МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская работа)

На тему: «Численное моделирование влияния изменения климата на газовый состав полярных районов»

Исполнитель Усачева Маргарита Александровна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Доктор физико-математических наук, профессор

(ученая степень, ученое звание)

Смышляев Сергей Павлович

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 05 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

Содержание

Введение 3

Глава 1. Озон: прошлое, настоящее и будущее 5

1.1 Антропогенные возмущения газов в атмосфере 8

1.2 Современное состояние озона в атмосфере 15

1.2.1. Озон и озонразрушающие вещества 15

1.2.2. Озон и гидрофторуглероды 24

1.2.3. Озон и аэрозоль 26

1.2.4. Стратосферный озон и изменение климата 27

1.3 Будущее озона и его контроль 30

2. Комбинированная химико-климатическая модель общей циркуляции атмосферы SOCOLv3. 35

2.1 Динамический модуль MA-ECHAM5 43

2.2 Химический модуль MEZON 45

2.3 Настройка модели и граничные условия 47

3. Численное моделирование влияния изменения климата на газовый состав атмосферы 50

Заключение 68

Список литературы 70

Введение

Озон является одним из важнейших газов в атмосфере, который влияет на климат нашей планеты. Об актуальности работы говорит и большое количество проектов Всемирной метеорологической организации, посвященных всесторонним исследованиям состояния озона в атмосфере.

Исследование вариаций параметров озонового слоя и поиски основных причин этих изменений до настоящего времени остаются проблемой, актуальность которой определяется существенной ролью озона в сложной системе «Солнце – атмосфера – поверхность Земли – космос». Поглощая ИК-излучение Земли в полосе 9,57 мкм, озон вносит вклад в изменение температуры нижней атмосферы, а поглощая УФ-излучение Солнца в диапазоне 200-320 нм, влияет на температурную стратификацию стратосферы.

Целью данной работы является оценка относительного вклада основных химических и физических процессов в наблюдаемую изменчивость климата и газового состава атмосферы в полярных регионах с использованием химико-климатической модели (ХКМ) SOCOLv3 в 1980-2020 годах.

Для выполнения цели были поставлены следующие задачи:

1) Составь сценарии для исследования относительного вклада основных химических и физических процессов в наблюдаемую изменчивость климата и газового состава атмосферы в полярных регионах с использованием химико-климатической модели (ХКМ) SOCOLv3 в 1980-2020 годах;

2) Провести численные эксперименты и верификацию полученных данных по данным наблюдений спутника SBUV;

3) Проанализировать изменчивость температуры тропосферы и нижней стратосферы, а также содержания озона за период с 1980 по 2020 годы по данным каждого сценария ХКМ SOCOLv3.

4) Проанализировать изменчивость зонального ветра в нижней стратосфере полярных регионов, а также содержания озона за период с 1980 по 2020 годы по данным каждого сценария ХКМ SOCOLv3.

Для анализа вариаций озона использовались данные моделирования химико-климатической модели SOCOLv3 для общего содержания озона, озона, зонального ветра и температуры воздуха с 1980 по 2020 год. Для верификации модели использовались данные наблюдений по общему содержанию озона в столбе воздуха, полученные с помощью набора данных спутника SBUV с 1980 по 2020 год.

Исследовательская работа состоит из трех глав, которые включают в себя 17 рисунков.

В первой главе описывается состояние озона в прошлом, настоящем и будущем. Приведены факторы, влияющие на концентрацию озона в атмосфере и их концентрации. Рассмотрены основные процессы, которые влияют на состав атмосферы.

Во второй главе представлено описание химико-климатической модели SOCOLv3, особенности и структура модели. Подробна описана работа химического и динамического модулей.

В третьей главе приведены результаты моделирования и описана постановка задачи. Исследовано изменение содержания озона по широтам и на разных высотах. Также проанализированы полученные данные по температуре и зональному ветру.

Глава 1. Озон: прошлое, настоящее и будущее

Озон — это газ, который имеет особое значение в атмосфере Земли. Он защищает жизнь на Земле, поглощая опасные ультрафиолетовые лучи от солнца. Однако, история озона в атмосфере не всегда была такой позитивной.

В прошлом, увеличение аэрозольных продуктов и промышленных выбросов привели к разрушению озона в атмосфере. Из-за этого происходил озоновый дыр на южном полюсе, угрожая здоровью людей и дикой природы. Эта проблема была замечена в 1970-х годах и привела к созданию Монреальского Протокола в 1987 году - международного соглашения, которое запрещало применение вредных химических веществ, разрушающих озон, в промышленности.

Сейчас, благодаря этому протоколу, состояние озона в атмосфере стабилизировалось и начал регенерироваться. Однако, новые опасности неожиданно возникают в будущем.

Соответствующие исследования показали, что изменение весенней температуры из-за глобального потепления может вызвать новую волну разрушения озона. Глобальное потепление порождает новые химические реакции, которые могут стать причиной разрушения озона. Хотя Монреальский Протокол остановил использование химических веществ, которые могут разрушать озон, возможны другие причины, такие как глобальное потепление.

В целом, история озона в атмосфере продолжается и ее развитие определяется действиями человека на Земле. Однако, с определенными шагами и мерами, мы можем продолжить защищать озон в атмосфере и сохранять его значение для нашей жизни и природы на Земле.

Наземные и космические наблюдения указывают на увеличение глобального озона на 0,3% за десятилетие. Эта тенденция согласуется с моделированием и научным пониманием процессов, контролирующих

озоновый слой. За тот же период тенденции в широких широтных диапазонах были следующими:

- Средняя широта Южного полушария (35°ю.ш.–60°ю.ш.), всего уровень озона в колонне увеличился (на 0,8 ± 0,7% за десятилетие).

- Средние широты Северного полушария (35 °северной широты-60°северной широты), тенденции общего содержания озона в столбе незначительны (0,0 ± 0,7%за десятилетие).

- Тропический (20 °S-20 °N) общий уровень озона в столбе не показывает четких тенденций (за десятилетие 0,2 ± 0,3%), вероятно, потому что озон в нижних слоях стратосферы уменьшается, в то время как тропосферный озон увеличивается, и то и другое не связано с изменениями ОРВ.

Широтная структура этих тенденций общего содержания озона в столбе воздуха в значительной степени согласуется с нашим научным пониманием и воспроизводится в последнем наборе химико-климатических моделей.

На сегодняшний день (2017-2020) общий уровень озона в столбе в качестве данных космических и наземных наблюдений остаются ниже, чем в среднем за 1964-1980 годы. В пределах неопределенностей, связанных с естественной изменчивостью и инструментальной точностью, эти значения по существу такие же, как приведенные в предыдущей Оценке для среднего значения за 2014-2017 годы.

Измерения вертикальной составляющей озона показывают однозначное увеличение верхнего стратосферный озон на 2000-2020 годы за пределами полярных регионов. Увеличение содержания озона в верхних слоях стратосферы происходит из-за связи с уменьшением содержания озоноразрушающих веществ и снижением температуры в стратосфере, вызванным увеличение содержания CO2.

Также наблюдается небольшое снижение в тропическом нижнем

стратосферном озоне за 2000-2020 годы. Это уменьшение согласуется с ускорением крупномасштабной циркуляции, вызванным изменением климата, и оказывает небольшое воздействие на общее содержание озона в столбе. Химические потери озона от хлора и брома сравнительно незначительны в тропической нижней стратосфере.

Наблюдения свидетельствуют о небольшом снижении в нижних слоях стратосферного озона в средних широтах обоих полушарий на 2000-2020 годы, в то время как химико-климатическая модель моделирования предполагает небольшое увеличение. Озон в средних широтах имеет большую изменчивость из года в год; таким образом, тенденции имеют большие неопределенности, и они не являются надежными во всех наборах данных и моделях. Наблюдаемое снижение более очевидно в Северном полушарии.

По прогнозам оценочной комиссии общий уровень озона в столбе возвращается к значениям 1980 года быстрее для сценариев, предполагающих более высокие выбросы парниковых газов, чем для сценариев с меньшими выбросами парниковых газов. В целом, сроки возврата для сценария промежуточного этапа (SSP2-4.5) согласуются с предыдущими оценками:

- около 2040 года при почти глобальном среднем значении (60 ° южной широты–60 ° северной широты) ежегодно усредненный столбик озона;

- около 2045 года для Южного полушария (60 ° ю.ш.–35 °ю.ш.) и изначально усредненный уровень озона в колонке;

- около 2035 года для Северного полушария (35 ° северной широты–60 ° северной широты) среднегодовой уровень озона в столбе.

