

С.П. Смышляев, В.Я. Галин, М.А. Моцаков, Т.В. Суходолов, Е.И. Хорева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОЗОЛЯ НА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

S.P. Smyshlyayev, V.Ya. Galin, M.A. Motsakov, T.V. Sukhodolov, E.I. Horeva

A MODEL STUDY OF THE AEROSOL PARTICLES IMPACT ON THE ATMOSPHERIC TEMPERATURE AND COMPOSITION CHANGES

Химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы используется для исследования влияния аэрозоля на радиационный режим и газовый состав тропосферы и стратосферы. Анализируются результаты модельных экспериментов, в которых содержание аэрозоля в атмосфере задается из спутниковых измерений. Сравняется влияние изменчивости содержания аэрозоля на температуру и химический состав в нижней и средней атмосфере.

Ключевые слова: аэрозоль, солнечная радиация, гетерогенные химические реакции, температура, газовый состав

A chemistry-climate model of the low and middle atmosphere is used to study aerosol impact on the radiative balance and chemical composition of the troposphere and stratosphere. The model runs results with specified aerosol particles surface area from satellite observations are analyzed. Aerosol variability impact on the temperature and chemical composition of the low and middle atmosphere is compared.

Keywords: aerosol, solar radiation, heterogeneous chemical reactions, temperature, gaseous composition

Точное и исчерпывающее описание взаимодействия между атмосферой Земли и солнечной радиацией является ключевой задачей для прогноза изменений погоды, глобального и регионального климата и состава атмосферы [1]. Атмосферные аэрозоли и облачность это наиболее изменчивые, наименее изученные и наиболее важные факторы, влияющие на радиационный режим атмосферы [2].

В последнее время появились идеи искусственной компенсации глобального потепления путем выброса в стратосферу большого количества аэрозольных частиц, которые должны ослаблять приток солнечной энергии к земной поверхности [3]. В данных предложениях учитывается лишь один аспект влияния аэрозоля на процессы в атмосфере. Между тем, подобное возмущение стратосферы может вызвать, во-первых, нагрев стратосферы, во-вторых, изменение ее газового состава, в-третьих, изменение циркуляции стратосферы и, в-четвертых, возникновение обратных связей между процессами в стратосфере и тропосфере и между изменениями состава и структуры атмосферы [4].

Для анализа последствий этих явлений в последнее время стали проводиться исследования с использованием различных моделей атмосферных процессов. Однако в настоящей работе подобное исследование с использованием химико-

климатической модели нижней и средней атмосферы впервые соотносится с аналогичным, по сути, явлением вулканических выбросов аэрозоля в стратосферу и дополняется анализом измерений.

Вулканические выбросы издавна считаются источником возможного воздействия на погоду и климат [5]. Еще 2000 лет назад Плутарх отмечал, что крупный выброс вулкана Этна в 44 году до нашей эры привел к сильному похолоданию, неурожаяю и голоду в Риме и Египте. В дальнейшем Б.Франклин выдвигал предположение, что извержение вулкана Лакагигар в Исландии в 1783 году могло быть причиной ненормально холодного лета в Европе в 1783 году и экстремально холодной зимы 1783-1784 годов. Уже в XX веке эффекты похолодания после вулканических выбросов были ассоциированы с радиационными эффектами, связанными со стратосферным аэрозолем вулканического происхождения. Количественные оценки влияния вулканических выбросов на погоду и климат через изменение содержания стратосферного аэрозоля стали появляться во второй половине XX века.

В последние десятилетия постоянно происходили извержения вулканов различной мощности, которые являлись предметом исследования с точки зрения их влияния на климат. Наиболее существенными среди них являлись извержения вулканов Эль Чичон в 1982 году и Пинатубо в 1991 году. Между тем, эти исследования главным образом концентрировались на изучение влияния вулканических выбросов на охлаждении нижней части тропосферы, т.е. области жизни биологических организмов. Между тем, было обнаружено, что вулканические выбросы не только охлаждают тропосферу, но и нагревают стратосферу. Таким образом, может меняться не только радиационный баланс тропосферы, но и радиационный баланс стратосферы и вертикальные градиенты температуры, приводящие к изменению циркуляции как в стратосфере, так и в тропосфере.

В настоящей работе, впервые проведено комплексное исследование всех аспектов влияния вулканических выбросов аэрозоля на изменения температуры и циркуляции как в тропосфере, так и в стратосфере. Для этих целей используется химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы [6,7], в которой содержание аэрозоля задается по данным спутниковых измерений в течение 1979-2003 годов.

