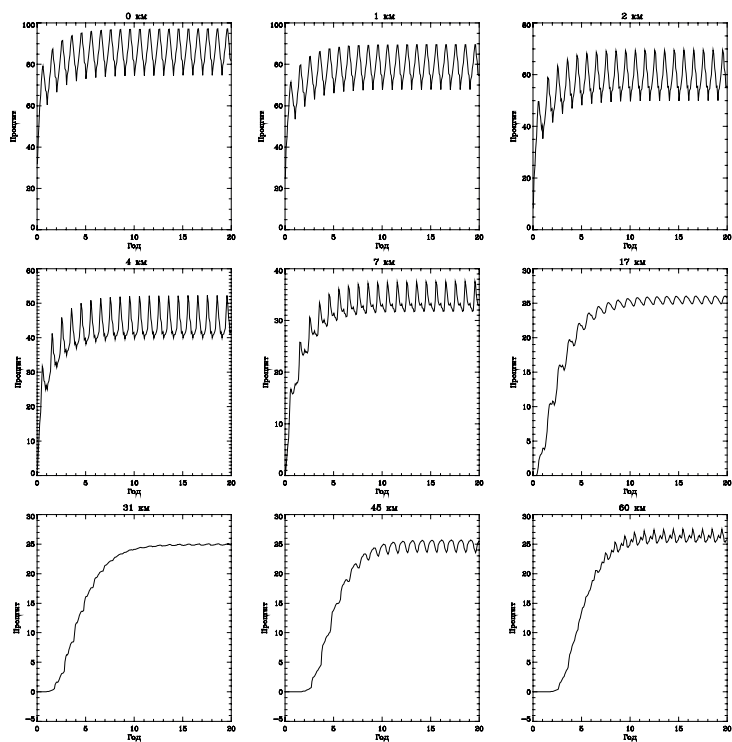


Рис. 8. Процентное изменение концентрации метана на разных высотах атмосферы в Арктической зоне при увеличении потоков метана в 10 раз

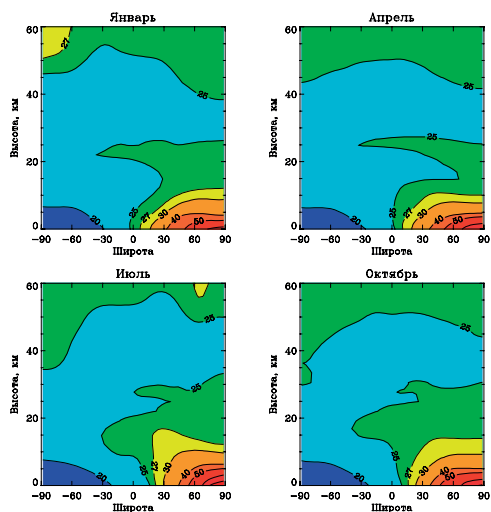


Рис. 9. Среднезональное процентное изменение концентрации метана при увеличении потоков метана в 10 раз (20-й год моделирования)

