

О.П. Боровская, П.А. Блаkitная, С.П. Смышляев, В.Я. Галин, Е.И. Хорева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГАЗОВОГО СОСТАВА АТМОСФЕРЫ В БУДУЩЕМ

O.P. Borovskaya, P.A. Blakitnaya, S.P. Smyshlyayev, V.Ya. Galin, E.I. Khoreva

MODELING OF THE COUPLED ATMOSPHERIC TEMPERATURE AND CHEMICAL COMPOSITION VARIABILITY IN FUTURE

Выполнены модельные эксперименты с глобальной химико-климатической моделью с целью исследования одновременных и взаимосвязанных изменений содержания озона и температуры стратосферы в будущем. Результаты проведенных экспериментов показали, что охлаждение стратосферы может оказаться решающим фактором, определяющим межгодовую изменчивость содержания озона. Этот фактор становится доминирующим в 2000-х годах, что может способствовать более быстрому восстановлению содержания озона при сокращении выбросов фреонов и галлонов.

Ключевые слова: газовый состав, атмосфера, температура, моделирование, сценарии будущих изменений

Numerical experiments with a chemistry-climate model have been done to study simultaneous and coupled gaseous composition and temperature in the stratosphere in future. Model results demonstrated that stratospheric cooling would be key factor for future year to year changes in ozone composition. This factor is supposed to be even more important in 2000 years and cause more rapid ozone recovery due to CFC emissions restrictions.

Key words: gaseous composition, atmosphere, temperature, modeling, scenarios of future variability

Содержание атмосферного озона после существенного глобального сокращения в конце XX века с середины 90х годов начало увеличиваться и почти восстановилось до уровня 70х годов к началу XXI века [1]. Это восстановление содержания озона многими политиками стало трактоваться как демонстрация успеха Монреальского Протокола и его уточнений, ограничивающих выброс в атмосферу фреонов и галлонов [2]. Однако содержание озона в стратосфере контролируется не только содержанием хлорных и бромных газов, но также и другими природными и антропогенными факторами, такими как температура стратосферы, атмосферная динамика, солнечная активность и вулканические выбросы [3]. В ряде исследований было показано, что резкое уменьшение содержания озона к середине 90-х годов, так же как и его последующее быстрое восстановление, в большей степени объясняются сочетанием сильного аэрозольного загрязнения, характерного для того периода времени, минимума одиннадцатилетнего цикла солнечной активности и охлаждения нижней стратосферы, чем увеличением, а потом стабилизацией содержания хлорных и бромных

газов [4]. При этом одним из наиболее существенных факторов, влияющим на скорость восстановления озона, является температура стратосферы [5].

Наблюдаемое охлаждение стратосферы может быть связано, как с уменьшением ее нагрева из-за сокращения содержания озона, так и с увеличением содержания парниковых газов, которые, способствуя нагреву приземной атмосферы, приводят к охлаждению стратосферы, и, наконец, с изменениями динамических условий переноса тепла [6]. Эти факторы создают предпосылки для образования обратных связей между содержанием малых газов и температурой стратосферы. Таким образом, для учета обратных связей при анализе будущих изменений содержания озона целесообразно использовать объединенные модели газового состава, позволяющие рассчитывать концентрации атмосферных газов в зависимости от температуры и скоростей ветра, и общей циркуляции атмосферы, нацеленные на расчет температуры и скоростей ветра в зависимости, в том числе, от содержания малых газов атмосферы.

Целью настоящей работы является исследование изменений содержания озона и температуры нижней стратосферы в течение первой четверти XXI века. Модельное прогностическое исследование может быть репрезентативным, если используемые для него модели способны воспроизводить наблюдаемые в прошлом и настоящем изменения исследуемых параметров. Поэтому на первом этапе настоящей работы проводилось исследование степени взаимного влияния изменений климата и газового состава в 1960-2005 годах. Если модель способна воспроизводить подобные изменения, то на следующем этапе можно ее использовать для осуществления прогноза возможности влияния выбросов парниковых газов и хлорфторуглеводородов на температуру и содержание озона в будущем. Помимо антропогенных факторов на изменения температуры и содержания озона могут оказать влияние солнечная активность и изменения содержания стратосферного аэрозоля, поэтому исследование воздействия изменчивости содержания хлорных и бромных газов на содержание озона необходимо проводить на фоне прояснения вопроса о возможности влияния естественной изменчивости радиационного режима и газового состава атмосферы на будущую изменчивость температуры и содержания озона.