Для сценариев, предполагающих значительное сокращение выбросов результирующее сокращение тропосферного озона может иметь важное

значение для общих тенденций изменения концентрации озона в столбе. Согласно таким сценариям, общий уровень озонового столба в тропиках, по прогнозам, останется ниже значений 1980 года по крайней мере до 2100 года. Как обсуждалось в последней оценке, общее содержание озона в столбах тропиков при сценариях с высоким содержанием парниковых газов (ПГ) будет ниже значений 1980 года в 2100 году из-за изменений, вызванных циркуляцией, влияющих на озон в нижних слоях стратосферы.

Ожидается, что озоновая дыра в Антарктике постепенно закроется, весной общее содержание озона в столбе возвращается к значениям 1980 вскоре после середины столетия (около 2065 года). А весной в Арктике общий уровень озона вернется к значения 1980 года немного раньше середины века (около 2045 года). Значительная потеря озона в Арктике будет происходить холодными зимами/весной, пока концентрации ОРВ значительно превышают естественные уровни. В то время как динамические изменения, связанные с увеличением выбросов парниковых газов, приводят к более раннему восстановлению арктического озона, увеличению содержания водяного пара в стратосфере и CO2 -вынужденное охлаждение нижней стратосферы может увеличить потенциал для образования полярных стратосферных облаков в условиях динамично не нарушаемых арктических зим, что приводит к потере озона.

Исключительные события могут временно нарушить химико-физические и динамические процессы, влияющие на количество озона в стратосфере. К ним относятся лесные пожары 2019/2020 годов в Австралии, извержение вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай и нарушения квазидвухлетних колебаний тропических ветров. В частности, участились интенсивные лесные пожары. Их потенциальное воздействие на стратосферу еще недостаточно точно определено количественно и является предметом активных исследований.

1.1 Антропогенные возмущения газов в атмосфере

Возможное изменение химического состава атмосферы и сопутствующие климатические эффекты — это проблема, которая привлекает внимание международного научного сообщества, лиц, принимающих решения, и общественности. Некоторые из процессов, которые могут привести к таким модификациям, будут кратко описаны в этом разделе.

Сначала мы рассмотрим последствия сельскохозяйственной революции и зададимся вопросом, может ли изменение экосистем Земли повлиять на атмосферу. Например, в тропических регионах (Бразилия, Центральная Африка, Юго-Восточная Азия) большие участки лесов и саванн сжигаются по сельскохозяйственным причинам. Было подсчитано, что ежегодно уничтожается 160000 км2 лесистых земель (например, Kandel, 1980). Горение производят многочисленные химические соединения, такие как CO2, CO, CH4 (и многие другие органические соединения), H2, N2, N2O, NO, NO2, COS, CH3Cl, CH3Br, CH3I, HCN, CH3CN, а также аэрозольные частицы (например, черный углерод; см. Crutzen et al., 1979; Andreae и Merlet, 2001). Некоторые из этих соединения в конечном итоге достигают средней атмосферы, где они могут влиять на баланс нескольких второстепенных видов, в частности озона.

Кроме того, внедрение современных сельскохозяйственных технологий, особенно интенсивное использование азотных удобрений, изменило естественный азотный цикл за счет увеличения фиксации этого элемента в форме аммиака, аминокислот и нитратов. Во время нитрификации и денитрификации часть азота выбрасывается в атмосферу в форме N2O, а не N2. N2O является основным источником NO в середине атмосфере и ускоряет разрушение озона в стратосфере.

Скорость фиксации азота на поверхности Земли известна не с большой точностью. Необходимо учитывать вклад естественной биологической

фиксации, а также воздействие молнии и горения.

Однако, по оценкам (Vitousek, 1994), ежегодное количество азота, фиксируемого естественным путем в биосфере, составляет от 50 до 200 Тг н.э./год, в то время как фиксация путем сжигания составляет от 20 до 40 тг/год. Вклад азотных удобрений, вероятно, превышает 80 тг в год, а фиксация бобовыми культурами составляет порядка 30-50 тг в год.

Дополнительные 2-20 Тг/год фиксируются молнией во время грозы и 20 Тг/год в двигателях внутреннего сгорания. Поскольку вызванная человеком фиксация азота со временем усилилась, влияние этого искусственного источника на озоновый слой (на что указывают Кратцен, 1974, и Макэлрой и др., 1976) может стать значительным в будущем.

Возможное воздействие оксидов азота на среднюю атмосферу очень активно изучалось со времен Кратцена (1970) и Джонстона (1971). Указано, что попадание больших количеств этих веществ в выхлопные газы самолетов может привести к изменению защитного озонового слоя. Позже расчеты показали, что эффект, создаваемый таким летательным аппаратом, напрямую зависит от высоты полета: впрыск оксида азота может способствовать образованию озона на высотах ниже примерно 15 км (Brasseur et al., 1998; IPCC, 1999), но к разрушению озона, если летательный аппарат летит на больших высотах. Подсчитано, что в настоящее время коммерческие самолеты выпускают примерно 0,5 Тг в год (треть из которых выпускается в стратосфера) и что парк из 500 высокоскоростных гражданских транспортных самолетов, спроектированных в начале 1970-х годов, потреблял бы 0,1 Тг в год (в основном в виде HET) на высоте около 15-22 км. Другим источником оксидов азота, которые возмущали атмосферу в 1950-х и 1960-х годах, являются взрывы мощных атомных бомб. Примерно от 0,15 до 0,55 Тг N было выброшено в стратосферу во время советских испытаний осенью 1962 года. Этот составляет значительную долю от 1 Тг N, получаемого естественным путем из

Значительное внимание также привлекли последствия промышленной деятельности, особенно выбросы газообразных сточных вод и их возможное воздействие на климат. Наиболее известной проблемой, безусловно, является проблема CO2, но круговорот этого газа между атмосферой, биосферой, гидросферой (облака и океаны) и литосферой (твердая Земля) остается недостаточно хорошо поддающимся количественному определению. Выброс CO2 в результате сжигания ископаемого топлива (угля, нефти), по-видимому, является причиной увеличения концентрации CO2, которое наблюдалось в атмосфера. В период с 1960 по 1990 год общее количество CO2 в атмосфере увеличилось с 2,53 до 2,81 × 1012 тонн. Такое увеличение влияет на тепловой баланс атмосферы, как за счет охлаждения верхних слоев из-за увеличения выброса инфракрасного излучения в космос, так и за счет нагрева в нижних слоях из-за поглощения инфракрасного излучения с поверхности Земли и нижних слоев атмосферы (так называемый парниковый эффект). Глобальные модели показывают, что усредненная по всему миру температура поверхности Земли должна увеличиться на 1,4 до 5,8°C за период 1990-2100 годов, в зависимости от принятого сценария будущих выбросов (МГЭИК, 2001). Такие изменения оказали бы значительное влияние на полярные ледяные шапки и глобальные процессы выпадения осадков. Точную величину эффекта увеличения выбросов парниковых газов трудно установить из-за сложных обратных связей, существующих между атмосферой, океанами и биосферой.

Наблюдения показывают, что в двадцатом веке произошло систематическое повышение средней температуры поверхности Земли. Поскольку вековое изменение температуры также зависит от аэрозолей, выделяющихся в результате процессов горения, и, возможно, из-за солнечной изменчивости, эта тенденция не может быть однозначно отнесена полностью к CO2 и другим парниковым газам.

Изменения температуры атмосферы изменяют скорость многих

фотохимических процессов и, следовательно, концентрации второстепенных веществ. Например, согласно современным моделям, увеличение концентрации CO2 на расстоянии от 30 до 50 км должно привести к небольшому увеличению содержания озона. Тепловые возмущения также могут влиять на динамику атмосферы.

Выброс соединений хлора и брома также является вопросом представляет интерес, поскольку стратосферный озон легко разрушается этими видами галогенов (Столарски и Чичероне, 1974; Молина и Роуленд, 1974; Уофси и др., 1975). Атомы хлора и брома присутствуют во множестве промышленных продуктов, рассеянных в атмосфере, но многие из них быстро разрушаются на малых высотах и поэтому не достигают средней атмосферы, где находится основная часть атмосферного озонового слоя. Однако некоторые промышленные соединения имеют достаточно длительный жизни, чтобы представлять потенциальное возмущение. Это относится, например, к галогенированным углеводородам, таким как хлорфторуглероды (ХФУ), и конкретно для трихлорфторметана (CFCl3 или CFC 11), дихлордифторметана (CF2Cl2 или CFC-12), четыреххлористого углерода (CCl4) и метилхлороформ (также называемый трихлорэтаном или CH3CCl3).

