

П.А. Блаkitная, С.П. Смышляев, В.Я. Галин

ВЛИЯНИЕ ВЫБРОСОВ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ В ЗОНАХ ИНТЕНСИВНЫХ ЭМИССИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА СОСТАВ И ТЕМПЕРАТУРУ АТМОСФЕРЫ

P.A. Blakitnaya, S.P. Smyshlyayev, V.Ya. Galin

IMPACT OF TOXIC GASES EMISSIONS IN THE REGIONS WITH INTENSIVE POLLUTIONS SOURCES ON THE ATMOSPHERIC CHEMICAL COMPOSITION AND TEMPERATURE

Для исследования влияния выбросов токсичных элементов на изменение температуры и состава атмосферы в настоящей работе данные о поверхностных выбросах окислов азота, угарного газа и углеводов в зонах повышенного загрязнения добавлялись в химический блок химико-климатической модели к естественным природным нижним граничным условиям. Рассчитанные с учетом дополнительного в зонах загрязнения источника концентрации озона и других радиационно-активных газов по описанной выше методике влияют на изменение температуры и циркуляции атмосферы и являются предметом для воздействия возникающих обратных связей.

Ключевые слова: токсичные газы, атмосфера, атмосферные химические реакции, обратные связи

Data about surface emissions of toxic gases are implemented into chemical code of a chemical transport model to combine with natural sources in order to study toxic gases impact on the temperature and chemical composition variability. Calculated with additional emissions concentrations of ozone and other radiative gases are found to impact on the temperature and atmospheric circulation and may cause feedbacks between chemistry and meteorology.

Key words: toxic gases, atmosphere, atmospheric chemical reactions, feedbacks

1. Введение

В последнее время в мире отмечается тенденция увеличения выбросов химически активных газов в атмосферу, особенно в зонах с интенсивными источниками токсичных загрязнений [1]. При этом увеличивается как качественный состав, т.е. количество выбрасываемых в атмосферу газов, так и интенсивность их выбросов [2]. В таких условиях важным становится не только химический состав выбрасываемых в приземный слой атмосферы газов, но и их способность к химической трансформации в зонах выброса и подверженности к трансграничному переносу, т.е. их перемещения атмосферными потоками в другие регионы, не содержащие источников токсичных загрязнений.

Особенности протекания химических реакций в зонах с интенсивными источниками токсичных загрязнений приводят, во-первых, к формированию новых химических газовых составляющих в результате химических реакций с участием газов, входящих в токсичные выбросы в подобных зонах [3], а во-вторых, к трансграничному переносу новых токсично опасных газов в зоны, не содержащие токсичных выбросов [4].

Кроме того, попадающие в атмосферу в загрязненных зонах газы, если они не подвергаются быстрой химической трансформации в районе выбросов, т.е. обладают долгим химическим временем жизни [5], могут подвергаться и вертикальному атмосферному переносу [6]. Попадая в верхнюю тропосферу и стратосферу, эти газы могут принимать участие в химических реакциях, которые существенно отличаются от реакций, происходящих в приземном слое атмосферы [7]. Кроме того, их химическое время жизни в средней и верхней атмосфере может быть существенно больше, чем в нижней тропосфере и они могут рассеиваться по всему Земному шару и, следовательно, иметь глобальные эффекты.

Для исследования глобальных эффектов влияния выбросов химически активных газов в районах сильного загрязнения в настоящей работе используется глобальная химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы, в которой к фоновым нижним граничным условиям добавлены потоки химически активных загрязнителей, соответствующие зонам с интенсивным токсичным загрязнением.

2. Используемая модель

Используемый комплекс моделей, объединенных в ХКМ, охватывает высотный диапазон от земной поверхности до 90 км с переменным шагом по высоте. Из общего количества 39 вертикальных σ -уровней 14 приходится на тропосферу. В стратосфере и мезосфере шаг по высоте составляет около 3 км. В горизонтальном направлении ХКМ охватывает весь земной шар с равномерными шагами по широте (4 градуса) и по долготе (5 градусов). В динамической части модели уравнения гидротермодинамики атмосферы, записанные в адвективной форме, решаются конечно-разностным методом с применением полунейвной схемы расчета [8].