Некоторые атмосферные газы, такие как метан и водяной пар, а также аэрозоль имеют потенциал воздействия как на содержание озона и других газов, так и на температуру, поэтому и изменение содержания этих газов в будущем может оказать неочевидное воздействие на температуру и содержание озона из-за появления возможных обратных связей [7]. Изменение температурных условий может оказать воздействие не только на содержание сульфатного аэрозоля, но и на формирование и эволюцию полярных стратосферных облаков [8]. Возникающие из-за этого обратные связи могут повлиять на долгопериодную изменчивость содержания озона в полярных районах и процессы формирования полярных «озоновых дыр». Кроме того, будущие изменения содержания водяного пара в результате повышения содержания метана могут повлиять как на интенсивность химических процессов, так и на изменение радиационных свойств стратосферы с последующими изменениями динамики атмосферы [9], которая, в свою очередь, может повлиять на межгодовую изменчивость как температуры, так и содержания озона.

Описание используемой модели

Используемый комплекс моделей, объединенных в химико-климатическую модель (ХКМ) [10], 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 [11].

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 [12]. При этом перенос коротковолнового солнечного излучения рассчитывается, начиная с длины волны 200 нм. В полосах поглощения озона в интервале 200–700 нм рассматриваются 8 спектральных участков из 18, принятых в модели. Эффекты нарушения локального термодинамического равновесия в мезосфере в модели не рассматриваются.

Химическая часть модели учитывает изменчивость 74 основных газовых составляющих, прямо или косвенно влияющих на скорости нагрева атмосферы [13]. 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 [14].

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.

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 нижележащих слоях атмосферы, а также рассеяние света молекулами и аэрозолем. Для расчета переноса излучения в атмосфере используется методика, основанная на применении модифицированной схемы Дельта-Эдингтона

в коротковолновой части солнечного спектра. 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.

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 атмосферных газов. Решения уравнений химической кинетики без учета атмосферного переноса массы. 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.

Важнейшую роль в фотохимических процессах в стратосфере и тропосфере играют гетерогенные процессы на поверхности атмосферных аэрозолей и полярных стратосферных облаков (ПСО) [14]. Роль гетерогенных процессов для баланса атмосферных малых газов заключается, во-первых, в поглощении газов при столкновениях с аэрозолем и ПСО, что приводит к дополнительному стоку химических составляющих, а, во-вторых, в образовании новых газов в поверхностных химических реакциях, отличных от происходящих в газовой фазе. В подобных реакциях аэрозоль выполняет роль катализатора, способствуя осуществлению химических реакций, которые или невозможны, или медленны в газовой фазе. Для учета подобных процессов в совместной модели используется специально разработанный термодинамически-микрофизический блок эволюции сульфатного аэрозоля и ПСО.

При разработке этого блока использовалось комбинирование рассмотрения термодинамических процессов фазовых переходов и микрофизики распределения частиц по размерам и их гравитационного осаждения. Основное предположение заключается в том, что частицы полярных стратосферных облаков образуются на основе

существующего в стратосфере сульфатного аэрозоля в результате поглощения паров азотной кислоты и водяного пара. В результате образуется тернарный аэрозоль, состоящий из водяного пара, серной и азотной кислот. Это предположение подтверждается результатами измерений, показывающими, что при низких температурах полярной ночи количество частиц в единице объема остается практически таким же, каким оно было до наступления полярной ночи, однако их размеры увеличиваются. Изменение состава и объема тернарного аэрозоля, а также газовый остаток водяного пара, паров азотной и серной кислоты рассчитывался в зависимости от температуры и общего объемного содержания H_2O , HNO_3 и H_2SO_4 .

Для исследования дальнейшей эволюции тернарного аэрозоля и вычислений площади его поверхности вводилось логнормальное распределение аэрозоля по размерам, на основании экспериментальных данных. Основываясь на результатах измерений, демонстрирующих, что при образовании полярных стратосферных облаков число частиц в единице объема остается таким же, каким было число частиц сернокислотного аэрозоля, а их размер увеличивается, в разработанном блоке ПСО не рассматривались микрофизические процессы образования новых частиц, а предполагалось, что происходит изменение среднего радиуса аэрозоля за счет конденсации и испарения той части объема аэрозоля, которая превышает насыщающие значения. В разрабатываемой модели, где рассмотрение эволюции полярных стратосферных облаков необходимо только для оценки степени их влияния на концентрации озона и связанных с ним газов, а изучение микрофизических процессов не является основной целью, такой подход позволяет учесть изменчивость площади поверхности аэрозоля, не внося сильных усложнений и без того сложную модель химии и динамики атмосферы. Кроме того, данный метод позволяет промоделировать процессы денитрификации и дегидратации полярной атмосферы, т.к. при увеличении среднего радиуса частиц происходит увеличение скоростей гравитационного осаждения, которые рассчитывались в зависимости от радиуса и плотности аэрозольных частиц, и процесс денитрификации интенсифицируется.