ХФУ являются очень стабильными соединениями и, следовательно, использовались в качестве хладагентов, растворителей, пенообразователей и, до конца 1970-х годов, в качестве топлива для аэрозольных распылителей. Метилхлорид (CH3Cl) является основным природным хлороуглерод имеет отношение к стратосфере; он образуется в морской воде и выделяется при сжигании биомассы. Когда эти долгоживущие органические молекулы проникают в стратосферу, они подвергаются фоторазложению и выделяют вещества, разрушающие озон. Подсчитано, что в начале 1990-х годов, когда выбросы ХФУ промышленного производства составляли приблизительно 1 Тг/год, около 85% стратосферного хлора имело антропогенное

происхождение. Сегодня имеются убедительные доказательства того, что разрушение озонового слоя, наблюдавшееся в 1980-х и 1990-х годах, и, в частности, образование большого “озонового дыра” в Антарктиде каждую весну примерно с начала 1980-х годов была вызвана быстрым увеличением содержания хлора в стратосфере.

Считается также, что ХФУ ответственны за разрушение озонового слоя, зафиксированное в Арктике в течение многих зим с начала 1990-х годов. Международные соглашения (Монреальский протокол 1987 года и последующие поправки), а также национальные нормативные акты сильно ограничили производство и использование ХФУ. Эти химические соединения были постепенно заменены частично галогенированными углеводородами, и в частности, гидрохлорфторуглеродами (ГХФУ) и гидрофторуглеродами (ГФУ). Эти альтернативные продукты относительно легко разрушаются в тропосфере, и, следовательно, их срок службы существенно короче, чем у ХФУ (обычно 1-10 лет в отличие от 10-100 лет). Потенциал разрушения озонового слоя ГХФУ примерно на порядок меньше, чем у полностью галогенированных галоуглеродов. ГФУ не представляют угрозы для озона, поскольку они не содержат атомов хлора или брома.

Бром, потенциал которого по разрушению озона (на атом) составляет почти в 50 раз больше, чем у хлора, выделяется в стратосферу при фоторазложении бромистого метила и других бромированных органических соединений, включая так называемые галоны (например, CF2ClBr или Галон-1211, и CF3Br или галон-1301). CH3Br образуется в результате биологической активности в океане, сжигания биомассы, автомобильных выхлопов и использования в сельском хозяйстве (т.е. в качестве предпосевного и послеуборочного фумиганта).

Антропогенный источник CH3Br составляет около 40% от общего объема выбросов. Галоны, срок службы которых составляет несколько десятилетий, используются при пожаре огнетушители. Их производство в

настоящее время запрещено из-за их вредного воздействия на стратосферный озон.

Численные модели использовались для прогнозирования потенциального разрушения озонового слоя в ответ на выброс галогенуглеродов на основе различных вероятных сценариев. Все эти модели показывают, что время, необходимое средней атмосфере для реагирования на приземные выбросы этих галогенуглеродов, очень велико (несколько десятилетий). В частности, даже с учетом мер, принятых для сокращения или поэтапного отказа от выбросов ХФУ и других галогенуглеродов, ожидается, что антарктическая озоновая дыра будет наблюдаться каждую весну (сентябрь-октябрь) по крайней мере до 2040 года.

Следует также отметить, что галогенуглероды активны в инфракрасном диапазоне и способствуют парниковому эффекту. Анализ возмущений средней атмосферы должен также включать природные процессы, такие как последствия извержений вулканов, которые производят большое количество мелких частиц, а также водяного пара и SO2, которые в конечном итоге приводят к образованию H2SO4 и сульфатных аэрозолей.

Количество закачиваемого газа, его состав и максимальная высота закачки варьируются в зависимости от интенсивности извержения. Такие события могут изменить бюджеты некоторых атмосферных составляющих и явно отражается на среднем содержании атмосферного аэрозоля. Частицы также обеспечивают места для протекания поверхностных реакций. Такие гетерогенные реакции могут активировать хлор и усиливать разрушение озона промышленно производимыми галогенуглеродами.

Мы также отметили важную роль солнца в установлении тепловых и фотохимических условий в окружающей среде Земли. Колебания солнечной мощности вызваны ее 27-дневным периодом вращения, 11-летним солнечным циклом и солнечными вспышками. Каждый из этих процессов может частично объяснять естественную изменчивость атмосферы.

Воздействие человеческой деятельности на состав атмосферы было четко обнаружено в местном, региональном и глобальном масштабах. Развитие сельского хозяйства и промышленная деятельность, вероятно, окажут влияние на наземные экосистемы, а также на климатическую систему. Поэтому важно понимать поведение атмосферы, которая так уязвима к внешним возмущениям и так важна для климатической и фотохимической среды на Земле.

1.2 Современное состояние озона в атмосфере

1.2.1. Озон и озонразрушающие вещества

Венская конвенция 1985 года об охране озонового слоя является международным соглашением, в котором государства-члены Организации Объединенных Наций признали фундаментальную важность предотвращения повреждения стратосферного озонового слоя. Монреальский протокол 1987 года по веществам, разрушающим озоновый слой, и последующие поправки, корректировки и решения к нему были впоследствии согласованы для контроля за потреблением и производством антропогенных озоноразрушающих веществ (ОРВ) и некоторых гидрофторуглеродов (ГФУ). Стороны Монреальского протокола основывают свои решения на научной, экологической, технической и экономической информации, которая предоставляется их группами по оценке.

Разрушение озонового слоя вызвано антропогенными выбросами ОРВ и последующим выбросом в стратосферу химически активных галогенных газов, особенно хлора и брома. ОРВ включают хлорфторуглероды (ХФУ), бромсодержащие галоны и бромистый метил, гидрохлорфторуглероды (ГХФУ), четыреххлористый углерод (CCl_4), и метилхлороформ.

ОРВ долговечны (например, срок службы ХФУ-12 превышает 100

лет), а также являются мощными парниковыми газами (ПГ). В результате мер контроля, предусмотренных Монреальским протоколом, стратосферные концентрации антропогенных хлора и брома снижаются.

В дополнение к ОРВ с более длительным сроком службы существует широкий класс хлор- и бромсодержащих веществ, известных как очень короткоживущие вещества (VSLSS), которые не регулируются Монреальским протоколом и имеют срок службы менее примерно 6 месяцев. Например, бромоформ ($CHBr_3$) имеет срок службы 24 дня, в то время как хлороформ ($CHCl_3$) имеет срок службы 149 дней. Эти вещества обычно разрушаются в нижних слоях атмосферы в результате химических реакций. В целом, лишь небольшая часть выбросов VSLS достигает стратосферы, где они повышают уровни хлора и брома и приводят к усилению разрушения озонового слоя.

Предусмотренный Монреальским протоколом контроль ОРВ стимулировал разработка веществ-заменителей, сначала ГХФУ, а затем ГФУ, в ряде промышленных секторов. Хотя ГФУ оказывают лишь незначительное воздействие на стратосферный озон, некоторые ГФУ являются мощными выбросами парниковых газов. Предыдущие оценки показали, что за последнее десятилетие в атмосфере быстро увеличивалось содержание ГФУ, и, по прогнозам, оно будет увеличиваться и дальше по мере продолжения глобального развития в ближайшие десятилетия. Принятие Кигалийской поправки 2016 года к Монреальскому протоколу позволит постепенно сократить производство и потребление некоторых ГФУ и избежать значительной части прогнозируемого глобального увеличения и связанного с ним изменения климата.

Наблюдения за атмосферным озоном производятся с помощью приборов на земле и на борту воздушных шаров, самолетов и спутников. Эта сеть наблюдений задокументировала снижение озонового слоя по всему земному шару, при этом экстремальные истощения происходят над

Антарктидой каждую весну и иногда значительные в Арктике, и они позволили оценочной комиссии сообщить о некоторых признаках восстановления стратосферного озона в Оценках 2014 и 2018 годов. Химические и динамические процессы, управляющие стратосферным озоном, хорошо изучены, при этом разрушение озонового слоя в основном обусловлено содержанием в атмосфере хлора и брома.

Резкое сокращение выбросов ОРВ, начавшееся в конце 1980-х годов, привело к снижению содержания хлора и брома, начавшемуся примерно на рубеже веков. В результате появляются первые признаки восстановления озонового слоя. В дополнение к ОРВ, модельные расчеты демонстрируют, что на концентрации стратосферного озона также влияют химические и климатические эффекты парниковых газов. В частности, увеличение концентрации парниковых газов двуокиси углерода (CO2) и метан (CH4) в течение этого столетия приведет к тому, что глобальные уровни озона превысят естественный уровень озона, наблюдавшийся в 1960-х годах, главным образом из-за охлаждения верхних слоев стратосферы и изменения стратосферной циркуляции. С другой стороны, химический эффект увеличения концентрации закиси азота (N2O), еще один ПГ, заключается в истощении стратосферный озон.