После извержения вулкана Агунг в 1963 году впервые было отмечено влияние вулканических выбросов аэрозоля не только на климат, но и на газовый состав атмосферы и, прежде всего, на сокращение содержания озона. Влияние извержений вулканов Эль Чичон и Пинатубо на содержание озона и других атмосферных газов уже анализировались с помощью моделей газового состава стратосферы. Было отмечено, что вулканические выбросы сульфатного аэрозоля в масштабах подобных Эль Чичону и Пинатубо имеют глобальное воздействие на содержание озона, а их эффект по порядку величины сравним, или даже превосходит другие естественные природные и антропогенные факторы влияния на глобальный озон. Изменение содержания озона, водяного пара и других радиационно-активных газов в результате вулканических выбросов может в свою очередь привести к изменению нагрева атмосферы и, соответственно, ее температуры и циркуляции.

В настоящей работе впервые одновременно исследуются как радиационные эффекты вулканических выбросов, так и их влияние на содержание атмосферных газов и обратные связи между этими эффектами.

Для исследования влияния вулканических выбросов сульфатного аэрозоля на состав и структуру атмосферы использовались данные об изменении оптической толщины атмосферы по данным спутниковых измерений SAGE-1 и SAGE-II. На рис. 1 приведена межгодовая изменчивость содержания аэрозоля в нижней стратосфере по этим данным.

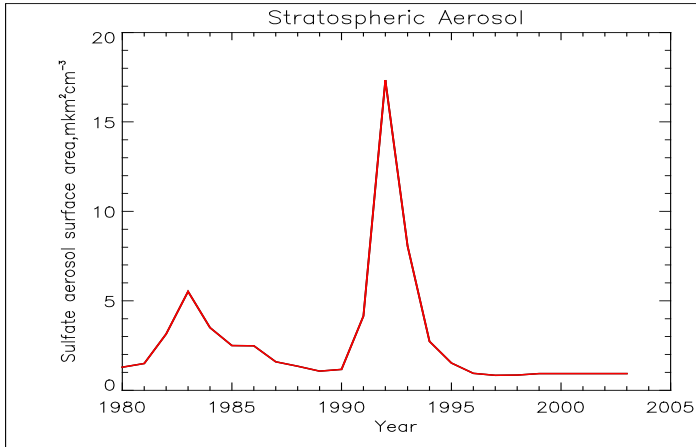


Рис. 1 – Изменение площади поверхности аэрозольных частиц в нижней стратосфере

На рис. 2 и 3 представлены результаты экспериментов по изучению влияния атмосферных аэрозолей на содержание озона и температуру стратосферы. В модельных расчетах учтены потоки газовых примесей и выбросы продуктов извержений вулканов Эль-Чичон (1982 г., Мексика) и Пинатубо (1991 г., Филиппины) (рис. 1), которые были самыми мощными в течение рассматриваемого периода времени.

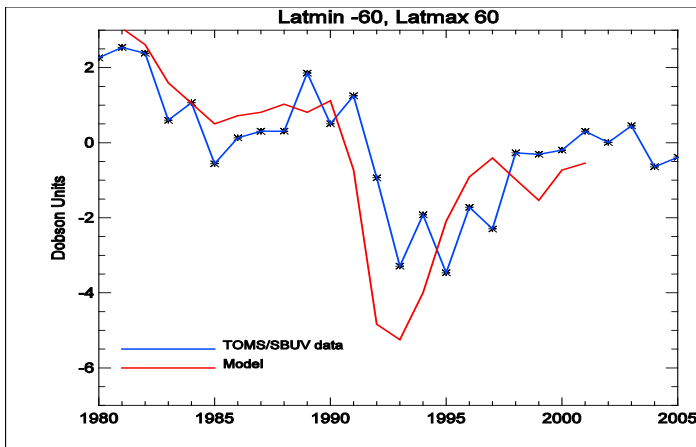


Рис. 2 – Изменчивость содержания озона с учетом извержений вулканов

Увеличение количества аэрозолей после крупных извержений приводит как к ослаблению проникающего солнечного излучения за счет рассеяния, так и к увеличению поглощения солнечной радиации и излучения Земли. В результате последнего эффекта наблюдается уменьшение прямого солнечного излучения и увеличение рассеянного. Суммарный эффект всех этих процессов приводит к нагреву атмосферы на высотах стратосферы, что хорошо заметно на рисунках, когда даже на фоне понижения содержания озона из-за его разрушения продуктами извержения, температура стратосферы некоторое время растет, тем самым усиливая разрушение озона.

