

С.П. Смышляев, В.Я. Галин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СТРАТОСФЕРНОГО ОЗОНА НА ХИМИЮ ТРОПОСФЕРЫ

S.P. Smyshlyaev, V.Ya. Galin

A STUDY OF STRATOSPHERIC OZONE IMPACT ON THE TROPOSPHERIC CHEMISTRY

Анализ спутниковых измерений содержания стратосферного и тропосферного озона и численные эксперименты с химико-климатической моделью нижней и средней атмосферы позволили получить оценки влияния изменения содержания стратосферного озона на концентрацию тропосферного озона. Основным выводом работы является заключение о том, что хотя продукция тропосферного озона при уменьшении его стратосферного содержания увеличивается преобладающей тенденцией отклика тропосферного озона в этих условиях является уменьшение потока озона из стратосферы, в результате чего содержание тропосферного озона в большинстве районов или мало меняется, или уменьшается.

Ключевые слова: химический состав атмосферы, фотодиссоциация, стратосфера, тропосфер, численное моделирование.

An analysis of stratospheric and tropospheric ozone satellite observations and numerical modeling has been performed to study stratospheric ozone impact on tropospheric ozone. The basic result of this work demonstrate the dominate role of ozone flux from the troposphere over its local production.

Keywords: atmospheric chemical composition, photodissociation, stratosphere, troposphere, numerical modeling.

В течение последних десятилетий результаты измерений регистрируют изменения газового состава и температуры как в тропосфере, так и в стратосфере [15, 26]. Наибольший общественный резонанс среди этих изменений получили тропосферное глобальное потепление и сокращение стратосферного озона. Обеспокоенность этими тенденциями привела к заключению Международных соглашений, направленных на ограничение антропогенных воздействий на повышение температуры тропосферы и утончение озонового слоя в стратосфере [17, 18, 25]. Однако кроме этих явлений наблюдения также показывают охлаждение стратосферы и изменение содержания тропосферного озона [21, 26]. Все эти явления, относящиеся к разным высотным слоям атмосферы — тропосфере и стратосфере, могут быть взаимосвязаны и влиять друг на друга.

Одним из важнейших аспектов стратосферно-тропосферного взаимодействия является взаимное влияние химических процессов. Большинство малых газов стратосферы имеют источники на поверхности Земли [5], поэтому, прежде чем достичь стратосферы, они проходят через тропосферу, где могут подвергаться химической трансформации, от интенсивности которой зависит их количество, поступающее

в стратосферу. С другой стороны, интенсивность химических реакций в тропосфере критическим образом зависит от обмена газами со стратосферой и от прохождения солнечной радиации через стратосферу.

Солнечная ультрафиолетовая радиация является ключевым фактором, определяющим интенсивность химических процессов в тропосфере [22]. Величина потока ультрафиолетовой радиации, достигающего тропосферы, в значительной степени определяется толщиной озонового слоя в стратосфере [17]. Соответственно, уменьшение содержания озона в стратосфере может привести к увеличению потоков УФ радиации, доходящих до тропосферы, и к интенсификации химических процессов в нижней атмосфере. В свою очередь возмущение химии тропосферы может изменить потоки газов с поверхностным источником в стратосферу. Это может повлиять теперь уже на химию стратосферы и изменить содержание стратосферного озона с последующим влиянием опять на потоки ультрафиолетовой радиации в тропосфере. Таким образом, могут возникнуть обратные связи между химией стратосферы и тропосферы.

Экспериментальные и теоретические исследования обнаружили, что в отличие от стратосферного озона, который в конце XX в. имел устойчивую длиннопериодную тенденцию к уменьшению [8, 21, 26], в изменчивости тропосферного озона трудно обнаружить значимый тренд [16, 24]. В зависимости от местных условий содержание озона в приземном слое и в целом в тропосфере может как увеличиваться, так и уменьшаться в ответ на сокращение стратосферного озона [16, 21, 24, 26].

С теоретической точки зрения изменение озона в тропосфере и в приземном слое определяется двумя основными факторами: динамическим, связанным с нисходящими потоками из стратосферы, содержащей значительно большее количество молекул озона по сравнению с тропосферой, и фотохимическим, определяемым локальной продукцией озона в тропосфере и приземном слое при окислении угарного газа и углеводородов в присутствии окислов азота [4, 8]. При этом, по разным оценкам, доминирующим источником тропосферного озона могут быть как фотохимический [8], так и динамический [4] факторы. При преобладании фотохимического фактора уменьшение стратосферного озона может привести к увеличению продукции тропосферного озона из-за увеличения скоростей окисления углеводородов в условиях повышенного ультрафиолетового облучения [8, 22]. Если доминирует динамический фактор, то при уменьшении содержания стратосферного озона ослабевают его потоки в тропосферу, и можно ожидать уменьшения содержания и тропосферного озона.

С другой стороны, в результате изменения потоков солнечной радиации, достигающих тропосферы, может увеличиться как продукция основных тропосферных газов, таких как озон, гидроксильные радикалы и окислы азота, так и их разрушение [4, 22]. Таким образом, знаки и количественные эффекты обратных связей между химическими процессами в стратосфере и тропосфере зависят от конкретных пространственно-временных условий, так как в результате возмущения химии тропосферы количество разрушителей озона в стратосфере может как увеличиться, так и уменьшится. Кроме того, изменение скоростей химических реакций может определяться и вариациями температуры, и динамики тропосферы и стратосферы, которые зависят от нагрева атмосферы, определяемого содержанием озона и других радиационно-активных газов [17, 22].