Меры, принятые в рамках Монреальского протокола, продолжали снижать содержание в атмосфере регулируемых озоноразрушающих веществ (ODSs) и способствовать восстановлению стратосферного озонового слоя. Содержание в атмосфере как общего тропосферного хлора, так и общего тропосферного брома из долгоживущих ОРВ продолжало снижаться с момента Оценки 2018 года. Новые исследования подтверждают предыдущие оценки в том смысле, что снижение выбросов ОРВ благодаря соблюдению Монреальского протокола позволяет избежать глобального потепления на примерно 0,5–1°C к середине столетия по сравнению с экстремальным сценарием с неконтролируемым увеличением ОРВ на 3-3,5% в год.

Действия, принимаемые в рамках Монреальского протокола, продолжают способствовать восстановлению озонового слоя. Восстановление озона в верхних слоях стратосферы прогрессирует. Общее содержание озонового слоя (ТСО) в Антарктике продолжает восстанавливаться, несмотря на значительную межгодовую изменчивость размера, силы и продолжительности существования озоновой дыры. За пределами Антарктического региона (от 90 °северной широты до 60° южной широты) ограниченные данные об извлечении ТСО с 1996 года имеют низкую достоверность.

Ожидается, что ТСО вернется к значениям 1980 года около 2066 года в Антарктике, около 2045 года в Арктике и около 2040 года для среднемирового значения (60° северной широты–60° южной широты). Оценка истощения ТСО в регионах по всему земному шару за 1980-1996 годы практически не изменилась с момента оценки 2018 года.

Соблюдение Кигалийской поправки 2016 года к Монреальскому протоколу, которая требует поэтапного сокращения производства и потребления некоторых гидрофторуглеродов (ГФУ), по оценкам, позволит избежать потепления на 0,3–0,5 ° C к 2100 году. Эта оценка не включает вклад выбросов ГФУ-23.

Недавнее выявление неожиданных выбросов ХФУ-11 привело к научным исследованиям и принятию политических мер. Наблюдения и анализ выявил регион-источник по меньшей мере половины этих выбросов, за чем последовало существенное сокращение выбросов. Региональные данные предполагают, что некоторые выбросы ХФУ-12, возможно, были связаны с несообщаемым производством ХФУ-11. Неопределенности в выбросах из банков и пробелы в сети наблюдений слишком велики, чтобы определить, прекратились ли все неожиданные выбросы.

Были выявлены необъяснимые выбросы для других ОРВ (ХФУ-13, 112a, 113a, 114a, 115 и CCl4), а также ГФУ-23. Некоторые из этих

необъяснимых выбросов, вероятно, происходят в результате утечки исходного сырья или побочных продуктов, а остальная часть остается непонятной.

За пределами полярных регионов наблюдения и модели согласуются с тем, что озон в верхних слоях стратосферы продолжает восстанавливаться. Однако, озон в нижних слоях стратосферы не проявляет признаков восстановления. Модели имитируют небольшое восстановление озона в средних широтах в нижних слоях стратосферы в обоих полушариях, которое не подтверждается в наблюдениях. Устранение этого несоответствия является ключом к обеспечению полного понимания процесса восстановления озона.

Существующая сеть станций мониторинга атмосферы обеспечивает измерения глобальных приземных концентраций долгоживущих ОРВ и ГФУ, образующиеся в результате антропогенных выбросов. Однако пробелы в региональном мониторинге атмосферы ограничивают способность научного сообщества выявлять и количественно оценивать выбросы контролируемых веществ из многих регионов-источников.

Несколько космических приборов, обеспечивающих глобальные измерения связанных с озоном компонентов атмосферы с вертикальным разрешением (например, химически активный хлор, водяной пар и индикаторы переноса с длительным сроком службы) должны быть выведены из эксплуатации в течение нескольких лет. Без замены этих приборов способность отслеживать и объяснять изменения в стратосферном озоновом слое в будущем будет затруднена.

Воздействие на озоновый слой распыления стратосферного аэрозоля (SAI), которое было предложено в качестве возможного варианта для компенсации глобального потепление, было оценено в соответствии с техническим заданием для Отчета об оценке SAP за 2022 год. Были выявлены важные потенциальные последствия, такие как углубление

озоновой дыры в Антарктике и задержка восстановления озона. Многие пробелы в знаниях и неопределенности препятствуют более надежной оценке на данном этапе.

Повышенная озабоченность по поводу влияния на воздействие озона столетия включает:

- дальнейшее увеличение содержания концентрации закиси азота (N_2O), метана (CH_4), и CO_2 ;
- быстро расширяющееся использование ОРВ и ГФУ в качестве сырья и выбросы;
- изменение климата, влияющее на общую стоимость владения в тропиках;
-чрезвычайные лесные пожары и извержения вулканов; возросшая частота запусков гражданских ракет и выбросы предлагаемого нового парка сверхзвуковых коммерческих самолетов.

Содержания ОРВ в тропосфере описано согласно последней оценке комиссии по контролю Монреальского договора за период с 2016 по 2020 год:

С 2016 по 2020 год содержание в атмосфере обоих тропосферных газов хлора (Cl) и брома (Br) из долгоживущих озоноразрушающих веществ (ОРВ), контролируемых в соответствии с Монреальским протоколом, продолжало снижаться. Наблюдаемый темп снижения содержания хлора в тропосфере из-за веществ, регулируемых в соответствии с Монреальским протоколом, составил 15,4 ± 4,1 п.л.кл/год$^{-1}$, который близок к базовому уровню прогноз, основанный на Оценке комиссии за 2018 год.

Тропосферный хлор из очень короткоживущих газов, источники которых в основном антропогенные и которые не регулируются Монреальским протоколом, увеличились на 2,1 ± 0,6 п.л.кл/год$^{-1}$. Наблюдаемая скорость снижения содержания тропосферного брома из-за контролируемых веществ составил 0,18 ± 0,05 ppt/год$^{-1}$, , которая близка к базовой проекции из Оценка за 2018 год. Большая часть этого снижения была

вызвана от уменьшения содержания галонов.

Общее количество хлора, поступающего в тропоферу из контролируемых и неконтролируемых источников снизились на 420 ± 20 п.п. (11,5%) между пиком 1993 года (3660 п.п.) и 2020 годом (3240 п.п.). Это долгосрочное снижение был в значительной степени обусловлен уменьшением содержания CH3CCl3 и ХФУ. HCl является основным компонентом хлора в верхних слоях атмосферы. Его численность в этом регионе снизилась в среднем на 0,5 ± 0,2 % в год$^{-1}$ в течение 1997-2020 гг. Долгосрочное снижение согласуется со снижением общего содержания хлора, поступающего в стратосферу.

Общее количество брома, поступающего в тропосферу из контролируемых и неконтролируемых источников снизились на 3,2 ± 1,2 п.п. (14,5%) между пиком 1999 года (22,1 п.п.) и 2020 годом (18,9 п.п.). Это долгосрочное снижение было в значительной степени обусловлено уменьшение содержания CH3Br и галон-1211.

Общий бром в стратосфере, полученный из брома наблюдений по монооксиду азота (BrO), снизился на 0,18± 0,04 п.п. в год$^{-1}$ (0,8% в годовом исчислении$^{-1}$) с 2003 года. Это снижение согласуется со снижением общего количества брома, поступающего в стратосферу.

Глобальные выбросы ХФУ-11 сократились после 2018 года, снизив до 45 ± 10 Гг как в 2019, так и в 2020 годах. Это снижение предполагает ликвидацию большинства неожиданных выбросов, произошедших в годы после 2012 г. Значительная доля непредвиденных выбросов возникла
из восточного Китая. Этот вывод основан на доступных региональных наблюдениях с нескольких участков. Снижение выбросов ХФУ-11 из восточного Китая с 2018 года объясняет 60 ± 30% наблюдаемого глобального снижения выбросов.

Глобальное содержание ХФУ-12 продолжало снижаться в течение 2016-2020 годов. Оценки глобальных выбросов ХФУ-12 составляли 33 ± 21

гг в год$^{-1}$ в 2016 году и 25 ± 20 гг в год$^{-1}$ в 2020 году.