Прогностическими переменными в модели общей циркуляции атмосферы кроме горизонтальных скоростей являются температура, удельная влажность и приземное давление. В радиационном блоке модели применяется метод Дельта-Эдингтона для расчета притоков тепла к атмосферным слоям [9]. Химическая часть модели учитывает изменчивость 74 основных газовых составляющих, прямо или косвенно влияющих на скорости нагрева атмосферы [10]. В модели учитываются реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и серного циклов, что позволяет рассматривать влияние химических процессов на образование и эволюцию как озона и влияющих на него газов, так и атмосферного сульфатного аэрозоля. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяет исследовать изменчивость основных влияющих на озон газов, как в стратосфере, так и в тропосфере и мезосфере [11].

Система уравнений переноса отношений смеси атмосферных газовых примесей с учетом фотохимического взаимодействия в совместной трехмерной модели решается для тридцати долгоживущих составляющих и пяти семейств (кислородного, азотного, хлорного, бромного и серного). Для газов, химическое время жизни которых существенно меньше характерного временного масштаба атмосферного переноса, в модели решается система жестких уравнений без учета их переноса атмосферной циркуляцией. Если для решения уравнений переноса долгоживущих примесей используется алгоритм динамической модели, то для жестких уравнений в химической части модели применяются самостоятельные, так называемые А-устойчивые методы

решения жестких систем, когда решения на явном и неявном шаге берутся с разными весовыми коэффициентами [12].

Алгоритм совместной модели составлен таким образом, чтобы учитывать взаимодействие между химическими и физическими процессами на каждом модельном шаге по времени. На первом этапе временного шага вычисляются потоки солнечной радиации по всей толще атмосферы в каждой географической точке для данного сезона и времени суток. При вычислении данных потоков учитывается текущее расчетное содержание озона в выше и ниже лежащих слоях атмосферы, а также рассеяние света молекулами и аэрозолям. Для расчета переноса излучения в атмосфере используется методика, основанная на применении модифицированной схемы Дельта-Эдингтона в коротковолновой части солнечного спектра [9].

Вычисленные радиационные потоки используются далее для расчета скоростей фотодиссоциации атмосферных газов, которые учитываются в химическом блоке модели для вычисления скоростей фотохимической продукции и разрушения рассчитываемых газов. При этом для оценки констант скоростей химических реакций используются вычисленные в динамическом блоке модели значения температуры атмосферы и константы химических реакций на основании данных JPL-2005 [13].

Значения скоростей фотохимической продукции вместе с вычисленными в динамическом блоке модели скоростями атмосферного переноса массы используются затем для моделирования эволюции радиационно- и химически активных долгоживущих атмосферных газов. Одновременно вычисляются концентрации короткоживущих путем решения уравнений химической кинетики без учета атмосферного переноса массы [14]. Шаги по времени в динамическом и химическом блоках модели синхронизируются (12 минут), в связи с чем при расчете концентраций химически активных газов автоматически учитывается суточный ход.

Рассчитанные таким образом концентрации озона используются далее для вычисления потоков солнечной радиации и уходящего длинноволнового излучения, которые учитываются в динамическом блоке модели для вычисления изменчивости температуры и скоростей ветра в нижней и средней атмосфере. Оцененные таким образом концентрации атмосферных газов, значения температуры и ветра иницируют следующий временной шаг совместной модели. В результате процесс взаимодействия химических и физических процессов переходит на следующий временной слой и моделирование временной и пространственной изменчивости содержания атмосферных газов и температуры продолжается в соответствии с описанными выше этапами.

Таким образом, взаимодействие между моделями осуществляется на каждом временном шаге путем использования рассчитанных в МОЦА скоростей ветра и температуры при моделировании переноса газовых примесей и скоростей химических реакций в МГС и, с другой стороны, путем использования рассчитанных в МГС значений содержания озона для оценки скоростей нагрева и выхолаживания атмосферы в МОЦА, влияющих на изменения температуры и ветра в атмосфере.

3. Результаты модельных экспериментов

Модельные эксперименты с глобальной моделью выполнялись на период с 1979 по 2009, при этом переменные для этого периода нижние граничные условия потоков

химически активных газов задавались на основании сценариев Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) [15], данные о температуре поверхности океана и площади покрытия льдом – по данным эксперимента АМИП [16], а значения площади поверхности атмосферного аэрозоля – по результатам спутникового эксперимента SAGE [17]. Переменные значения влияющих параметров позволили провести исследование влияния городских газовых выбросов на температуру атмосферы для различных уровней внешних характеристик.