Для детального исследования качественных и количественных аспектов взаимодействия химических процессов в стратосфере и тропосфере целесообразно сочетать анализ одновременных измерений содержания стратосферных и тропосферных газов и теоретическое численное моделирование с использованием моделей, в которых детально описана как химия стратосферы, так и химия тропосферы, а также их связь с изменениями температуры и динамики атмосферы.

В связи с тем, что изменчивость содержания тропосферных газов при изменении содержания стратосферного озона может определяться как химическими, так и физическими процессами, важно понять относительную роль этих процессов по отдельности. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование влияния изменчивости содержания стратосферного озона на химию тропосферы в результате изменения потоков солнечной радиации, достигающих высот тропосферы. Для достижения данной цели используется химико-климатическая модель нижней и средней атмосферы, в которой изменения газового состава, радиационного режима и циркуляции атмосферы рассчитываются как в стратосфере, так и в тропосфере. Подобная модель позволяет учесть и взаимодействие между химическими и физическими процессами, что предполагается исследовать в дальнейших работах по развитию направления изучения различных аспектов стратосферно-тропосферного взаимодействия.

Методология исследования

На первом этапе настоящей работы анализировались результаты одновременных спутниковых измерений содержания как стратосферного, так и тропосферного озона. Сравнение фаз изменчивости количества озона в стратосфере и тропосфере позволяет оценить наличие и знак связей между их содержанием. Среди подобных одновременных измерений были выбраны спутниковые наблюдения прибором TOMS [20], которые предназначены, главным образом, для измерения общего содержания озона в атмосфере, но для которых существуют методики разделения стратосферного и тропосферного содержания на основе привлечения дополнительной информации [11, 12, 27].

На втором этапе для исследования чувствительности тропосферной химии к изменению содержания стратосферного озона в рамках настоящей работы были выполнены численные эксперименты с моделью газового состава атмосферы. В модели задавалась реальная изменчивость факторов, влияющих на содержание стратосферного озона, и исследовалось изменение скоростей фотодиссоциации и концентраций ключевых газов в тропосфере при изменении содержания стратосферного озона. Расчеты проводились для периода с 1979 по 2005 г. в соответствии со сценариями ВМО [26], определяющими изменчивость поверхностных потоков газов, влияющих на содержание стратосферного озона.

Для проведения настоящего исследования использовалась глобальная химико-климатическая модель (ХКМ) нижней и средней атмосферы [3], охватывающая высотный диапазон от земной поверхности до 90 км с переменным шагом по высоте. В горизонтальном направлении ХКМ охватывает весь земной шар с равномерными шагами по широте (4 градуса) и по долготе (5 градусов). В динамическом блоке модели уравнения гидротермодинамики атмосферы, записанные в адвективной форме,

решаются конечно-разностным методом с применением полуявной схемы расчета [1]. Прогностическими переменными в динамическом блоке модели являются скорости ветра, температура, удельная влажность и приземное давление.

В химическом блоке модели учитывается изменчивость 74 основных газовых составляющих, прямо или косвенно влияющих на химию как стратосферы, так и тропосферы [9, 23]. В модели учитываются реакции кислородного, водородного, азотного, хлорного, бромного и углеводородного циклов, что позволяет рассматривать влияние химических процессов на образование и эволюцию озона и влияющих на него газов в стратосфере и тропосфере. При расчете скоростей фотодиссоциации учитывается поглощение и рассеяние солнечной радиации атмосферными газами и аэрозолями [10]. Количество и тип учитываемых фотохимических реакций позволяет исследовать изменчивость основных химически активных газов как в стратосфере, так и в тропосфере и мезосфере.

Для учета обмена газами между тропосферой и стратосферой на каждом временном шаге модели рассчитанные в динамическом блоке скорости ветра и температура учитывались при моделировании переноса газовых примесей и скоростей химических реакций в химическом блоке, а, с другой стороны, рассчитанные в химическом блоке значения содержания радиационно-активных газов учитывались в динамическом блоке модели для оценки скоростей нагрева и выхолаживания атмосферы, влияющих на изменения температуры и ветра в атмосфере.

При проведении модельных экспериментов нижние граничные условия потоков химически активных газов задавались на основании сценариев Всемирной метеорологической организации (ВМО) [26], данные о температуре поверхности океана и площади покрытия льдом — по данным эксперимента АМИП [13], а значения площади поверхности атмосферного аэрозоля — по результатам спутникового эксперимента SAGE [19]. Переменные значения влияющих параметров позволили провести исследование взаимодействия стратосферной и тропосферной химии для различных уровней внешних характеристик.

Для исследования влияния уменьшения стратосферного озона на химию тропосферы модельные расчеты проводились по двум сценариям. В первом из них учитывалось влияние всех факторов изменчивости озона, а во втором сценарии не учитывалось влияние вулканических выбросов на содержание стратосферного озона. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что в результате гетерогенных химических реакций на поверхности достигающего стратосферы вулканического аэрозоля активируется разрушение стратосферного озона, в результате чего его содержание может существенно уменьшиться [8, 14, 21, 26]. Сравнение результатов модельного эксперимента с отсутствующим вулканическим аэрозолем с результатами базового модельного эксперимента, в котором учитывалось влияние вулканического аэрозоля, позволило получить оценки влияния изменчивости стратосферного озона на химию тропосферы, так как разница между содержанием аэрозоля касалась только стратосферы.