Для определения направления эволюции частиц ПСО учитывались не только температура и содержание водяного пара и азотной кислоты в данной точке пространства, но и температурная история частиц аэрозоля. Если частицы в предыдущие моменты времени находились в условиях низких температур, то крупный аэрозоль может находиться в твердой фазе, что при соответствующих термодинамических условиях может привести к образованию ПСО, состоящих из твердых азотосодержащих частиц. Если при тех же температурных условиях в предыдущей истории частиц не было достаточно низких температур, то аэрозоль будет находиться в виде жидких тернарных частиц. Подобный подход позволил, во-первых, объяснить причины наблюдаемого факта, почему ПСО не отмечаются при одинаковых температуре и содержании водяного пара и азотной кислоты в одних географических условиях, а отмечаются в других, где температура может быть даже выше. В частности, в северном полушарии температуры около 190 К отмечаются значительно реже, чем в южном полушарии, что приводит к значительно менее частым появлениям ПСО-1 в северном полушарии чем в южном, даже при достижении температур ниже насыщенного состояния азотной кислоты.

Скорости гетерогенных химических реакций в атмосфере рассчитывались, во-первых, в зависимости от площади поверхности аэрозоля и ПСО, во-вторых, от скорости теплового движения молекул, которая оценивалась по формуле Максвелла в зависимости от температуры воздуха и молекулярного веса газа и, в-третьих, от вероятности прохождения гетерогенной при реакции при попадании газовой молекулы на поверхность аэрозоля или ПСО. Последний параметр для известных гетерогенных реакций в зависимости от типа поверхности аэрозоля и ПСО заимствовался из JPL-2005 [2].

Методология модельных экспериментов

Для исследования одновременных изменений газового состава и температуры атмосферы в будущем было проведено несколько серий численных экспериментов с химико-климатической моделью (ХКМ) нижней и средней атмосферы [14], объединяющей в единый комплекс модели газового состава [13] и общей циркуляции атмосферы [12].

На первом этапе модельных экспериментов ХКМ использовалась для расчета начальных условий для эволюционного расчета. Для этого модель запускалась на период с 1970 по 1979 год и при этом инициировалась температурой поверхности океана, процентным покрытием льдом и содержанием сульфатного аэрозоля, соответствующими 1979 году, на основании данных эксперимента АМИП-2 [12], повторяющимися от года к году. При этом поверхностные выбросы атмосферных газов задавались в соответствии со сценариями ВМО-2006 [1] и менялись от года к году. Начиная с 1979 года наряду с по-прежнему меняющимися от года к году поверхностными потоками атмосферных газов добавлялась межгодовая изменчивость температуры поверхности океана и процентного покрытия льдом в соответствии с данными эксперимента АМИП-2, а также изменчивость содержания стратосферного аэрозоля по результатам спутниковых измерений прибором SAGE-2 [13], отражающими влияние вулканических выбросов на аэрозольное загрязнение атмосферы. Влияние солнечной активности на изменчивость потоков солнечной радиации учитывалось на основании данных о количестве солнечных пятен и об изменчивости потоков в различных спектральных диапазонах при изменении солнечной активности от минимума к максимуму по результатам спутниковых измерений UARS [11].

На следующем этапе модельных экспериментов проводились расчеты, нацеленные на исследование степени взаимного влияния изменений климата и газового состава в прошлом и настоящем. Период расчетов охватывал 1979-2003 годы. Поверхностные концентрации газов, имеющих наземный источник, таких как углекислый газ, метан, закись азота, хлорфторуглеводороды и углеводороды, по-прежнему задавались на основании данных ВМО-2006, солнечная активность – по данным наблюдений за числом солнечных пятен, площадь поверхности сульфатного аэрозоля – по результатам спутниковых наблюдений SAGE-2, а температура поверхности океана и процентное покрытие океана льдом – по данным АМИП. Отличие от первой серии экспериментов заключалось в том, что все эти параметры изменялись от года к году, что позволило оценить влияние этих факторов на межгодовую изменчивость содержания озона и температуры стратосферы. Целью экспе-

римента было определение причин наблюдаемых изменений и степени взаимного влияния изменений температуры и содержания озона. Для этого были выполнены расчеты, в которых фиксировалось влияние различных, влияющих на озон факторов, на уровне 1979 года.

В следующей серии модельных экспериментов исследовались будущие изменения содержания озона и температуры стратосферы. Расчеты выполнялись для периода с 2001 по 2020 годы. Период с 2001 по 2008 годы относился к настоящему времени, в течение которого результаты расчетов можно было сравнить с результатами наблюдений. В первом модельном эксперименте расчеты изменения содержания озона в течение исследуемого периода выполнялись в предположении сохранения температуры стратосферы на уровне 2000 года, т.е. без учета обратных связей между изменениями температуры и содержания озона. Целью этого эксперимента было оценить влияние изменения содержания хлорных и бромных газовых составляющих в соответствии с требованиями Монреальского Протокола, которые учитывались в базовом сценарии ВМО, на ожидаемое восстановление содержания озона без учета одновременного возможного изменения температуры стратосферы.