На рис. 1 приведено процентное изменение атмосферного содержания нечетного азота в атмосфере, представляющего собой сумму концентраций всех химически активных азотных малых газовых составляющих, рассчитанное на модели при добавлении городских выбросов по сравнению с только фоновыми потоками. Сравнение с результатами аналогичных расчетов [18], полученных авторами без учета обратных связей между химией и динамикой, показывает, что максимальный эффект, превышающий двукратное увеличение окислов азота, в обоих вариантах наблюдается в пограничном слое атмосферы, т.е. непосредственно в местах выбросов.

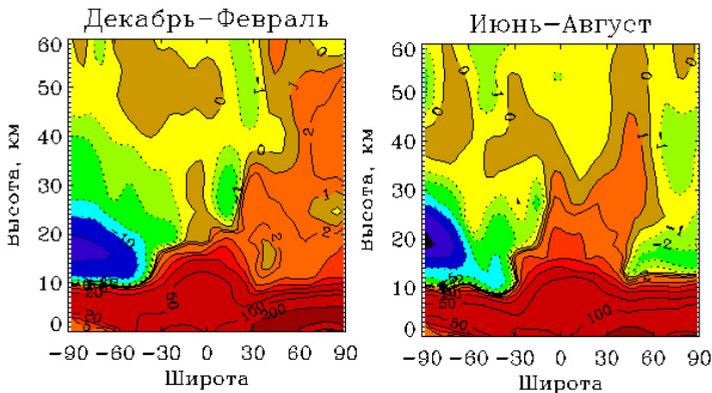


Рис. 1 – Процентное изменение концентрации нечетного азота при добавлении потоков газов в зонах интенсивного загрязнения

В стратосфере отмечается неоднородное широтное изменение концентрации окислов азота. При этом в Антарктическом регионе в нижней стратосфере отмечается уменьшение содержания нечетного азота, связанное, вероятно, с увеличением гравитационного осаждения полярных стратосферных облаков.

Максимальный эффект широтной неоднородности изменения концентрации окислов азота отмечается в полярных районах, с заметным уменьшением содержания окислов азота в период полярной ночи и развития весенней «озоновой аномалии» в Антарктиде в августе-ноябре. Подобное уменьшение содержания азотных составляющих, с одной стороны, может привести к уменьшению площади поверхности полярных стратосферных облаков, а с другой стороны, может увеличить эффект денитрификации полярной стратосферы, который является ключевым для формирования «озоновой дыры».

На рис. 2 приведено рассчитанное на модели соответствующее изменение концентрации озона. Добавление фактора переноса массы оказало максимальный эффект в нижней стратосфере, где в отличие от варианта без учета обратных связей, увеличение концентрации озона в тропических широтах отмечается в нижней стратосфере. В полярных же районах отмечается уменьшение концентрации озона в период развития весенней аномалии, что, с учетом увеличения содержания азотных составляющих, означает, что увеличение эффекта денитрификации оказывается более существенным для озоновой дыры, чем уменьшение площади поверхности полярных стратосферных облаков. Увеличение денитрификации, т.е. уменьшение содержания азотных составляющих в полярной стратосфере приводит к усилению разрушения озона в хлорных и бромных каталитических циклах, что приводит к уменьшению содержания озона в весенней Антарктической стратосфере, несмотря на уменьшение хлорной активации на уменьшившихся по площади из-за понижения концентрации паров азотной кислоты полярных стратосферных облаках.