Выбросы ХФУ-12 из восточного Китая сократились с 3,3 ± 1,4 гг в год $^{-1}$ в 2016 году до 0,5 ± 0,5 гг год $^{-1}$

в 2019 году. Это снижение, вероятно, связано со снижением производства ХФУ-11

Глобальные концентрации ХФУ-13, ХФУ-112a, ХФУ-113a, ХФУ-114a, а содержание ХФУ-115 увеличилось с 16,0 ± 0,3 п.л. в 2016 году до 17,2 ± 0,3 п.л. ppt Cl в 2020 году. Эти изменения свидетельствуют о стабильных или увеличивающихся выбросах. Атмосферные наблюдения подтверждают, что Восточная Азия является важным регионом-источником. Обилие CCl4 в атмосфере продолжало снижаться более медленными темпами, чем ожидалось, что может быть связано с заниженными выбросами при производстве и использовании сырья. Глобальный CCl4 оценки выбросов, основанные на атмосферных наблюдениях, теперь более точны, чем в предыдущей оценке, благодаря улучшенной оценке продолжительности жизни, и составили в среднем 44 ± 15 Гг /год$^{-1}$ как в 2016, так и в 2020 годах.

Выбросы CCl_4 в восточном Китае за период 2013-2019 годов наблюдаются колебания от года к году, вероятно, связанные с производством ХФУ-11. Выбросы увеличились после 2013 года, достижение 11,3 ± 1,9 Гг в год$^{-1}$ в 2016 году и снизился до 6,3 ±1.1 Гг год$^{-1}$ в 2019 году.

Тропосферный хлор из ГХФУ продолжает проникать в стратосферу, достигнув 320 ± 3 п.п. в 2020 году. Среднегодовой темп роста содержания хлора из ГХФУ снизился с 5,9 ± 1,3 п.п. в год$^{-1}$ согласно оценке за 2018 год, показатель составил 2,5 ± 1,0 п.п. в годовом исчислении$^{-1}$ в течение 2016-2020 годов.

Оценки глобальных выбросов ГХФУ-22 свидетельствуют о снижении в 2020 году после периода относительно постоянных выбросов. Выбросы ГХФУ-142b продолжали сокращаться, и содержание ГХФУ-142b начало снижаться. Напротив, ГХФУ-141b, а также несколько ГХФУ с низким

содержанием (ГХФУ-31, ГХФУ-124, ГХФУ-133a и недавно обнаруженный ГХФУ-132b) демонстрируют стабильные или увеличивающиеся выбросы.

Содержание брома из галонов снизилось с пикового уровня в 8,5± 0,1 п.п. в 2006 году до 7,3 ± 0,1 в 2020 году. Содержание галонов-1211, галонов2402 и галонов-1202 продолжало снижаться в период с 2016 по 2020 год. Скорость изменения галона-1301 оставалась неотличимой от нуля. В 2020 году это был самый распространенный галон в атмосфере.

Дихлорметан (CH2Cl2), основной компонент хлора VSLS, продолжал увеличиваться в период с 2016 по 2020 год с несколько более низкими темпами роста, чем до 2016 года. Это увеличение в первую очередь является результатом увеличения CH2Cl2 выбросов в Азии.

Тропосферный хлор, основанный на измерениях VSLS количество исходных газов, увеличилось примерно на 10 п.п. в период с 2016 по 2020 год. Предполагаемое поступление хлора из VSLSS в стратосферу также увеличилось примерно на 10 п.п. и составит 130 ± 30 п.п. в 2020 году, что составляет около 4% от общего поступления хлора. Хлорированные VSLS вносят 4% в общий слой потребления сферического хлора в 2020 году. Потребление хлора VSLS оценивается в 130 ± 30 ppt в 2020 году по сравнению с 120 ± 40 ppt в 2016 году.

Бромированные VSLS, содержащие в основном природные источники, концентрация стратосферного брома составляет 5 ± 2 п.п. и не показывает долгосрочных изменений.

Три основных парниковых газа — CH4, N2O, и CO_2 — вызывают изменения в химическом составе и динамике стратосферы, которые могут повлиять на содержание озона. Увеличение N2O разрушает озоновый слой и увеличивает Количество этих газов увеличилось в промышленную эпоху и продолжает увеличиваться, и, таким образом, помимо ОРВ являются дополнительными факторами, контролирующими уровень содержания в стратосфере O3. Выбросы антропогенного N2O в 2020 году, выраженные в

эквиваленте ХФУ-11, были более чем в два раза больше, чем взвешенные по ОРС выбросы всех ХФУ в этом году и более 20% выбросов ХФУ в 1987 году, когда последние находились на своем пике.

Хотя эти виды не разрушают озоновый слой, они представляют собой очень сильные парниковые газы с длительным временем пребывания в атмосфере. Общее прямое радиационное воздействие из-за антропогенных выбросов этих видов увеличилось с 0,013 Вт/м^2 в 2016 году до 0,014 Вт/м^2 в 2020 году.

1.2.2. Озон и гидрофторуглероды

Гидрофторуглероды (ГФУ) не содержат озоноразрушающих хлор или бром. Подобно долгоживущим ХФУ и ГХФУ, некоторые ГФУ обладают высоким потенциалом глобального потепления. Поправка Кигали к Монреальскому протоколу, которая была принята в 2016 году и вступила в силу в 2019 году, устанавливает графики поэтапного сокращения производства и потребления конкретных ГФУ.

Радиационное воздействие, обусловленное ГФУ, в настоящее время невелико, и поправка Кигали была разработана, чтобы избежать неконтролируемого роста радиационного воздействия в ближайшие десятилетия. ГФУ были включены в качестве одной группы в корзину газов Киотского протокола 1997 года, и в результате некоторые страны представляют годовые оценки выбросов ГФУ в Рамочную конвенцию Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИКООН). Поправка Кигали положила начало дополнительной отчетности о производстве и потреблении ГФУ и выбросах ГФУ-23. ГФУ-23 рассматривается отдельно в первую очередь потому, что он выбрасывается в атмосферу в основном как побочный продукт производства ГХФУ-22.

Количество ГФУ увеличивается. Невозможно отнести значительную долю глобальных выбросов ГФУ в отдельные страны из-за ограничений в

глобальных сетях мониторинга и отсутствия отчетности. Глобальные выбросы ГФУ-23, образующиеся в результате атмосферных наблюдений, увеличились со времени предыдущей оценки, что не согласуется с новой информацией, свидетельствующей о существенном росте борьбы с выбросами независимо от мер контроля за внесением поправок в Кигали.

Предполагаемые глобальные выбросы ГФУ-23 составляли 17,2 ± 0,8 тыс. тонн в год в 2019 году. Это значение является значительно выше, чем выбросы в 2,2 тыс. тонн в год–1. • Данные наблюдений свидетельствуют о том, что изменения, возникающие при использовании определенных ГФУ и их

заменителей, ГФОС (гидрофторолефинов), существуют из-за национальных нормативных актов, изменений на рынке и действий, связанных с внедрением поправки Кигали.

Образование в атмосфере трифторуксусной кислоты (ТФА), как ожидается, увеличится в ближайшие десятилетия из-заболее широкого использования ГФУ и HCFOs. ТФА,продукт распада некоторых ГФУ, ГХФУ, ГФОС и HCFOs, является стойким химическим веществом с потенциальным вредным воздействием на животных, растения и людей. Концентрация ТФА в дождевой воде и океане в целом в настоящее время значительно ниже известных пределов токсичности. Потенциальное воздействие ТФА на окружающую среду требует будущей оценки из-за его стойкости.

Со времени предыдущей оценки обновленные прогнозы были сделаны из выбросов ГФУ при условии соблюдения Поправки Кигали (исключая ГФУ-23). Прогнозируемые выбросы и связанное с ними радиационное воздействие и изменение температуры меньше, чем предполагалось ранее.

Согласованные усилия по повышению энергоэффективности холодильное оборудование и системы кондиционирования воздуха могут привести к сокращению выбросов парниковых газов того же порядка, что и в результате глобального применения поправки Кигали. Эти предполагаемые

выгоды от повышения энергоэффективности в значительной степени зависят от уровня выбросов парниковых газов при производстве электроэнергии и темпов декарбонизации в энергетическом секторе.

Ожидается, что выбросы ГФУ-23 будут расти в ближайшие десятилетия, если не будет усилена борьба с выбросами при производстве ГХФУ-22. Этот рост основан на ожидаемом продолжающемся увеличении производства ГХФУ-22, в первую очередь для использования в качестве исходного сырья, что разрешено Монреальским протоколом.