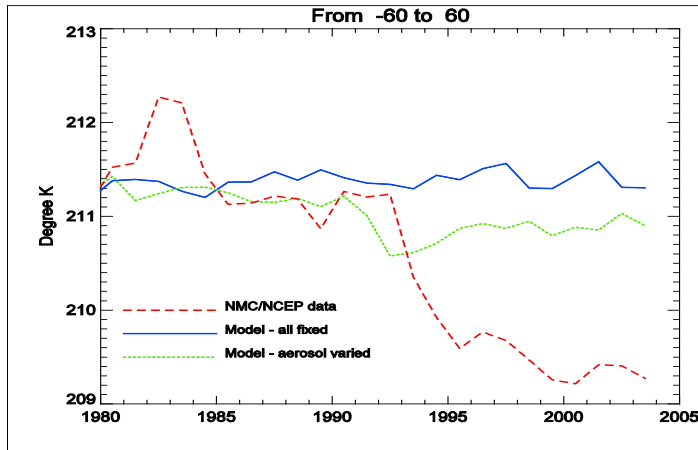


Рис. 3 – Изменчивость температуры стратосферы с учетом извержений вулканов

В целом модель неплохо воспроизводит влияние выбросов аэрозолей, обозначая резкие переходы от минимума к максимуму. Вулканическая активность несомненно является очень важным фактором, но носит больше эпизодический характер, не оказывая особого влияния на общий тренд. К тому же существенное влияние наблюдается лишь в первую половину рассматриваемого нами срока, и в оценке дальнейших, интересующих нас изменений, аэрозоли, как видно, большой роли не играют.

Изменение содержания сульфатного аэрозоля за счет вулканических процессов может привести к увеличению нагрева стратосферы за счет поглощения и рассеяния радиации добавочными частицами аэрозоля. В результате солнечная радиация не доходит до тропосферы, а остается в стратосфере и переходит в ее внутреннюю энергию. Из-за увеличения нагрева стратосферы может происходить изменение интенсивности и направления циркуляционных процессов в стратосфере, осуществляющих перенос массы и тепла.

Для исследования влияния изменчивости сульфатного аэрозоля на нагрев циркуляцию нижней и средней атмосферы были выполнены два модельных эксперимента: один с учетом вулканических выбросов аэрозоля, в соответствии с рис. 4, а в другом содержание аэрозоля фиксировалось на уровне 1979 года, когда не отмечалось крупных вулканических выбросов.

На рис. 4 приведено изменение нагрева атмосферы после извержения вулкана Эль-Чичон в 1983 году.

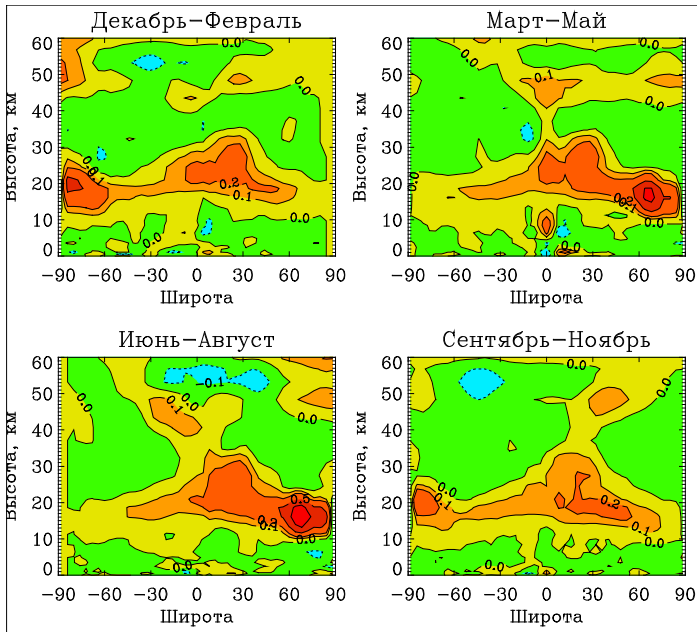


Рис. 4 – Изменение нагрева атмосферы после извержения вулкана Эль-Чичон в 1983 году

Можно отметить, что в результате извержения вулкана Эль-Чичон произошел нагрев стратосферы, местами превышающий 1 градус в день и охлаждение тропосферы в пределах до 0.1 градуса в день. Т.е. эффект в стратосфере получился до 10 раз большим, чем в тропосфере. Кроме того, можно отметить, что и в стратосфере нагрев распределился неравномерно в широтном направлении; с максимумами в средних широтах северного полушария и полярной зоне Южного полушария. Эта неравномерность может привести к изменению циркуляции.