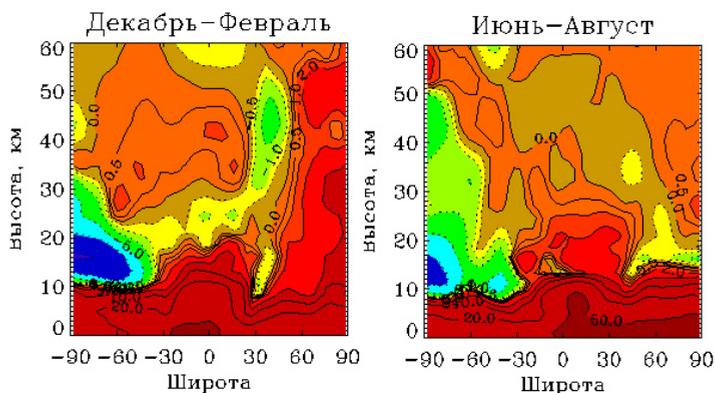


Рис. 2 – Процентное изменение концентрации озона при добавлении потоков газов в зонах интенсивного загрязнения

Изменение температуры атмосферы в результате всех процессов, сопутствующих добавлению городских выбросов окислов азота и других газов, показано на рис. 3. Максимальный эффект наблюдается в полярных районах, а особенно в Антарктическом регионе. При этом характерным является увеличение температуры полярной тропосферы и нижней стратосферы и охлаждение верхней стратосферы. Граница раздела между положительным и отрицательным изменением температуры меняется от 20 км Антарктическим летом (декабрь-февраль) до 50 км Антарктической зимой (июнь-август) и до 40 км Антарктической весной (сентябрь-ноябрь). Увеличение температуры максимально на высотах 20-25 км Антарктической весной и достигает 5 градусов. Максимальное охлаждение отмечается в этот же период, на тех же широтах и достигает 2 градусов. В нижней стратосфере охлаждение, которое в этот период превышает 0.5 градуса, наблюдается в тропических широтах.

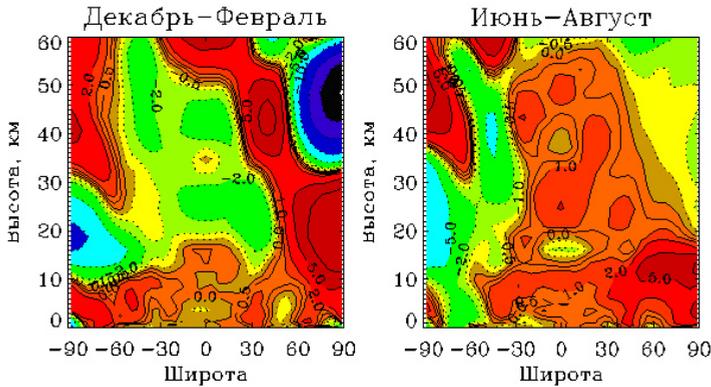


Рис. 3 – Изменение температуры атмосферы (градусы) при добавлении потоков газов в зонах интенсивного загрязнения

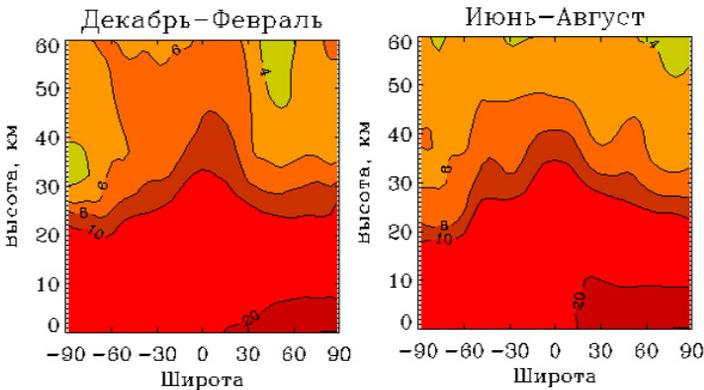


Рис. 4 – Изменение концентрации угарного газа CO (проценты) при добавлении потоков газов в зонах интенсивного загрязнения

На рис. 4 приведено расчетное изменение концентрации угарного газа при увеличении его выбросов с поверхности с добавлением маски зон интенсивного загрязнения.

Видно, что изменение концентрации CO, во-первых, является меньшим по величине по сравнению с оксидами азота (рисунок 1), а во-вторых, является положительным и равномерным по всему земному шару. В стратосфере увеличение содержания угарного газа в 2-4 раза меньше, чем в тропосфере.

4. Заключение

Проведены модельные расчеты чувствительности газового состава и температуры атмосферы к увеличению потоков химически активных газов в зонах интенсивных выбросов токсичных элементов. Результаты расчетов показали, что для оксидов

азота максимальный эффект, превышающий двукратное увеличение окислов азота, в обоих вариантах наблюдается в пограничном слое атмосферы, т.е. непосредственно в местах выбросов.