Результаты исследования

На рис. 1 приведены результаты анализа одновременных измерений содержания стратосферного и тропосферного озона, полученные на основе сравнения измерений

приборами TOMS и SBUV для 1979–2005 гг. [11, 12]. На рисунке приведены среднегодовые данные, осредненные для неполярных широт. Стратосферный озон (верхний рисунок) в течение всего периода показывает отрицательную тенденцию, которая является значимой с почти 100 % доверительной вероятностью. Для тропосферного озона, на первый взгляд, также очевидной является положительная тенденция с достаточно высокой доверительной вероятностью (нижний рисунок). Однако при внимательном рассмотрении видно, что в изменчивости тропосферного озона можно выделить два периода, связанных с использованием прибора TOMS на спутнике Nimbus-7 до 1993 г. и на спутнике Earth Probe с 1996 г. Если рассмотреть эти периоды по отдельности, то для первого из них отмечается отрицательная тенденция в изменчивости тропосферного озона с доверительной вероятностью 76 %, а для второго — положительная тенденция, тоже с относительно невысокой доверительной вероятностью 82 %.

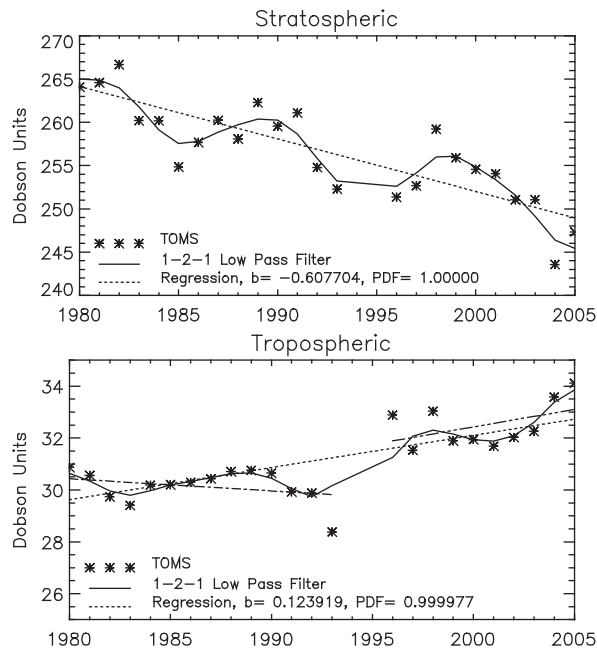


Рис. 1. Изменение стратосферного и тропосферного озона в неполярных широтах по результатам спутниковых измерений TOMS и SBUV

Если рассмотреть отдельные периоды увеличения и уменьшения тропосферного и стратосферного содержания озона (сплошные кривые с отфильтрованными высокочастотными колебаниями), то за исследуемый период для стратосферного озона можно отметить два периода с существенным уменьшением его содержания, связанные с извержениями вулканов Эль-Чичон (1982) и Пинатубо (1991). В стратосферном озоне влияние этих вулканов привело к глобальному уменьшению содержания озона, регистрируемого в течение 4–5 лет после извержений. В тропосферном

озоне для этих периодов, оба которых попадают на период действия прибора TOMS на спутнике Nimbus-7, также можно отметить уменьшение содержания, что заставляет предположить более существенную роль динамического фактора по сравнению с фотохимическим. Следует, правда, отметить, что извержение вулкана Пинатубо пришлось на конец периода действия спутнике Nimbus-7, из-за чего измерения в последнем, 1993 г., когда отмечается максимальное уменьшение как стратосферного, так и тропосферного озона, охватывают только начало года и выводы по ним следует делать с осторожностью.

Если рассчитать коэффициент корреляции между изменениями стратосферного и тропосферного озона по данным для отдельных лет, то он получается для среднегодовых значений отрицательным $-0,6$, что говорит об антикорреляции между изменениями стратосферного и тропосферного содержания озона и о возможной важной роли фотохимического фактора влияния изменений стратосферного озона на химию тропосферы. Значимость этой корреляционной связи, в соответствии с критерием Фишера [6], получается высокой — превышает 99 %, однако коэффициент детерминации для данного рода зависимости будет $0,36$, что говорит о том, что более 60 % дисперсии объясняется не линейной связью между изменчивостью стратосферного и тропосферного озона, а другими факторами. Кроме того, следует заметить, что основной вклад в отрицательную корреляцию дает период измерений со спутника Earth Probe (1996–2005), а для измерений со спутника Nimbus-7 (1979–1993) — коэффициент корреляции получается положительным, равным $0,44$.

Анализ результатов спутниковых измерений приборами TOMS и SBUV показал, что и динамический, и фотохимический факторы влияния изменчивости стратосферного озона на тропосферную химию могут играть существенную роль. В связи с тем, что полученные результаты могли быть в какой-то степени связаны с особенностями использования приборов TOMS и SBUV и методики разделения стратосферной и тропосферной частей общего содержания озона, был проведен анализ результатов разделения озона в тропосфере и стратосфере по другой методике — с использованием данных спутниковых измерений TOMS и UARS [27]. Результаты были получены для тропической зоны Тихого океана и охватывали тот же временной период — 1979–2005 гг.

Результаты межгодовой изменчивости тропического стратосферного и тропосферного озона приведены на рис. 2. В тропической зоне содержание стратосферного озона в меньшей степени подвержено влиянию вулканических выбросов, а в большей степени — воздействию солнечной активности и квазидвухлетних колебаний циркуляционного режима [2, 7]. В долгопериодной изменчивости и для этой серии измерений уменьшение стратосферного озона сочетается с увеличением его содержания в тропосфере. Коэффициент корреляции отрицательный, равный $-0,36$, имеющий значимость с вероятностью 93 % по критерию Фишера говорит о незначительном преобладании фотохимического фактора стратосферно-тропосферного влияния, однако низкий коэффициент детерминации ($0,13$) показывает на важность и других факторов.