На рис. 5 приведено изменение динамической функции тока, возникающее в результате изменения нагрева после извержения вулкана Эль-Чичон. Видно, что в результате извержения вулкана Эль-Чичон возникают дополнительные ячейки тропосферно-стратосферного обмена. При этом направление переноса массы и тепла чередуется в экваториальной зоне, а в северном полушарии усиливается полярный перенос массы и тепла. В результате этого помимо прямого воздействия вулканов на состав и структуру атмосферы температура и содержание озона могут измениться и в результате переноса тепла и массы.

На рис. 6 и 7 приведены аналогичные результаты изменения атмосферы после извержения вулкана Пинатубо в 1991 году. Извержение этого вулкана было более мощное, что видно по изменению содержания аэрозоля (рис. 1). Соответственно, и изменение нагрева, как видно из рис. 6, является более глобальным и охватывает всю нижнюю стратосферу. При этом нагрев стратосферы происходит более равномерно, чем в случае с Эль-Чичоном, а максимальный нагрев отмечается в средних широтах северного полушария и доходит до 2 градусов в день.

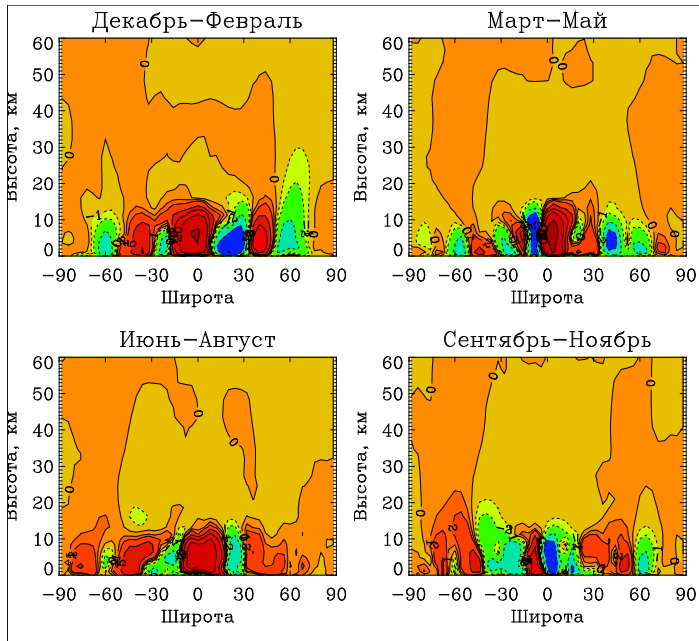


Рис. 5 – Изменение массовой функции тока в нижней и средней атмосфере после выбросов вулкана Эль-Чичон

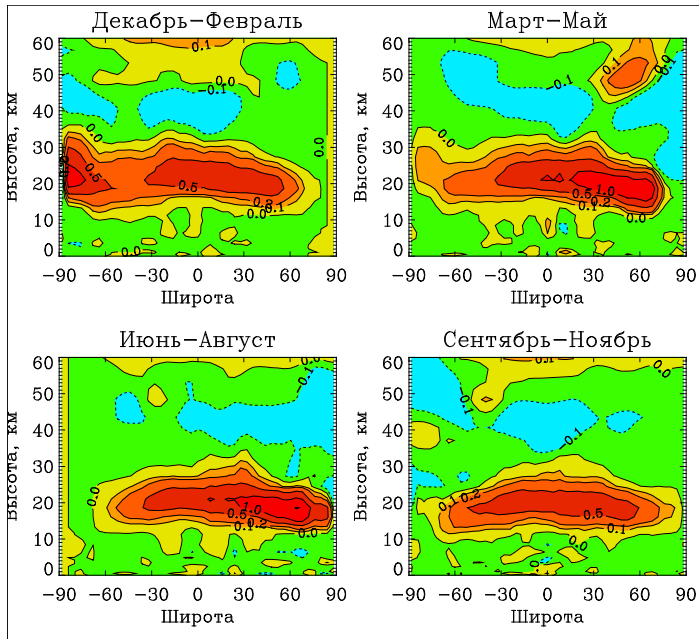


Рис. 6 – Изменение нагрева атмосферы после извержения вулкана Пинатубо в 1991 году