Для атмосферного озона добавление фактора переноса массы оказало максимальный эффект в нижней стратосфере, где в отличие от варианта без учета обратных связей, увеличение концентрации озона в тропических широтах отмечается в нижней стратосфере. В полярных же районах отмечается уменьшение концентрации озона в период развития весенней аномалии.

Изменение температуры атмосферы в результате всех процессов, сопутствующих добавлению выбросов окислов азота и других газов в зонах с интенсивными источниками имеет максимальный эффект в полярных районах, а особенно в Антарктическом регионе. При этом характерным является увеличение температуры полярной тропосферы и нижней стратосферы и охлаждение верхней стратосферы. Изменение угарного газа незначительно по сравнению с влиянием окислов азота.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках участия в Федеральной Целевой Программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № П2190 от 09 ноября 2009 г.), мероприятие 1.3.1 по направлению «Геохимия».

Литература

1. Ежегодный обзор «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2006 г.» / под ред. Э.Ю. Безуглая Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова. – СПб.: ГГО Росгидромета, 2008.
2. Gery, M.W. A Photochemical Kinetics Mechanism for Urban and Regional Scale Computer Modeling / M.W. Gery, G.Z. Whitten, J.P. Killus, M.C. Dodge // J. Geophys. Res. – 1989. – № 94. – С. 925–956.
3. Экогеохимия городских ландшафтов / под ред. Н.С. Касимова. – М.: изд-во МГУ, 1998. – С. 33.
4. Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М. Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40, № 2. – С. 211.
5. Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лыкосов В.Н. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. – М.: Препринт ИВМ РАН, 1998. – № 2086-В98. – С. 180.
6. Отчет Межправительственной группы экспертов по изменению климата // секретариат МГЭИК [Электронный ресурс]. – Электронный журнал. / МГЭИК.- Женева: МГЭИК, 2001. – режим доступа: <http://www.ipcc.ch>
7. Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН, ФАО, 2007. – Том 43, №4. – С. 437-452.
8. O.A.Søvde, M.Gauss, S.Smyshlyaev, I.S.A.Isaksen. Evaluation of the chemical transport model with focus on Arctic winter ozone depletion, J. Geophys. Res., 113, D09304, doi:10.1029/2007JD009240, 2008.
9. Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyaev S.P. On the use of isaksen-luther method of computing photodissociation rates in photochemical models // Journal of Geophysical Research. –1992. – Т. 97, № D7. – С. 7593.
10. Smyshlyaev S. P., Dvortsov V. L., Geller M. A., Yudin V. A. A two dimensional model with input parameters from a GCM: Ozone sensitivity to different formulation for the longitudinal temperature variation // J. Geophysical. Research. – 1998. – V. 103. – P. 28373-28387.
11. Andersen S.B., Weatherhead E.C., Stevermer A. Comparison of recent modeled and observed trends in total column ozone//
12. Journal of Geophysical Research. – 2006. – Т. 111, № 2.
13. Penenko, V.V. Models and methods for environmental protection problems / V.V. Penenko, A.E. Aloyan. // Atmos. Oceanic Opt.. – 1985. – № 3. – С. 256.

14. *DeMore W.B., Sander S.P., Golden D.M.* Chemical kinetics and photochemical data for use in stratospheric modeling. JPL Publ., 05-4, 27 pp., 2006.
15. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyaev S.P.* Parametrization of the convective transport in a two-dimensional chemistry-transport model and its validation with radon 222 and other tracer simulations // Journal of Geophysical Research. – 1998. – Т. 103, № D17. – С. 22047-22062.
16. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 47, Geneva, Switzerland, 2005.
17. *Frei, A., J. A. Miller, Robinson D.A.* Improved simulations of snow extent in the second phase of the Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIP-2) // J. Geophys. Res. – 2003.V.108. – P. 4369.
18. *Thomason L.W., Poole L.R., Deshler T.* A global climatology of stratospheric aerosol surface area density deduced from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II measurements: 1984–1994 // J. Geophys. Res. – 1997. – V.102. – P. 8967–8976.
19. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 40, № 2. – С. 211.