Анализ результатов одновременных измерений содержания озона в тропосфере и стратосфере показал, что, с одной стороны, статистически значимым является противоположное изменение количества озона в стратосфере и тропосфере. Это позволяет предположить, что фотохимические процессы локального образования

тропосферного озона могут существенно реагировать на изменения стратосферного озона с увеличением тропосферной продукции при уменьшении содержания озона в стратосфере. Однако низкий коэффициент детерминации одновременной изменчивости стратосферного и тропосферного озона говорит о многофакторности взаимодействия процессов в стратосфере и тропосфере и невозможности четкого выделения доминирующего фактора.

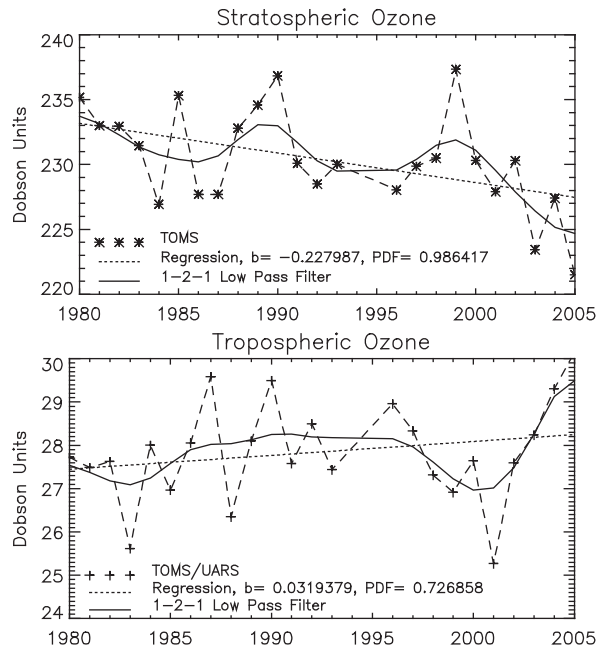


Рис. 2. Изменение стратосферного и тропосферного озона в тропических широтах по результатам спутниковых измерений TOMS и UARS

Анализ результатов спутниковых наблюдений был дополнен численным моделированием изменчивости содержания озона в стратосфере и тропосфере. На рис. 3 приведено процентное изменение содержания стратосферного и тропосферного озона по результатам модельных расчетов по отношению к уровню 70-х гг. XX в. Сплошная кривая соответствует варианту с неменяющимся от года к году стратосферным аэрозолем, то есть без учета изменчивости в результате вулканических выбросов, а пунктирная кривая показывает результаты моделирования с учетом изменчивости аэрозоля по данным SAGE [23]. Моделью воспроизводится и долгопериодная отрицательная тенденция стратосферного озона, и короткопериодные вариации, вызванные изменчивостью солнечной активности [7] (сплошная кривая) и стратосферным аэрозолем (пунктирная кривая).

Тропосферный озон в долгопериодной тенденции остается практически неизменным, что говорит о том, что на длинных временных масштабах по результатам

моделирования трудно выделить преобладающую тенденцию влияния изменений стратосферного озона на химию тропосферы. На коротких временных интервалах изменение тропосферного озона следует за изменением его стратосферного содержания. Этот результат говорит о том, что в краткосрочной перспективе влияние изменения потока из стратосферы может преобладать над локальной продукцией озона в тропосфере.

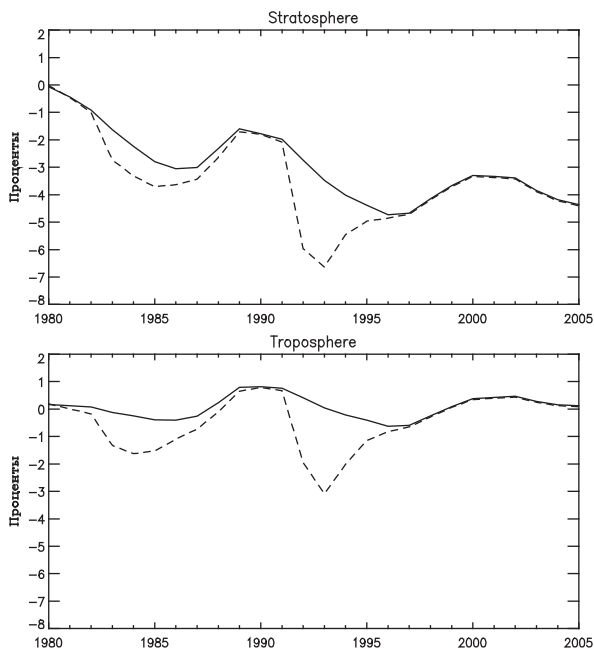


Рис. 3. Расчетное изменение стратосферного и тропосферного озона в неполярных районах

Для выяснения роли местной продукции озона в тропосфере был осуществлен анализ изменения его продукции при уменьшении содержания стратосферного озона путем сравнения результатов расчетов для двух используемых сценариев в 1993 г., когда отмечалось максимальное различие в модельных концентрациях стратосферного озона (см. рис. 3). Для этого проводилось сравнение изменчивости концентраций газов, определяющих продукцию озона в тропосфере и зависящих от количества ультрафиолетовой радиации, доходящей до тропосферы из стратосферы. Среди таких газов наиболее важными для продукции тропосферного озона являются гидроксильный радикал OH и возбужденный атомарный кислород $\text{O}(^1\text{D})$ [17, 22].