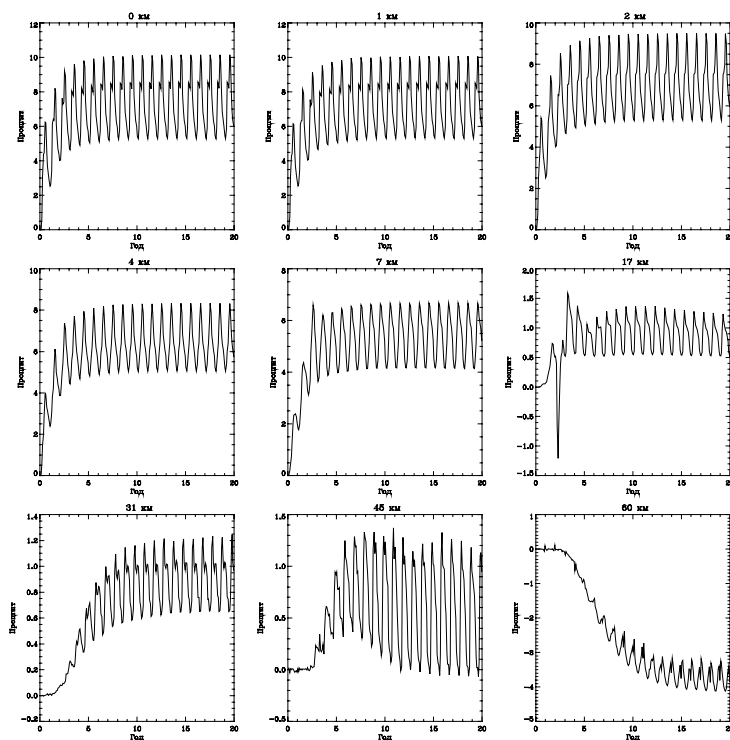


Рис. 10. Процентное изменение концентрации озона на разных высотах атмосферы в Арктической зоне при увеличении потоков метана в 10 раз

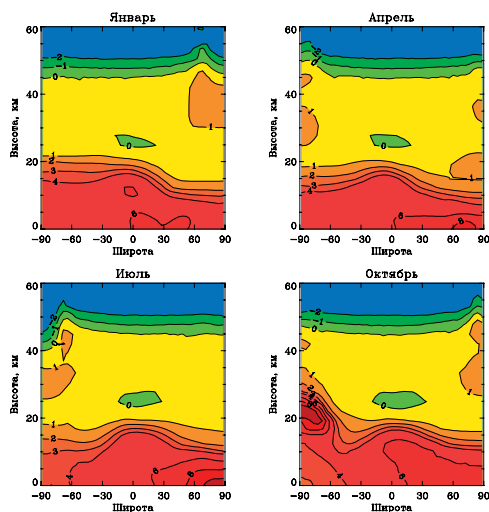


Рис. 11. Среднезональное процентное изменение концентрации озона при увеличении потоков метана в 10 раз (20-й год вычислений)

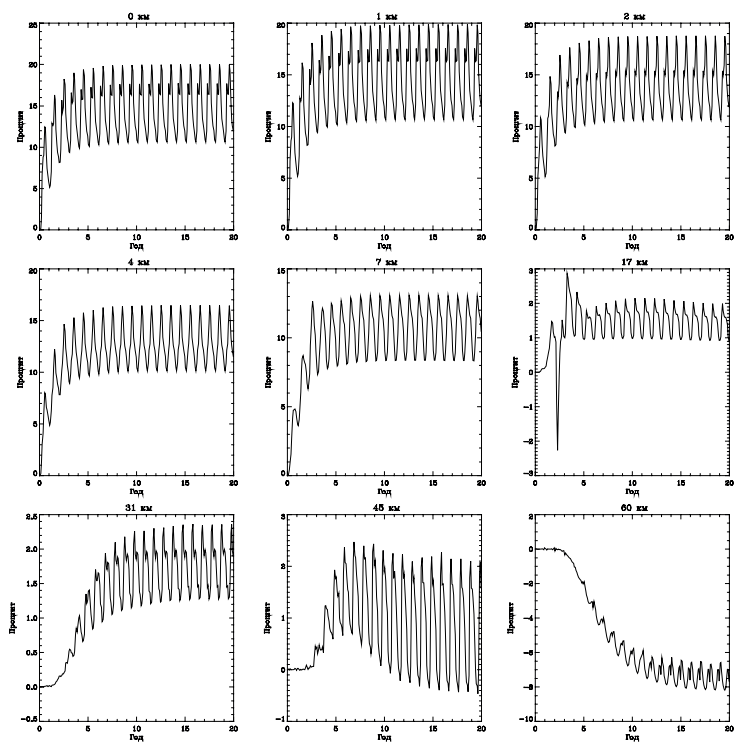


Рис. 12. Процентное изменение концентрации озона на разных высотах атмосферы в Арктической зоне при увеличении потоков метана в 20 раз