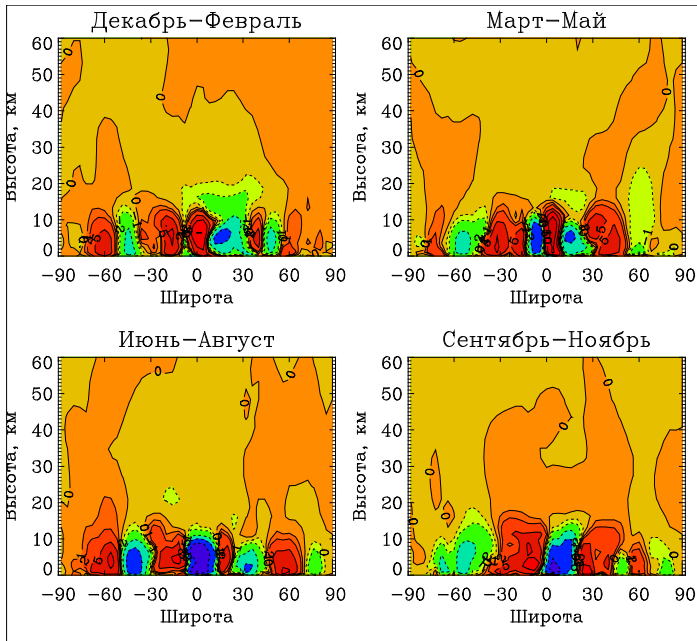


Рис. 7 – Изменение массовой функции тока в нижней и средней атмосфере после выбросов вулкана Пинатубо

Изменение массовой функции тока после извержения Пинатубо показывает, что, как и в случае с Эль-Чичоном, происходит интенсификация тропосферно-стратосферного обмена. При этом равномерность изменения нагрева приводит к тому, что этот обмен по масштабу примерно такой же, как и в случае с Эль-Чичоном. Таким образом, можно заключить, что влияние вулканического изменения аэрозоля на циркуляцию определяется не только мощностью выбросов, но и их неравномерностью и распределением в стратосфере.

Вулканические выбросы могут оказывать влияние на климат долгие годы. Наиболее известное извержение за последние 100 000 лет, было извержение вулкана Тоба на острове Суматра 73 000 лет назад уничтожило древесную растительность на большей части территории современной Индии и привело к резкому глобальному похолоданию. В результате мощнейшего извержения в атмосферу было выброшено примерно 800 км^3 пепла, а на месте вулкана образовался кратер длиной 100 км и шириной 35 км. Осадочные породы, сформированные этим пеплом, были найдены на территории Индии, на дне Индийского океана: в Бенгальском заливе и Южно-китайском море.

Извержение вызвало так называемый “мгновенный ледниковый период” – резкое похолодание из-за отражения солнечных лучей от поверхности суши, покрытой пылью, а также поглощения солнечной радиации аэрозольными частицами соединений серы, оказавшимися в верхних слоях атмосферы. Это похолодание продолжалось почти 1,8 тысячи лет.

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 № 16.740.11.0184).

Литература

1. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под редакцией К.Я. Кондратьева. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – 564 с.
2. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Росс.хим.ж., 2008. Т. LII, №5. С. 112-119.
3. Seinfeld, J.H. Atmospheric Chemistry and Physics / J.H. Seinfeld, S.N. Pandis // Wiley Interscience. 1998. P. 22-26.
4. Robock A., Marquardt A., Kravitz B, Stenchikov G. Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering // GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L19703, doi:10.1029/2009GL039209, 2009.
5. 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. V.113, D23111, doi:10.1029/2008JD010239.
6. 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.
7. Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyayev S.P. Parameterization 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. V. 103. № D17. P. 22047-22062.
8. Эммануэль А.Б., Кнорре Р.Б. Основы химической кинетики. Наука. 1968. - 413 с.
9. Jacob, D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry / D.J. Jacob // Princeton Univ. Press. 1999. P.23-24.
10. Brasseur G. Atmospheric Chemistry and Global Change [Текст]/ G. Brasseur, J. Orlando, G. Tyndall, Oxford University Press, 1999
11. Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Луце П. Введение в химию окружающей среды. Пер с англ. М.: Мир, 1999.
12. Jacobson M.Z. Fundamental of atmospheric modeling. – University Press, Cambridge, 1999. – 656 pp.