1.2.3. Озон и аэрозоль

Стратосферный и тропосферный аэрозоли играют важную роль в изменении состояния озона в атмосфере. Они могут повысить распространение ультрафиолетовых лучей и вызвать разрушение молекулы озона. Стратосферный аэрозоль образуется в результате вулканических извержений, антропогенной деятельности и естественных процессов в атмосфере, защищает землю от ультрафиолетовых лучей и вызывает охлаждение воздушного потока. Тропосферный аэрозоль образуется в результате горения топлива и других антропогенных выбросов, которые в значительной мере влияют на здоровье и климат.

Крупные извержения вулканов, которые произошли с 1980 по 2020 год, включая:

- Извержение Эль-Чичона в 1982 году;
- Извержение Пинатубо в 1991 году;

Эти извержения вызвали значительные изменения в состоянии атмосферы и озона, влияли на климат и окружающую среду. Кроме того, большинство аэрозолей в атмосфере образуются вследствие антропогенной деятельности, такой как горение топлива и выбросы в атмосферу промышленных загрязнений. Он может вызвать заболевания дыхательных

путей и другие опасные для здоровья последствия.

Аэрозоли, в основном, вносят небольшой вклад в уменьшение плотности озонового слоя, но они могут усиливать химическое разрушение озона при взаимодействии с другими загрязнителями атмосферы.

Они могут содержать в себе химически активные вещества, такие как хлор, бром и фтор, которые могут взаимодействовать с озоном и вызывать его разрушение. Кроме того, аэрозоли увеличивают загрязнение атмосферы, что может усилить действие других факторов, таких как ультрафиолетовое излучение от солнца.

Например, в 1991 году была обнаружена так называемая "дыра в озоновом слое" над Антарктидой. Эта дыра была вызвана химическими реакциями между загрязняющими веществами в атмосфере, такими как хлорфторуглероды, с зимним полюсом и солнечным светом. Аэрозоли также могут играть роль в этом процессе.

Хотя аэрозольное загрязнение атмосферы и его влияние на озоновый слой все еще нужно исследовать, уже существует множество мер по снижению его воздействия, таких как использование более экологически чистых технологий производства, снижение выбросов загрязняющих веществ и т.д.

1.2.4. Стратосферный озон и изменение климата

Монреальский протокол и Поправки и корректировки к нему оказались эффективными в снижении обилия ОРВ в атмосфере. Наиболее четкие признаки соответствующего восстановления озона наблюдаются в верхней стратосфере и в нижней стратосфере Антарктики весной. Восстановление озона, связанное с ОРВ, трудно обнаружить в других регионах из-за большой естественной изменчивости и сопутствующих факторов, таких как изменение климата и изменения в тропосферном озоне. В Арктике, например, значительная потеря озона происходит только в условиях холодной

стратосферы (например, весной 2011 года и совсем недавно весной 2020 года). Тенденцию озонирования в Арктике трудно обнаружить, учитывая гораздо большую изменчивость, чем в Антарктике. Эпизодические извержения вулканов и, в последнее время, интенсивные лесные пожары могут существенно увеличить содержание стратосферного аэрозоля и, следовательно, потенциально могут возмущать стратосферный озон.

На данном историческом этапе восстановление стратосферного озона Антарктики продолжает прогрессировать. Новые результаты, полученные после Оценки 2018 года, подтверждают сделанные в то время выводы о том, что озоновая дыра в Антарктике в целом уменьшилась в размерах и глубине с 2000 года. Новые анализы предоставляют дополнительные доказательства того, что сентябрь — это период, когда стратосферный озон над Антарктидой проявляет наибольшую чувствительность к уменьшению ОРВ, и темпы восстановления озона в Антарктике являются самыми высокими и наиболее статистически значимыми.

Антарктические озоновые дыры, наблюдавшиеся в период с 2019 по 2021 год, продемонстрировали значительную изменчивость в размерах, силе и долговечности. Такое поведение в значительной степени обусловлено динамикой, согласуется с нашим пониманием и не ставит под сомнение доказательства наступления выздоровления. Озоновая дыра 2019 года стала самой маленькой с 2002 года. Напротив, как в 2020, так и в 2021 годах наблюдались относительно большие и продолжительные озоновые дыры поздней весны.

В Арктике наблюдаемые тенденции содержания озона остаются незначительными по сравнению с большой изменчивостью из года в год. Это исключает выявление статистически значимой тенденции в арктическом озоне за период 2000-2021 годов. Общее содержание озона в Арктике достигло исключительно низких значений весной 2020 года.

Стабильный, холодный и долговечный стратосферный полярный вихрь

привел к катализируемой галогенами химической потере озона, которая превысила предыдущую рекордную потерю, наблюдавшуюся весной 2011 года. Сильный вихрь также препятствовал динамичному пополнению полярного озона. Эволюция высокоширотный озон в 2020 году успешно воспроизведен с помощью моделирования, что еще больше подтверждает наше понимание химического состава полярного озона.

К климатическим факторам, влияющим на озон, относятся температура поверхности океана, поверхность льда и парниковые газы. В это время стратосферный озон оказывает широкомасштабное влияние на систему Земли. Истощение озонового слоя Антарктики вызвало расширение тропиков и смещение реактивных течений и трасс штормов в Южном полушарии в направлении к полюсу, что привело к выраженным изменениям климата поверхности в летнее время, как было обобщено в предыдущих оценках. Продолжающееся восстановление озонового слоя и увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере (ПГ) станут ключевыми факторами будущих изменений климата в Южном полушарии. Относительная важность восстановления озона для будущего климата Южного полушария будет зависеть от величины и скорости изменений концентрации парниковых газов в атмосфере.

Эволюция стратосферных температур продолжает следовать поведению, ожидаемому от хорошо изученных последствий природных и антропогенных воздействий. Долгосрочные тенденции в первую очередь обусловлены изменением CO2 и стратосферного озона. Глобальная температура в более низких слоях стратосферы была почти постоянной с конца 1990-х годов.

В будущем увеличение выбросов парниковых газов и воздействия озона восстановление оказало бы противоположное воздействие на стратосферную температуру и циркуляцию. Для сценария умеренных выбросов ПГ (RCP6.0) охлаждение в стратосфере и ускорение глобальной

стратосферной транспортной циркуляции (циркуляция Брюера-Добсона), обусловленные увеличением выбросов ПГ, преобладают над противоположными эффектами восстановления озона. Как в сценариях с умеренным (RCP4.5 /SSP2-4.5), так и с высоким уровнем выбросов (RCP8.5/SSP5-8.5), отсроченный распад австралийского весеннего полярного вихря, вызванный истощением озонового слоя в конце 20 века будет сохраняться из-за эффекта увеличения ПГ.

Новые данные свидетельствуют о том, что восстановление озонового слоя вызвало изменения в наблюдаемых тенденциях атмосферной циркуляции Южного полушария между периодами разрушения озонового слоя и восстановления. Модельное моделирование подтверждает связь этих изменений с восстановлением озона. Эти результаты свидетельствуют о том, что тенденции циркуляции в Южном полушарии отреагировали на восстановление озона в Антарктике благодаря Монреальскому протоколу.

Что касается изменений озонового слоя в Арктике, новые данные показывают, что в отдельные годы низкий весенний уровень арктического озона может усиливать существующие аномалии стратосферной циркуляции и их влияние на тропосферную циркуляцию и приземный климат.

1.3 Будущее озона и его контроль

Если бы выбросы исходного сырья ОРВ, оцениваемые в настоящее время, были устранены в будущие годы, возврат к среднеширотному эквиваленту эффективного содержание стратосферного хлора (EESC) по сравнению с 1980 годом может быть увеличено почти на 4 года, в основном за счет сокращения CCl4, и в том числе за счет уменьшения общего воздействия ОРВ на климат.

Устранение будущих выбросов бромистого метила (CH3Br) применение для карантина и обработки перед транспортировкой, разрешенное в настоящее время Монреальским протоколом, ускорило бы

возвращение численности EESC в средних широтах к уровню 1980 года на два года (как отмечалось в предыдущих оценках).

Выбросы антропогенных хлорных веществ с очень коротким сроком службы, в которых преобладает дихлорметан (CH2Cl2), продолжают расти и способствуют разрушению озонового слоя. Если CH2Cl2 выбросы сохранятся на их нынешнем уровне, они будут продолжать истощать среднегодовое TCO на 1 DU. Ликвидация этих выбросов быстро обратила бы вспять это истощение.

Сокращение антропогенных выбросов NO2 на 3%, усредненные за 2023-2070 годы, приведут к увеличению среднегодовых значений TCO.
Совокупная стоимость владения составила около 0,5 млн.долл. за тот же период и снизилась примерно на 0,04 Wm^{-2} при радиационном воздействии, усредненном за 2023-2100 годы.