Гидроксильный радикал OH является основным окислителем в тропосфере [17]. Его химические реакции с атмосферными газами, имеющими поверхностный источник, во-первых, определяют скорость разрушения этих газов в тропосфере, во-вторых, инициируют химические цепочки локального образования озона в тропосфере, а в-третьих, определяют, какая часть газов с поверхностными источниками попадает в стратосферу и участвует там в химических реакциях [2].

Гидроксильные радикалы образуются в атмосфере при реакциях возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$ с парами воды [22]:



или с молекулярным водородом:



а также метаном



Таким образом, содержание гидроксильного радикала в тропосфере напрямую зависит от содержания возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$, который, в свою очередь, формируется в тропосфере в результате фотодиссоциации озона при поглощении солнечной радиации короче 310 нм [17]:



Интенсивность потоков солнечной радиации в тропосфере, определяющая скорость фотодиссоциации озона по этому каналу зависит от содержания стратосферного озона: чем больше содержание озона в стратосфере, тем меньше солнечных фотонов в ультрафиолетовой области доходит до тропосферы и способствует образованию возбужденного атомарного кислорода и, следовательно, гидроксила OH . С другой стороны, чем больше озона в стратосфере, тем больше его потенциально может попасть в тропосферу за счет стратосферно-тропосферного обмена массой и, следовательно, может увеличить количество образующихся из озона атомов возбужденного кислорода. Эти два процесса являются конкурирующими и для прояснения вопроса, какой из них является преобладающим, в настоящей работе проведены модельные эксперименты с химико-климатической моделью.

Скорость образования возбужденного атомарного кислорода в тропосфере в результате процесса фотолиза (4) зависит не только от интенсивности солнечной радиации, но и от содержания озона в тропосфере. Концентрация тропосферного озона определяется не только интенсивностью его притока из стратосферы, где озона существенно больше, но и балансом между его продукцией и разрушением непосредственно в тропосфере [22]. Формирование озона в тропосфере происходит в результате процессов окисления метана и других углеводородов в присутствии окислов азота [17], а его разрушение — главным образом в водородных каталитических циклах. Таким образом, увеличение продукции гидроксильных радикалов в реакции (1), с одной стороны, может привести к увеличению продукции озона при окислении углеводородов, а с другой стороны, может увеличить скорость его разрушения при химическом взаимодействии с гидроксильными радикалами.

На рис. 4 приведено расчетное изменение концентрации возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$, образовывавшемуся по D каналу. Прежде всего следует отметить, что в нижней стратосфере (выше 12 км по высоте) изменения $O(^1D)$ следуют тенденции

сокращения содержания стратосферного озона. В тропосфере же преобладает положительная тенденция, связанная с описанным выше механизмом увеличения потоков ультрафиолетовой радиации, достигающих высот тропосферы. Эта тенденция тем не менее в количественном отношении существенно меняется с изменением широты. Максимальное увеличение содержания $O(^1D)$ отмечается в средних широтах, временами превышая 10 %, а в тропической зоне не превышает 2–3 %.

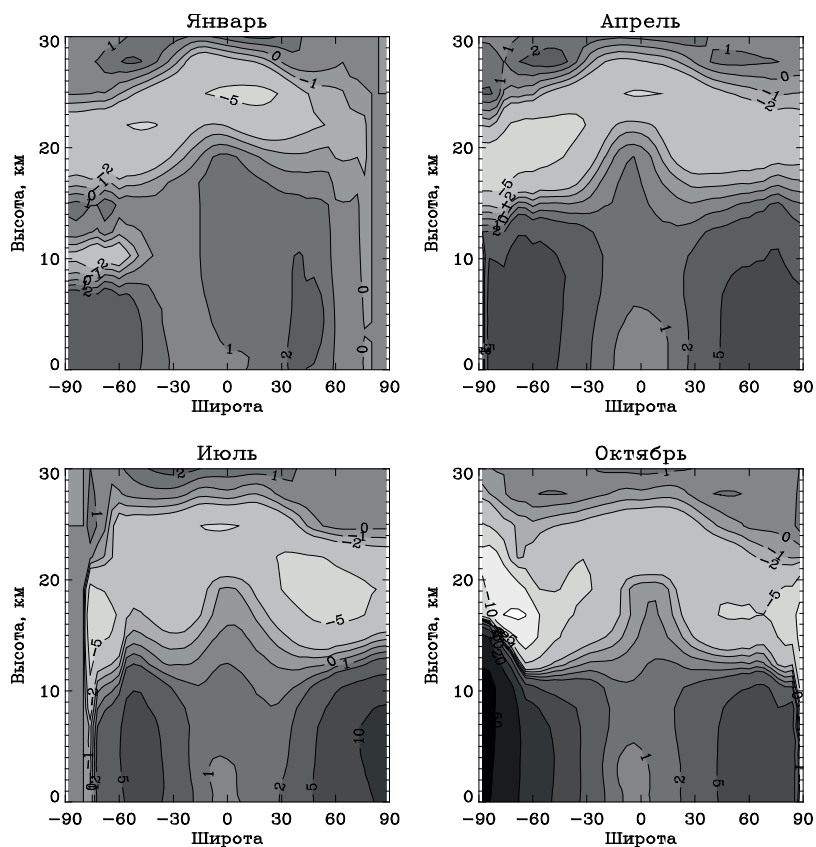


Рис. 4. Модельное процентное изменение концентрации возбужденного атомарного кислорода в 1993 г. для вариантов с учетом и без учета вулканического аэрозоля

На рис. 5 приведено процентное изменения концентрации гидроксильного радикала OH в тропосфере и в нижней стратосфере. Видно, что содержание гидроксила увеличивается в целом по тропосфере, но его увеличение почти везде несколько меньше увеличения содержания возбужденного атомарного кислорода (см. рис. 4). В изменении содержания гидроксила можно также отметить довольно существенную широтную изменчивость со значительными высотными градиентами в полярных и средних широтах.