Дальнейшие эксперименты выполнялись с учетом обратных связей между изменениями газового состава и температуры стратосферы. В базовом эксперименте изменения температуры рассчитывались под воздействием межгодового изменения температуры поверхности океана и площади покрытия льдом поверхности океана по данным Британского HadleyCenter (<http://www.hadobs.org/>) для 2001-2007 годов и фиксировались на уровне 2007 года для последующего периода. Изменение солнечной активности рассчитывалось по результатам измерений числа солнечных пятен и опять фиксировалось на уровне 2007 года для последующего периода. Изменение газовых составляющих атмосферы управлялось поверхностными потоками газов, имеющих поверхностный источник, в соответствии с данными ВМО, которые включают сценарии изменчивости вплоть до 2100 года с учетом требований Монреальского Протокола и Киотской Конвенции. Изменения парниковых газов, в соответствии с этими данными, влияло также и на изменения температуры атмосферы. Изменение содержания сульфатного аэрозоля до 2005 года задавалось по данным спутниковых измерений SAGE-2, а в последующий период рассчитывалось на основе данных 2005 года с учетом термодинамической корректировки в зависимости от изменений температуры стратосферы.

Помимо базового эксперимента были выполнены также расчеты по дополнительным сценариям, нацеленным на исследование чувствительности изменения температуры и содержания озона к вариациям влияющих факторов. В первом дополнительном эксперименте содержание углекислого газа фиксировалось на уровне 2005 года. Тем самым исследовалось, в какой степени влияние выбросов парниковых газов может оказать воздействие на изменение температуры стратосферы с последующим влиянием на скорости химических реакций, определяющие изменение содержания атмосферного озона. Во втором дополнительном эксперименте содержание аэрозоля фиксировалось на уровне 2005 без учета его изменения при вариациях температуры стратосферы. Тем самым исследовалось влияние гетерогенных реакций на поверхности сульфатного аэрозоля на межгодовую изменчивость содержания озона.

В третьем дополнительном эксперименте изменение содержания метана фиксировалось на уровне 2005 года с целью исследования влияния этого газа как на содержание водяного пара, что должно быть связано как с влиянием на радиационный режим и фотохимию атмосферы, так и напрямую на химию атмосферы, т.к. метан способствует образованию озона и некоторых водородных газов в атмосфере.

Результаты модельных расчетов

На рис. 1 приведены результаты моделирования межгодовой изменчивости общего содержания озона, осредненного для неполярных районов в течение 1979-2005 годов. Сравнение результатов расчетов с наблюдениями показывает в целом хорошее соответствие, что говорит о том, что совместная химико-климатическая модель может быть использована как для анализа причин наблюдаемых изменений содержания озона в прошлом и настоящей, так и для прогноза его изменчивости в будущем.

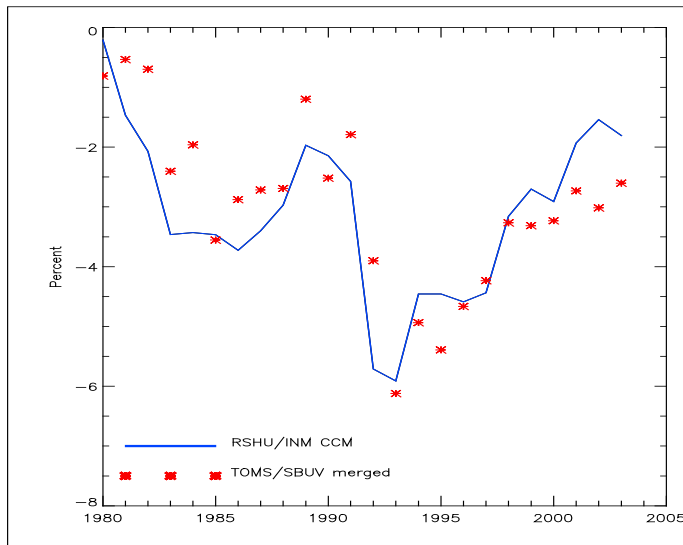


Рис. 1 – Изменение общего содержания озона по отношению к уровню 1979 года по результатам моделирования с химико-климатической моделью (сплошная линия) и спутниковых измерений (звездочки)

На рис. 2 приведены результаты расчетов изменения содержания озона в тот же период по сценариям с фиксированным воздействием различных озоноразрушающих факторов. При воздействии только выбросов хлорсодержащих фреонов и бромсодержащих галлонов (синяя линия) можно отметить, что, во-первых, глобальное сокращение содержания озона составляет 2-2.5% в минимуме, а не 5-6% как показывали предварительные оценки, а, во-вторых, что восстановление озона с середины 90-х годов не связано с действием Монреальского Протокола, т.к. без учета влияния других факторов можно говорить только о некоторой стабилизации содержания озона к концу XX века и слабой тенденции к восстановлению в начале 2000х годов (синяя линия).