Глобальные выбросы долгоживущего ГФУ-23, которые в значительной степени являются побочным продуктом производства ГХФУ-22, в целых восемь раз превышают ожидания и, вероятно, будут расти, если не увеличится борьба с выбросами при производстве ГХФУ-22 или не сократится использование ГХФУ-22 в качестве исходного сырья.

Текущие совокупные выбросы ХФУ плюс ГХФУ, взвешенные по ПГП, сопоставимы с выбросами ГФУ. Сокращения в будущем выбросов ХФУ и ГХФУ требуют устранения выбросов из банков и продолжения производства и использования при разрешенном производстве исходного сырья, побочных продуктов или неизвестных видов применения, в зависимости от соединения.

Глобальное потепление в настоящее время достигло примерно на 1,2 ° С выше доиндустриального уровня. Сценарии климатической модели, рассмотренные МГЭИК (2021), указывают на продолжение будущего потепления в ближайшие несколько десятилетий даже при масштабных мерах по смягчению последствий и декарбонизации, что приведет к дальнейшим климатическим воздействиям. Впрыскивание стратосферного

аэрозоля (SAI) потенциально способно ограничить повышение глобальных приземных температур за счет увеличения концентрации частиц в стратосфере. Эти частицы отражают часть солнечного света обратно в космос, в процессе, подобном тому, который наблюдается после крупных извержений вулканов. Однако SAI сопряжен со значительными рисками и может привести к непредвиденным последствиям.

Впрыскивание стратосферного аэрозоля SAI потенциально может снизить глобальные средние температуры. Однако SAI не может полностью компенсировать широко распространенные последствия потепления и приводит к непреднамеренным последствиям, включая воздействие на озон. Детали этих эффектов зависят от специфики сценария SAI и стратегии введения SAI. В различных сценариях SAI смоделированные эффекты SAI на будущее озонового слоя зависит от конкретных деталей будущего изменения климата, а также от количества, сроков и продолжительности применения SAI. Было показано, что компенсирование постоянно усиливающегося глобального потепления постоянно увеличивающимся SAI (“сильным SAI”) приводит к увеличению экологических рисков. В мире с ограниченным снижением выбросов парниковых газов
выбросы, глобальные средние температуры продолжают значительно увеличиваться в будущем.

Усиленный стратосферный сульфатный аэрозоль увеличивает скорости гетерогенных химических реакций в стратосфере, приводящие к увеличению или истощению стратосферного озона в зависимости от высоты, широты и сезона. Детали зависят от вызванного SAI распределения аэрозоля по площади поверхности, текущих концентраций стратосферных галогенов и закиси азота, и вызванных SAI изменений в водяном паре в стратосфере. Повышенное содержание сульфатных аэрозолей в сценариях SAI нагревает нижнюю тропическая стратосфера на 4,6 ± 2,7 °C на 1 °C . Результирующие изменения в составе и переносе в стратосфере зависят от деталей стратегии

впрыска и сильно зависят от модели.

Потери озона в пределах Арктического полярного вихря еще не были надежно оценены количественно для SAI. Ожидается, что введение аэрозолей, отличных от сульфатных, может изменить воздействие на озон посредством сопутствующих изменений в гетерогенной химии, динамике и переносе. Типы аэрозолей, которые более химически инертны и поглощают меньше солнечной радиации, могут соответственно уменьшить химическое и динамическое воздействие на стратосферный озон. Однако лабораторные исследования и моделирование климатических моделей, достаточные для количественной оценки этих эффектов, еще предстоит проведены.

2. Комбинированная химико-климатическая модель общей циркуляции атмосферы SOCOLv3.

SOCOL (SOlar Climate Ozone Links) — комплексная химико-климатическая модель, охватывающая атмосферу от поверхности Земли до мезосферы (около 80 км). Текущее поколение SOCOL состоит из версии модели общей циркуляции (GCM) MA-ECHAM5 для средней атмосферы и модифицированной версии UIUC (Университет Иллинойса в Урбане-Шампейне) модели атмосферного химического переноса MEZON. Модуль химии охватывает стратосферную гомогенную и гетерогенную химию озона и наиболее важные химические процессы для описания фоновой химии тропосферы, включая механизм окисления изопрена. SOCOL может работать с различными разрешениями по горизонтали (усечение спектра T31 или T42) и уровнями по вертикали (39 или 90).

В работе рассмотрено третье поколение связанной химико–климатической модели (CCM) SOCOL (инструменты моделирования для изучения связей солнечного климата с озоном). Наиболее заметными изменениями по сравнению с предыдущей версией модели являются:

- динамическое ядро было обновлено с помощью пятого поколения модели общей циркуляции средней атмосферы MA-ECHAM (модель климата Европейского центра/Гамбурга),

- адвекция химических соединений теперь рассчитывается с помощью потока, сохраняющего массу и форму.

- транспортная схема вместо ранее использовавшейся гибридной схемы подключения.

Весь химический код был переписан в соответствии с инфраструктурой ECHAM5 и перенесен на Fortran95. В отличие от своих предшественников, SOCOLvs3 теперь полностью распараллелен. Производительность новой версии SOCOL оценивается на основе моделирования переходных моделей

(1975-2004) с различными горизонтальными (T31 и T42) разрешениями, следуя подходу деятельности по валидации модели CCMVal-1. Усовершенствованная схема адвекции значительно уменьшает искусственную потерю и накопление масс трассеров в областях с сильными градиентами, что наблюдалось в предыдущих версиях модели.

По сравнению со своими предшественниками, SOCOLvs3 в целом показывает более реалистичное распределение химических микроэлементов, особенно общего неорганического хлора, с точки зрения среднего состояния, а также годовой и межгодовой изменчивости. Достижениями в отношении модельной динамики являются, например, лучшее представление о среднем состоянии стратосферы весной, особенно в Южном полушарии, и замедление восходящего распространения в тропической нижней стратосфере.

Несмотря на большое количество улучшений, недостатки модели все еще остаются. Примером является слишком быстрое вертикальное восхождение и/или горизонтальное перемешивание в тропической стратосфере, смещение температуры в сторону понижения в самой нижней полярной стратосфере и завышение общей потери озона в полярных районах во время антарктической весны.

Химический модуль, используемый в модели, носит название MEZON. Он имеет ту же вертикальную и горизонтальную сетку, что и MA-ECHAM5; т.е. химические расчеты выполняются на гауссовой сетке с гибридной сигма-координатой p по вертикали. Модель включает 41 химический элемент кислородной, водородной, азотной, углеродной, хлорной и бромной групп, которые определяются 140 газофазными реакциями, 46 реакциями фотолиза и 16 гетерогенными реакциями в/на водных аэрозолях серной кислоты, а также тремя типами полярных стратосферных облаков (PSC), супер охлажденные капли тройного раствора (STS), водяной лед и азотная кислота тригидрат кислоты (NAT).

В параметризации гетерогенной химии учитывается поглощение HNO_3

водными аэрозолями серной кислоты, приводящее к образованию STS. Параметризация коэффициентов поглощения реактивности в жидкой фазе (PSC) для водяного льда использует предписанную плотность частиц 0,01 $см^{-3}$ (вместо 0,1 $см^{-3}$, используемого в SOCOLvs2) и предполагает, что частицы облака находятся в термодинамическом равновесии с их газообразной средой. NAT образуется, если парциальное давление HNO_3 превышает его давление насыщения, предполагая, что средний радиус частиц для NAT составляет 5 мкм. Плотности числа частиц ограничены верхней границей 5×10^{-4} $см^{-3}$, чтобы учесть тот факт, что наблюдаемые облака NAT часто сильно перенасыщены, что является численно простым термодинамическим приближением для кинетики медленного роста этих частиц. Осаждение NAT и водяного льда основано на теории Стокса.

Водяной лед и NAT явно не переносятся, но испаряются обратно в водяной пар и газообразный HNO_3 после каждого химического временного этапа транспортируется в фазе пара, а затем в зависимости от условий насыщения регенерируется на следующем временном этапе с помощью термодинамического приближения, описанного выше.

Коэффициенты скорости химической реакции берутся из документа JPLPublications Скорости фотолиза рассчитываются на каждом химическом временном шаге с использованием метода справочной таблицы, включая эффекты изменения солнечной освещенности. Влияние облачности на скорость фотолиза уже было включено в расширенную тропосферную версию SOCOL, но не в рабочую модель, как представлено здесь.