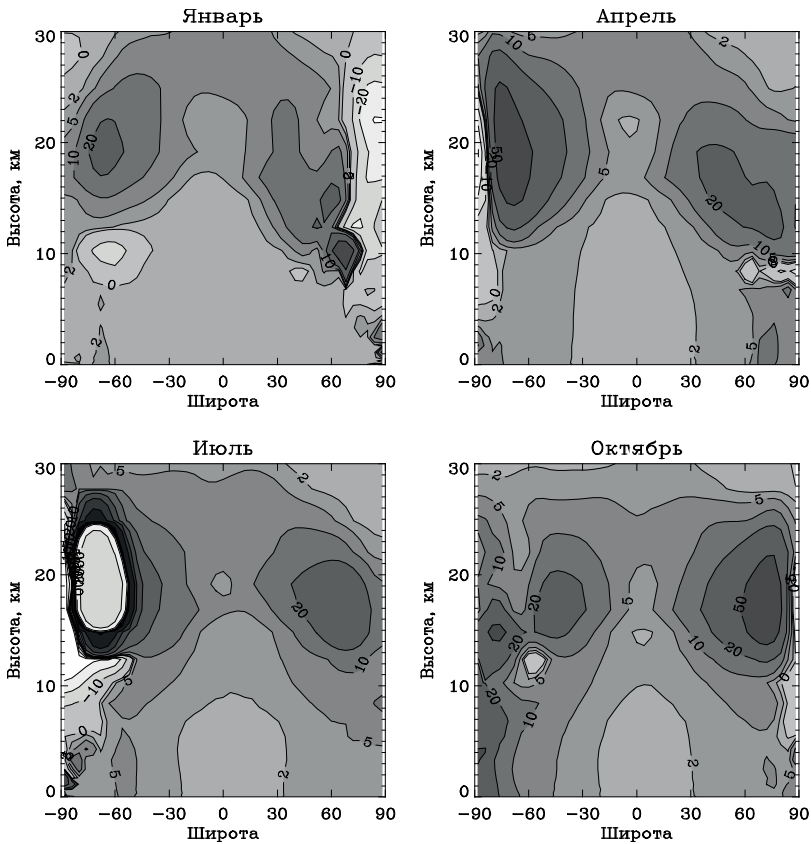


Рис. 5. Модельное процентное изменение концентрации возбужденного гидроксильного радикала ОН в 1993 г. для вариантов с учетом и без учета вулканического аэрозоля

Расчетное изменение гидроксильного радикала при существенном изменении содержания стратосферного озона и его скоростей фотодиссоциации в тропосфере позволяют предположить, что реакция тропосферной химии на изменение содержания стратосферного озона является нелинейной и подвержено влиянию различных обратных связей. Разница между южным и северным полушариями возможна из-за воздействия динамических процессов глобального и регионального переноса массы, который, как известно, по-разному протекает в разных полушариях в связи с разной орографией и влиянием планетарных волн [2]. Разная изменчивость гидроксильного радикала в полярных широтах может быть обусловлена процессами формирования полярных стратосферных облаков и сопутствующими им эффектами денитрификации и дегидратации, как это описано в первой главе настоящего отчета. В тропической зоне и изменение содержания стратосферного озона и скоростей фотодиссоциации меньше, чем в средних и полярных районах, соответственно и содержание гидроксильного радикала мало реагирует на эти эффекты.

Увеличение концентрации возбужденного атомарного кислорода должно привести к интенсификации локальной продукции тропосферного озона в присутствии метановых и неметановых углеводородов, монооксида углерода и окислов азота [17, 22]. Как показывают результаты модельных расчетов (рис. 6), действительно, продукция озона в тропосфере в результате уменьшения стратосферного озона в основном увеличивается до 5–7 % в отдельных районах. В результате этого концентрация тропосферного озона должна увеличиваться, однако, как показывают результаты выполненных в настоящей работе модельных экспериментов (рис. 7), основным эффектом в содержании озона является уменьшение его концентрации, как в стратосфере, так и в тропосфере. С учетом того, что изменение скоростей фотодиссоциации в тропосфере потенциально должно привести к увеличению содержания озона, а обмен между стратосферой и тропосферой — к уменьшению тропосферного озона в связи с сокращением озона в стратосфере, то видно, что доминирующим эффектом является второй, то есть уменьшение потока озона из стратосферы в тропосферу.