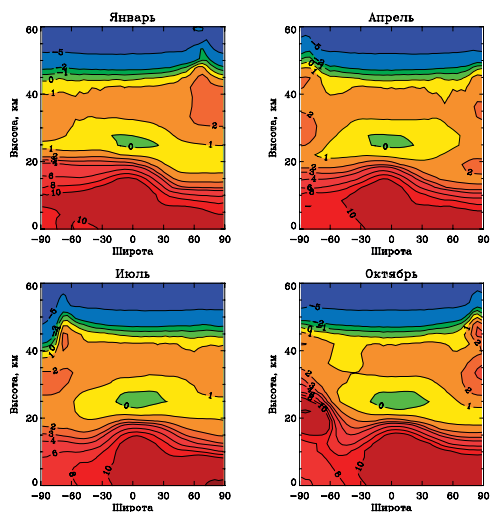


Рис. 13. Среднезональное процентное изменение концентрации озона при увеличении потоков метана в 20 раз (20-й год вычислений)

Моделирование влияния волновых возмущений на состав нижней и средней атмосферы с учетом обратных связей между физическими и химическими процессами осуществлялось при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект 14-17-00685). Изучение влияния спектральных потоков солнечной радиации на состав атмосферы проводилось при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00871-а). Используемая глобальная модель изменения состава атмосферы под воздействием динамических изменений в тропосфере и стратосфере разработана в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ.

Литература

1. Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Лисе П. Введение в химию окружающей среды. Пер с англ. — М.: Мир, 1999.
2. Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы. // Известия РАН. Сер. ФАО, 2007, т. 43, № 4, с. 437–452.
3. Смышляев С.П. Оценки времени нахождения в атмосфере химически активных антропогенных газов. // Учение записки РГГМУ, 2011, № 22, с. 195–203.
4. Кондратьев К.Я. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 564 с.
5. Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М. Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах, // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2004, т. 40, № 2, с. 211–222.
6. Смышляев С.П., Галин В.Я., Зименко П.А., Кудрявцев А.П. Моделирование влияния изменений спектральных потоков солнечной радиации, вызванных солнечной активностью на содержание атмосферного озона. // Метеорология и гидрология, 2005, № 8, с. 25–37.
7. Смышляев С.П., Галин В.Я., Шаарийбу Г., Моцаков М.А. Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2010, т. 46, № 3, с. 291–306.
8. Эммануэль А.Б., Кнопке Р.Б. Основы химической кинетики. — Наука, 1968. — 413 с.
9. Brasseur G., Orlando J., Tyndall G. Atmospheric Chemistry and Global Change. — Oxford University Press, 1999.
10. Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyaev S.P. On the use of Isaksen-Luther method of computing photodissociation rates in photochemical models. // J. Geophys. Res., 1999, vol. 104, iss. D21, pp. 26401–26417. — DOI: 10.1029/1999JD900820.
11. Gao C., Robock A., Ammann C. Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models core-based index for climate models. // J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, iss. D23. — DOI: 10.1029/2008JD010239.
12. Geller M.A., Smyshlyaev S.P. A model study of total ozone evolution 1979–2000 — The role of individual natural and anthropogenic effects. // Geoph. Res. Lett., 2002, vol. 29, iss. 22, pp. 5–1. — DOI: 10.1029/2002GL015689.
13. Jacob D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry. — Princeton Univ. Press., 1999, pp. 23–24.
14. Jacobson M.Z. Fundamental of atmospheric modeling. — University Press, Cambridge, 1999. — 656 p.
15. Schmidt G.A., Shindell D.T. Atmospheric composition, radiative forcing, and climate change as a consequence of a massive methane release from gas hydrates. // Paleoceanography, 2003, vol. 18, no. 1, p. 1004. — DOI: 10.1029/2002PA000757.
16. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics. — Wiley Interscience, 1998, pp. 22–26.
17. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Salyuk A., Rekan P., Kosmach D. Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf. // J. Geophys. Res., 2010, vol. 115, iss. C8. — DOI: 10.1029/2009JC005602.