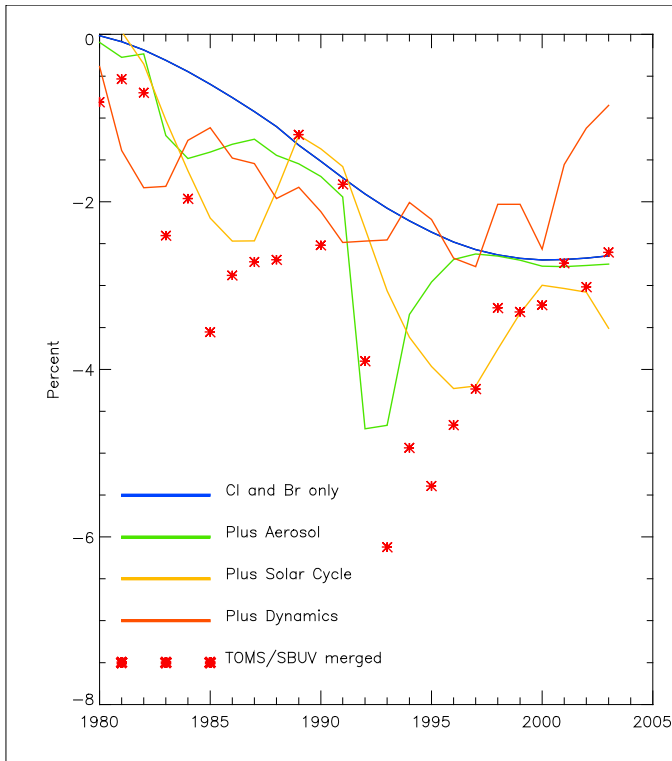


Рис. 2 – Изменение общего содержания озона по отношению к уровню 1979 года при фиксированных озонотормозящих факторах

Первая половина 90-х годов характеризуется совпадением понижающего действия на озон содержания аэрозоля (зеленая линия), солнечной активности (желтая линия) и антропогенных выбросов фреонов и галлонов (синяя линия). Совокупное действие этих факторов и привело к резкому уменьшению глобального содержания озона в этот период. Во второй половине 90-х годов содержание аэрозоля, а затем и солнечная активность начинают действовать в сторону повышения содержания озона, к чему добавляется динамический фактор (оранжевая линия), связанный с изменением температуры, т.е. с охлаждением стратосферы. Этот фактор становится доминирующим в 2000-х годах (оранжевая линия), что может способствовать более быстрому восстановлению содержания озона при сокращении выбросов фреонов и галлонов.

На рис. 3 показано расчетное изменение температуры нижней стратосферы в сравнении с данными наблюдений. Модель воспроизводит охлаждение стратосферы, однако во второй половине 90-х годов она демонстрирует некоторое восстановление температуры, связанное, по-видимому, с реакцией на увеличение содержания озона, что должно приводить к увеличению нагрева стратосферы. Однако результаты измерений показывают дальнейшее охлаждение, что говорит том, что озонный фактор не является здесь преобладающим.

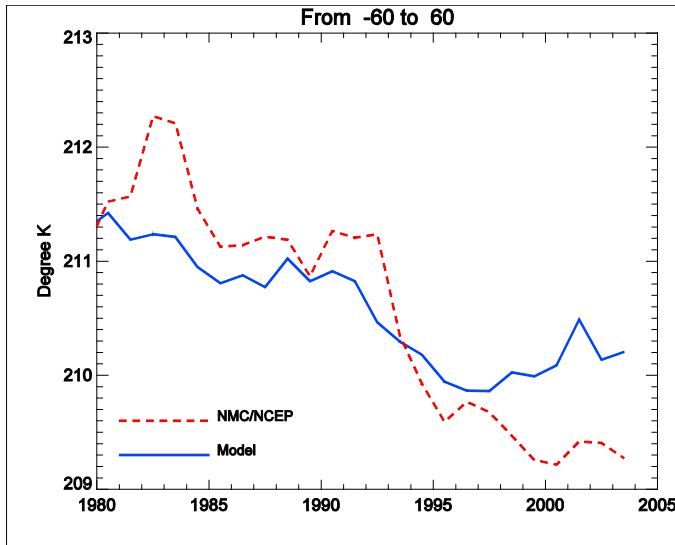


Рис. 3 – Изменение температуры нижней стратосферы (12-20 км) по результатам моделирования (сплошная линия) и измерений (пунктир)

На рис. 4 приведены межполушарные различия между моделируемой и наблюдаемой температурой стратосферы. В южном полушарии соответствие между расчетами и измерениями лучше, чем в северном полушарии, и это при том, что величина уменьшения температуры стратосферы в южном полушарии больше, чем в северном. Отличия влияющих на температуру факторов между полушариями может быть в изменении температуры поверхности океана и в активности планетарных волн.