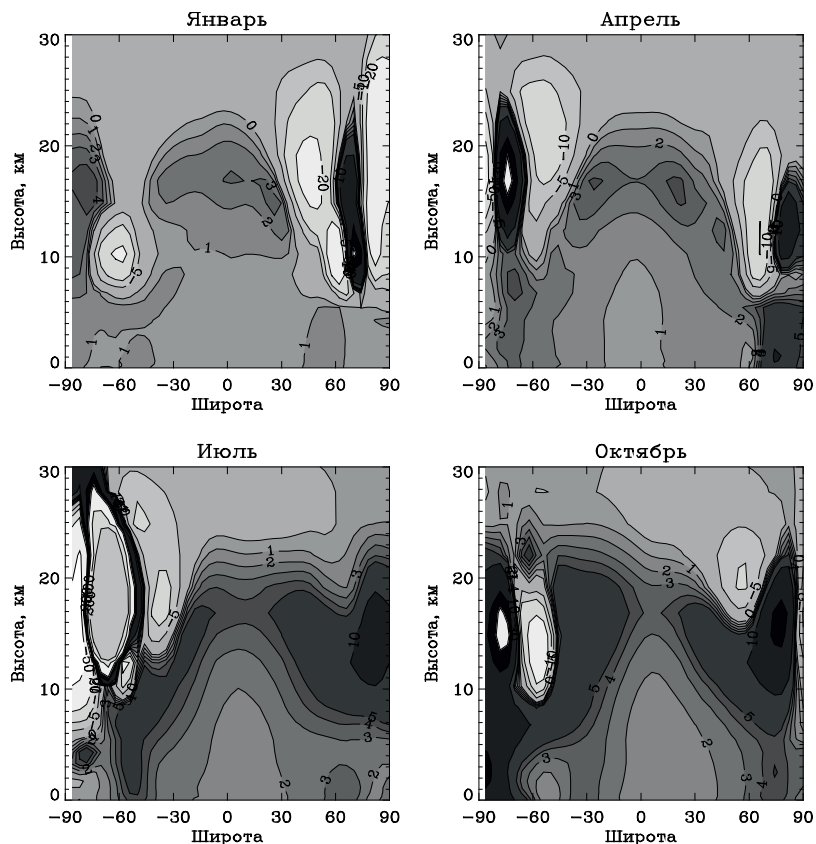


Рис. 6. Модельное процентное изменение продукции озона в 1993 г. для вариантов с учетом и без учета вулканического аэрозоля

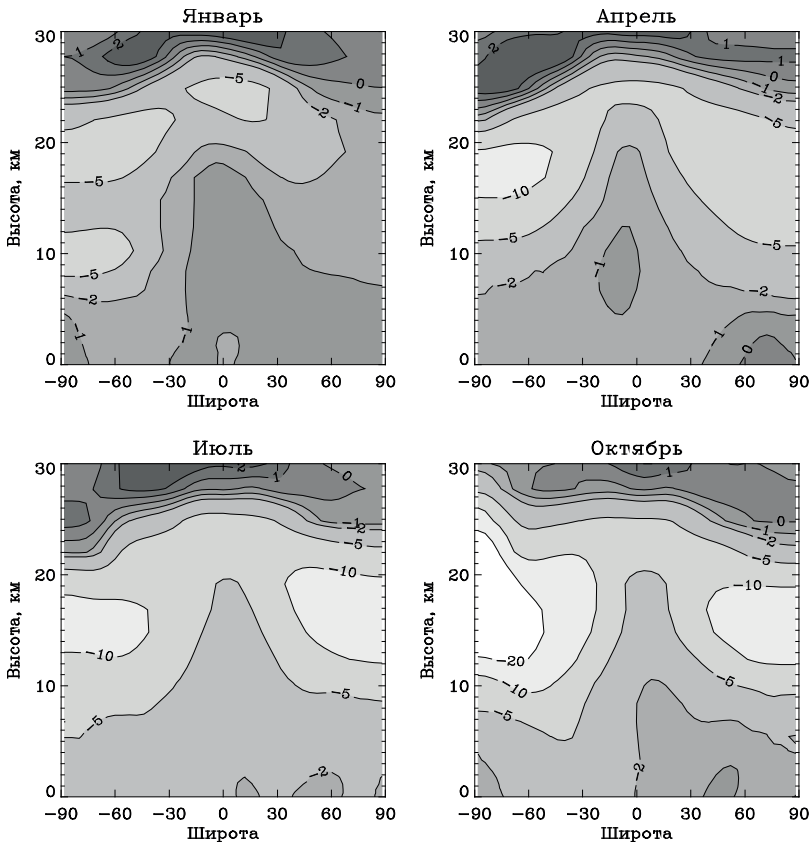


Рис. 7. Модельное процентное изменение концентрации озона в 1993 г. для вариантов с учетом и без учета вулканического аэрозоля

Заключение

В результате анализа результатов спутниковых измерений и выполнения численных экспериментов с использованием химико-климатической модели нижней и средней атмосферы, объединяющей в единый блок модели общей циркуляции и газового состава атмосферы, получены оценки влияния изменения содержания стратосферного озона на концентрацию тропосферного озона.

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты.

При реально наблюдаемом в середине 1990-х гг. сокращении содержания стратосферного озона на 5–8 % скорости фотодиссоциации озона в тропосфере по каналу с образованием возбужденного атомарного кислорода увеличились в целом по тропосфере, а особенно в средних широтах (местами более 15 %) и в полярных широтах весной;

Соответствующее увеличение содержания возбужденного атомарного кислорода $O(^1D)$ составило от 1–2 % в тропических широтах до 10–12 % в средних широтах и более 20 % Антарктической весной.

Изменение содержания гидроксильного радикала ОН, тем не менее, в этих условиях было крайне неравномерно по земному шару и сезонам: соответствующее увеличению скоростей фотодиссоциации и содержания возбужденного атомарного кислорода увеличение гидроксила в пределах 5–7 % отмечалось только зимой и весной в северном полушарии, а в остальных регионах изменение содержание гидроксила было или незначительным, или даже отрицательным, что говорит о существенной роли нелинейных эффектов и обратных связей в тропосферной химии.