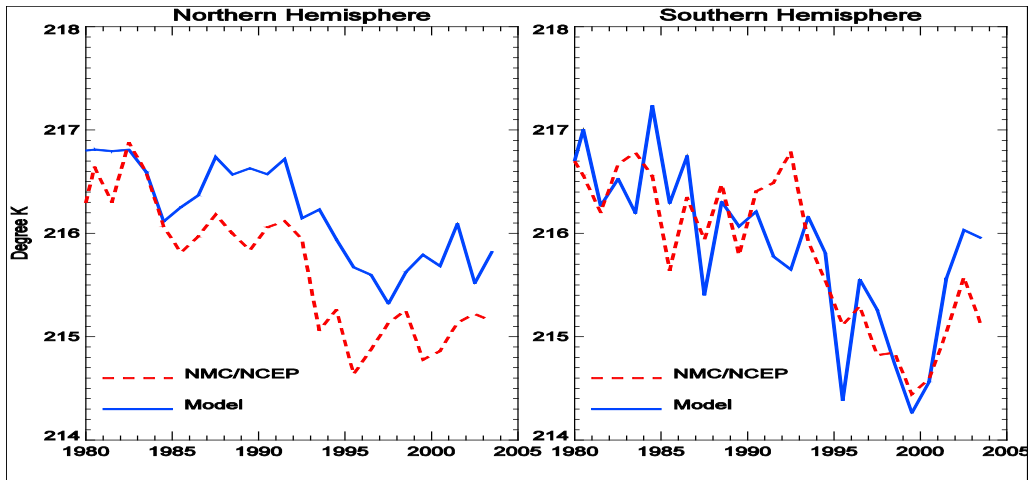


Рис. 4 – Изменение температуры нижней стратосферы (12-20 км) по результатам моделирования (сплошная линия) и измерений (пунктир) для северного и южного полушарий

На рис. 5 приведено используемое в используемой химико-климатической модели изменение средней температуры поверхности океана для северного и южного полушарий. Видно, что тенденция увеличения температуры поверхности океана в южном полушарии более явно выражено, что, по всей видимости, способствует формированию вертикальных и горизонтальных потоков тепла и массы, приводящих к охлаждению нижней стратосферы и подавляющих влияние изменения содержания озона. С другой стороны, известно, что планетарные волны более развиты в северном полушарии, что связано с более разнообразной орографией в этом полушарии, в результате чего может происходить изменение обмена воздухом между тропосферой и стратосферой и изменения температуры нижней стратосферы. По всей видимости, описание активности планетарных волн в используемой химико-климатической модели, также как и условия тропосферно-стратосферного обмена требуют дальнейших исследований и уточнений. В целом соответствие результатов расчетов газового состава и температуры хорошо совпадает с измерениями, что делает возможным использование данной модели для прогностических расчетов.

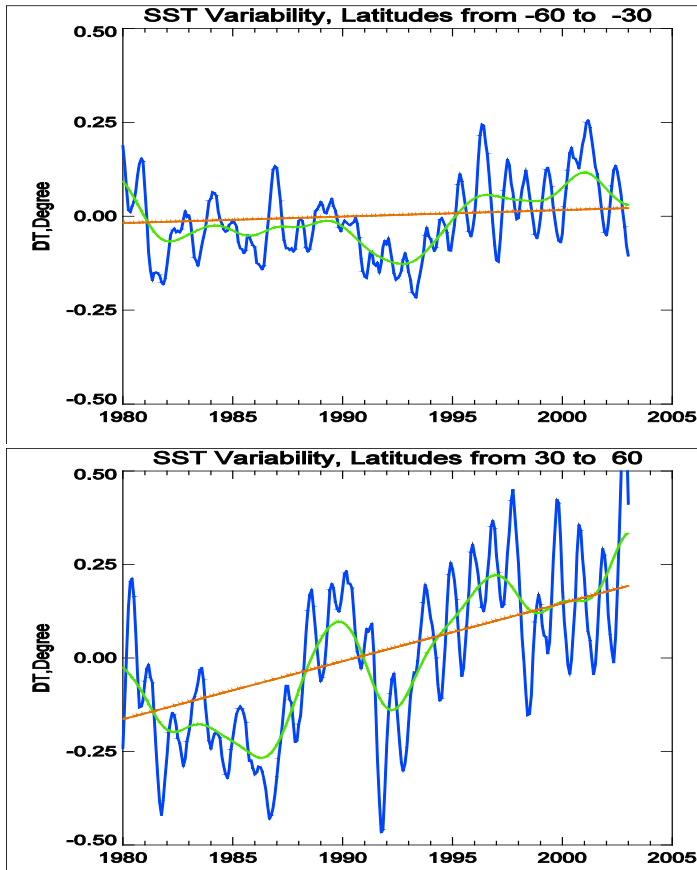


Рис. 5 – Изменение температуры поверхности океана в северном и южном полушариях

На рис. 6 приведено рассчитанное на модели изменение содержания озона для неполярных районов в предположении неизменной температуры нижней стратосферы. При этом процентное отношение по-прежнему берется к уровню 1979 года, чтобы контролировать скорость восстановления содержания озона до уровня, когда не наблюдалось существенных глобальных изменений содержания озона. В условиях холодной стратосферы 2000 года и при отсутствии влияния солнечной активности и аэрозоля содержание озона показывает быструю тенденцию к восстановлению, несмотря на то, что, в соответствии со сценариями ВМО, содержание хлорных и бромных составляющих за этот период сокращается не очень существенно. Таким образом, можно отметить, что изменение температуры стратосферы, влияющей на скорость протекания реакций разрушения озона, при оценке скорости восстановления глобального содержания озона до уровня 70-х годов может оказаться даже более существенным фактором, чем сокращение выбросов фреонов и галлонов.

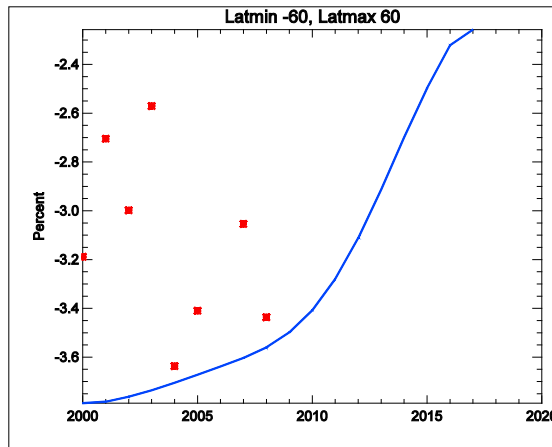


Рис. 6 — Будущие изменения содержания озона в неполярных районах без учета изменения температуры стратосферы

На рис. 7 показано будущее изменение содержания озона в базовом сценарии, когда учитываются изменения солнечной активности, аэрозоля и обратные связи между изменениями температуры и озона. Можно отметить, что, во-первых, соответствие результатов расчетов и измерений становится лучше для настоящего периода (2001-2008), во-вторых, тенденция к восстановлению содержания озона сохраняется, однако скорость увеличения содержания озона при учете обратных связей уменьшается, в-третьих, основное возрастание начинается после 2010 года, и, в-четвертых, что в будущем отмечаются короткопериодные колебания содержания озона, хотя солнечная активность, температура поверхности океана и площадь покрытия льдом, которые определяли короткопериодную изменчивость в прошлом, сохраняются на уровне 2007 года. Помимо внутренней изменчивости интерактивной системы, менялось также аэрозольное содержание атмосферы, рассчитываемое в зависимости от температуры стратосферы, которое могло оказать влияние на короткопериодную изменчивость содержания озона.

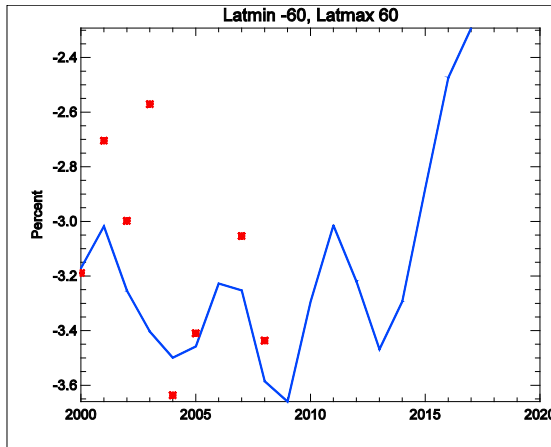


Рис. 7 – Будущие изменения содержания озона в неполярных районах в базовом сценарии

На рис. 8 приведено изменение содержания озона, рассчитанное в предположении фиксирования содержания аэрозоля на уровне 2005 года. Видно, что изменение содержания озона после 2010 года стало более плавным, что говорит о важной роли стратосферного сульфатного аэрозоля и гетерогенных процессов на его поверхности для исследования долгопериодных трендов содержания озона как в настоящем, так и в будущем.

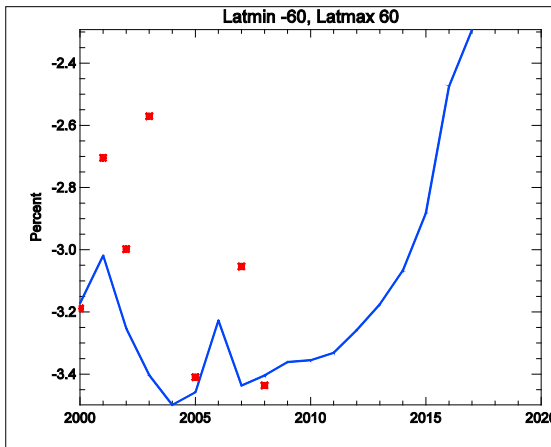


Рис. 8 – Будущие изменения содержания озона в неполярных районах в при фиксированном после 2005 года аэрозоле

Модельные расчеты изменения содержания озона при изменении содержания метана и углекислого газа не показали значимых отклонений от базового сценария. По всей видимости исследуемый интервал изменений этих газов (20 лет) является слишком коротким для того, что отметить их существенное влияние на газовый состав и температуру, хотя потенциал для такого воздействия существует. Планируемые

в дальнейшем исследования на более протяженный период времени (до 2050 года) должны помочь прояснить роль этих долгоживущих газов.