Изменение концентрации тропосферного озона было результатом конкурентной борьбы двух направлений: увеличения содержания озона при увеличении скоростей окисления метана и других углеводородов и уменьшения притока озона из стратосферы в условиях сокращения содержания стратосферного озона.

Основным выводом работы по результатам анализа спутниковых измерений и проведенных модельных экспериментов является заключение о том, что, хотя продукция тропосферного озона при уменьшении его стратосферного содержания увеличивается, преобладающей тенденцией отклика тропосферного озона в этих условиях является уменьшение потока озона из стратосферы, в результате чего содержание тропосферного озона в большинстве районов или мало меняется, или уменьшается.

Литература

1. *Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я. и др.* Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. — М.: Препринт ИВМ РАН. № 2086-В98, 1998. — 180 с.
2. *Брасье Г., Соломон С.* Аэрономия средней атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 291 с.
3. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН, сер. ФАО. 2007. Т. 43. № 4. — С. 347–452.
4. *Еланский Н.Ф.* Примеси в атмосфере континентальной России // Природа. 2002. № 2. — С. 32–43.
5. *Монреальский протокол по проблеме веществ, разрушающих озоновый слой* // Бюллетень ВМО. 1988. Т. 37. № 2.
6. *Пановский Г.А., Брайер Г.В.* Статистические методы в метеорологии. — Л.: Гидрометеоздат, 1967. — 242 с.
7. *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.
8. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 2. — С. 211–222.
9. *Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.A., Smyshlyaev 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: Atmospheres, 1998, vol. 103, iss. D17, p. 22047–22062. — DOI:10.1029/98JD02084.
10. *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: Atmospheres, 1992, vol. 97, iss. D7, p. 7593–7601. — DOI:10.1029/91JD02861.
11. *Fishman J., Brackett V.G., Browell E.V., Grant W.B.* Tropospheric ozone derived from TOMS/SBUV measurements during TRACE A // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, vol. 101, iss. D19, p. 24069–24082. — DOI:10.1029/95JD03576.
12. *Fishman J., Wozniak A.E., Creilson J.K.* Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution // Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, vol. 3, iss. 4, p. 893–907. — DOI:10.5194/acp-3-893-2003.

13. *Gates W.L.* AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project // Bulletin of the American Meteorological Society, 1992, vol. 73, iss. 12, p. 1962–1970. — DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1992\)073<1962:ATAMIP>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1992)073<1962:ATAMIP>2.0.CO;2).
14. *Geller M.A., Smyshlyaev S.P.* A Model Study of Total Ozone Evolution 1979–2000 — The Role of Individual Natural and Anthropogenic Effects // Geophysical Research Letters, 2002, vol. 29, iss. 22. — DOI: 10.1029/2002GL015689.
15. *IPCC* (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2001: The Scientific Basis: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson. — Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2001. — 881 pp.
16. *Isaksen I.S.A., Zerefos C., Kourtidis K., Meleti C., Dalsøren S.B., Sundet J.K., Grini A., Zanis P., Balis D.* Tropospheric ozone changes at unpolluted and semipolluted regions induced by stratospheric ozone changes // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, vol. 110, iss. D2. — DOI:10.1029/2004JD004618.
17. *Jacob J.D.* Introduction to atmospheric chemistry. — Princeton University Press, 1999. — 264 pp.
18. *Kyoto* protocol to the United Nations framework convention on climate change // United Nations, 1998. — 21 pp.
19. *McCormick M.P., Veiga P.R.E., Chu W.P.* Stratospheric ozone profile and total ozone trends derived from the SAGE I and SAGE II data // Geophysical Research Letters, 1992, vol. 19, iss. 3, p. 269–272. — DOI: 10.1029/92GL00187.
20. *McPeters R.D., Krueger A.J., Bhartia P.K., Herman J.R. et al.* “Nimbus-7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User’s Guide”, NASA Reference Publication 1384, 1996. NASA Center for Aerospace Information, 800 Elkridge Landing Rd, Linthicum Heights, MD 21090, USA; (301) 621-0390.
21. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998* // WMO, Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 44, Geneva, Switzerland, 1999.
22. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change. — John Wiley and Sons, 1998. — 1203 pp.
23. *Smyshlyaev S.P., Dvortsov V.L., Geller M.A., Yudin V.* A two-dimensional model with input parameters from a GCM: Ozone sensitivity to different formulations for the longitudinal temperature variation // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, vol. 103, iss. D21, p. 28373–28387. — DOI:10.1029/98JD02354.
24. *Solomon K.R., Tang X., Wilson S.R., Zanis P., Bais A.F.* Changes in tropospheric composition and air quality due to stratospheric ozone depletion // Photochemical & Photobiological Sciences, 2003, vol. 2, iss. 1, p. 62–67. — DOI:10.1039/B211086E.
25. *The Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer*, 1985.
26. *WMO*, 2006: Scientific assessment of ozone depletion: WMO: Global ozone research and monitoring project — Report 47, Geneva, Switzerland, 2007. — 498 pp.
27. *Ziemke J.R., Chandra S., Bhartia P.K.* Two new methods for deriving tropospheric column ozone from TOMS measurements: The assimilated UARS MLS/HALOE and convective-cloud differential techniques // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, vol. 103, iss. D17, p. 22115–22127. — DOI:10.1029/98JD01567.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете при поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00096). Учет влияния изменчивости солнечной радиации на состав атмосферы проводился при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-05-00871-а).