Заключение

Выполнены модельные эксперименты с глобальной химико-климатической моделью с целью исследования одновременных и взаимосвязанных изменений содержания озона и температуры стратосферы в прошлом, настоящем и будущем.

Результаты проведенных экспериментов показали, что охлаждение стратосферы может оказаться решающим фактором, определяющим межгодовую изменчивость содержания озона. Изменение содержания озона в первой половине 90х годов может объясняться совпадением понижающего действия на озон содержания аэрозоля, солнечной активности и антропогенных выбросов фреонов и галлонов. Совокупное действие этих факторов и привело к резкому уменьшению глобального содержания озона в этот период. Во второй половине 90х годов содержание аэрозоля, а затем и солнечная активность начинают действовать в сторону повышения содержания озона, к чему добавляется охлаждение стратосферы, влияющее как на скорости химических реакций разрушения озона, так и на динамические процессы его переноса атмосферной циркуляцией. Этот фактор становится доминирующим в 2000х годах, что может способствовать более быстрому восстановлению содержания озона при сокращении выбросов фреонов и галлонов.

Сравнение результатов моделирования межгодовой изменчивости температуры стратосферы показало, что изменение содержания озона не является определяющим фактором этой изменчивости. Хотя изменение содержания озона может привести к изменению нагрева стратосферы, другие факторы, такие, как вариации температуры поверхности океана и активности планетарных волн, отличающиеся в разных полушариях Земли, могут оказать более существенное влияние на изменение температуры стратосферы и далее концентрации малых газов атмосферы.

Эксперименты по исследованию будущих изменений содержания озона показали, что в условиях холодной стратосферы, когда замедляются химические реакции разрушения озона, восстановление глобального содержания к уровню 70х годов XX столетия может происходить быстрее, чем будет сокращаться содержание в атмосфере хлорных и бромных газовых примесей. В условиях обратного воздействия изменения газов на температуру стратосферы это восстановление может замедлиться, если при увеличении содержания озона стратосфера начнет нагреваться. Однако изменение других факторов и, прежде всего, содержания аэрозоля, солнечной активности и температуры поверхности океана может повлиять на изменения как температуры, так и газового состава и, следовательно, на скорость восстановления озона.

Модельные расчеты изменения содержания озона при изменении содержания метана и углекислого газа не показали значимых отклонений от базового сценария. По всей видимости, исследуемый интервал изменений этих газов (20 лет) является слишком коротким для того, что отметить их существенное влияние на газовый состав и температуру, хотя потенциал для такого воздействия существует.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (ГК № 2595 от 26 ноября 2009 г.) по направлению «Физика атмосферы».

Литература

1. WMO, Global Ozone Research and Monitoring // Scientific Assessment of Ozone Depletion Project. Report No. 44. – Geneva, 1999.
2. The Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer. – Vienna, 1985.
3. Монреальский протокол по проблеме веществ, разрушающих озонный слой : бюллетень ВМО. – Монреаль: 1988. – Т. 37, №2.
4. *Smyshlyaev S. P., Dvortsov V., Geller M.A., Yudin V.* A two-dimensional model with input parameters from a general circulation model: Ozone sensitivity to different formulations for the longitudinal temperature variation // *J. Geophys. Res.* – 1998. Vol. 103. – P. 28373–28387.
5. *Yudin V., Smyshlyaev S.P., Geller M.A., Dvortsov V.* Transport diagnostics of GCMs and implications for 2-D chemistry transport model of troposphere and stratosphere // *J. Atmospheric Sci.* – 2000. Vol. 57. – P. 673–699.
6. *Алексеев В.А., Володин Е.М., Галин В.Я., Дымников В.П., Лысков В.Н.* Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. – М.: Препринт ИВМ РАН № 2086-В98, 1998. – 180 с.
7. *Дымников В.П., Володин Е.М., Галин В.Я.* Чувствительность климатической системы к малым внешним возмущениям // *Метеорология и гидрология.* – 2004. – № 4. – С. 77-92.
8. *Seinfeld, J.H.* Atmospheric Chemistry and Physics / *J.H. Seinfeld, S.N. Pandis* // Wiley Interscience. – 1998. – P. 22–26.
9. Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies // NASA Panel for Data Evaluation. – 2003. №14.
10. *Stockwell W. R.* A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling / *W. R. Stockwell, F. Kirchner, M. Kuhn* // *J. Geophys. Res.* – 1997. Vol. 102. – P. 20–21.
11. *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.
12. *Галин В.Я., Володин Е.М., Смышляев С.П.* Модель общей циркуляции атмосферы ИВМ РАН с динамикой озона // *Метеорология и гидрология.* – 2003. – № 5. – С. 13–24.
13. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // *Изв. РАН.* – 2007. – Т. 43, №4. – С.437–452.
14. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Г. Шаарийбуу, Моцаков М.А.* Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2010. – Т. 46, №3. – С. 265–280.