Решение химических уравнений основано на неявном итеративном Ньютоне–Схема Рафсона (Озолин, 1992; Стотт и Харвуд, 1993). Химические расчеты выполняются каждые 2 часа. МЕЗОН рассматривает сухое осаждение O3, CO, NO, NO2, HNO3 и H2O2. Скорости сухого осаждения на суше и в море основаны на данных Hauglustaine et al. (1994). Кроме того, в тропосферный вымыв HNO3 описывается постоянной скоростью удаления 4

$\times 10^{-6}c^{-1}$; т.е. каждые два часа удаляется 2,8 % тропосферного HNO3.

В отличие от SOCOLvs2, перенос химических микроэлементов рассчитывается с использованием схемы адвекции Лина и Руда (1996), реализованной в MA-ECHAM5, вместо гибридной схемы Зубова и др. (1999), которая была частью МЕЗОН. Как и в предыдущей версии модели, переносятся все отдельные химические соединения семейств Cly, Bry и NOy (а также сами семейства, чтобы по-прежнему быть в состоянии применить семейную коррекцию).

В отличие от предыдущих версий модели, транспортировка рассчитывается каждый динамический временной шаг (15 минут) вместо каждых 2 часов.SOCOLvs2 различал два поля водяного пара: поле GCM, используемое ниже 100 ГПа, которое включало полный гидрологический цикл в тропосфере, и поле CTM, используемое выше 100 ГПа для учета образования/разрушения водяного пара в результате химических реакций. В vs3 это неудовлетворительное разделение устарело. SOCOLvs3 учитывает только одно поле водяного пара, т.е. водяное поле ECHAM5 (пар).

Крупномасштабная адвекция, кучевая конвекция и тропосферный гидрологический цикл рассчитываются GCM, в то время как химическое образование/разрушение водяного пара, а также образование PSC рассчитываются модулем химии. Чтобы избежать помех между схемой облаков ECHAM5 и процедурой PSC, создатели гарантируют, что параметризация слоистых облаков ECHAM5 отключена в стратосфере.

Точный расчет адвективного переноса химических веществ имеет фундаментальное значение для общей эффективности связанных химико–климатических моделей (CCMS). Недостатки в схеме переноса могут привести к ошибкам в пространственном распределении и временной эволюции озона и других химических газов, которые реагируют с озоном, например, хлор- и бромсодержащие виды (Schraner et al., 2008; Stenke et al., 2008, 2009). Кроме того, смещения модели в распределениях индикаторов

могут негативно влиять на динамику модели через радиационную обратную связь. Растущее число рассматриваемых химических соединений и сложные процессы обратной связи делают современные химико–климатические модели все более уязвимыми к ограничениям применяемых численных схем.

Как показали Schraner и др. (2008), некоторые недостатки первой версии (vs1.0) CCM SOCOL (инструмент моделирования для изучения связей солнечного климата с озоном, Егорова и др., 2005) были напрямую связаны с недостатками схемы полулагранжевой адвекции (Ritchie, 1985; Williamson и Раш, 1989) применялись для горизонтального переноса трассеров. В течение длительного времени полулагранжевы схемы адвекции широко использовались в моделях общей циркуляции (GCMs) и CCMs. Основное преимущество полулагранжевых методов заключается в том, что условие стабильности Куранта–Фридрихса–Леви (CFL) (Courant et al., 1928) не должно выполняться, что позволяет выполнять большие временные шаги адвекции (даже вблизи полюсов, где небольшие размеры ячеек провоцируют нарушение критерия CFL). В предыдущих версиях модели применялся временной шаг адвекции в два часа, что делало SOCOL очень эффективным в вычислительном отношении. Кроме того, полулагранжевые методы являются вычислительно менее дорогостоящими, чем, например, схемы с потоковой формой (Rasch and Lawrence, 1998). Однако эта проблема становится менее критичной с улучшениями в современных-технология puter.

Недостатком полулагранжевого подхода является отсутствие сохранения массы, что требует применения так называемых фиксаторов массы после каждого временного шага адвекции (Williamson and Rasch, 1989) для обеспечения глобального сохранения массы. Однако применение коррекции массы в глобальном масштабе может привести к искусственному переносу массы и нежелательному накоплению или потере массы в определенных регионах. Эта проблема наиболее опасна в областях, характеризующихся резкими градиентами трассировки, таких как край

полярного вихря. Ошибочные концентрации затем могут быть перенесены на другие модельные слои, что приводит к распределению нефизических индикаторов (Schraner et al., 2008).

В SOCOLvs1.0 недостатки полулагранжевой схемы адвекции стали наиболее очевидными при моделировании распределения общего органического и неорганического хлора (CCly1). Поскольку поверхностные выбросы хлорфторуглеродов (ХФУ) и тропосферный вымыв HCl являются единственными процессами источника и поглощения общего хлора в модели, CCly ожидается, что он будет вести себя как пассивный индикатор с относительно равномерным распределением по всей стратосфере и мезосфере. Однако стратосферное соотношение общего неорганического хлора (Cly), смоделированный с помощью SOCOLvs1.0, был на 30% выше чем максимальное количество общего хлора (CCly), входящего в стратосферу (см. Schraner et al., 2008, их рис. 1).

Более того, нереалистичный CCly минимумы наблюдались в высоких широтах около 50 ГПа зимой и весной, наиболее заметные над Антарктидой, со значениями до 50% ниже, чем где-либо еще. Этот пример демонстрирует искусственное накопление и потерю массы, вызванные полулагранжевой схемой адвекции и ее процедурой фиксации массы.

Schraner et al. (2008) описали простой, эффективный метод для уменьшения этих недостатков, связанных с переносом, для моделируемых соединений хлора, брома и азота. Идея так называемой “коррекции массы на основе семейства” основана на том факте, что относительно гладкие распределения индикаторов, такие как распределения Cly, Bry, и NOy семейства, гораздо менее критичны для ошибок переноса, чем неоднородные распределения отдельных членов семейства. Следовательно, соответствующие семьи перевозятся в дополнение к отдельным членам семьи, и массовый фиксатор больше не применяется к членам семьи, а к перевозимой семье. Транспортируемое семейство с поправкой на массу затем

используется для изменения пропорций смешивания членов семейства в каждой ячейке сетки. Этот метод обеспечивает локальное сохранение массы и привел к ряду улучшений модели в SOCOLvs2.

Как показали Schraner et al. (2008), эта простая концепция, хотя и значительно уменьшает недостатки полулагранжевой схемы, не может полностью устранить их. Во-первых, даже Cly, Bry, и NOy семейства не являются полностью однородными, но имеют сильные градиенты в тропопаузе. Поэтому массовый фиксаж влияет на сами семейства трассировщиков. Во-вторых, этот метод может быть применен только к химическим видам, принадлежащим к определенному семейству. Для химических соединений без соответствующего семейства, например, самого озона, необходимо применять альтернативный метод, например, ограничивая массовый фиксаж определенными географическими регионами (Schraner et al., 2008).

Однако по сравнению с Cly или Bry продолжительность жизни в стратосфере из Ox семейство намного короче, и, следовательно, сохранение массы во время адвекции становится менее критичным, чем для трассеров со сроком службы более одного года. Из всего этого очевидно, что более удовлетворительный подход к проблеме адвекции требует замены полулагранжевой схемы более совершенным подходом с сохранением массы.

Двумя наиболее важными модификациями SOCOLvs3 по сравнению с его предшественниками являются (1) базовая модель общей циркуляции была обновлена с модели средней атмосферы GCM MA-ECHAM4 (Европейский центр / Гамбургская климатическая модель; Roeckner et al., 1996; Манзини и Бенгтссон, 1996) до MA-ECHAM5 (Roeckner et al., 1996). al., 2003, 2006; Manzini et al., 2006), и (2) адвекция химических микроэлементов теперь рассчитывается с помощью полулагранжевой схемы fluxform Лина и Руда (1996) вместо ранее применявшейся гибридной схемы адвекции.

Гибридный подход был подробно описан Зубовым и др. (1999). Схема

гибридной адвекции использует подход разделения операторов; т.е. вертикальный и горизонтальный перенос вычисляются отдельно. В вертикальном направлении он использует эйлерову схему, предложенную Пратером (1986), в то время как в горизонтальном направлении применяется полулагранжева схема (Ричи, 1985; Уильямсон и Раш, 1989). Схема адвекции Лина и Руда (1996), которая оперативно реализована в (MA-) ECHAM5, представляет собой многомерный потоксхема формы и масса конструкции консервативны в соответствии с точностью станка. Он также может справиться с длительными временными этапами, чтобы сделать его применимым в рамках GCMs. В дополнение к сохранению массы, схема адвекции Лина и Руда (1996) удовлетворяет другим фундаментальным требованиям к алгоритмам трассировки, таким как монотонность и сохранение корреляций трассировки. Кроме того, схема адвекции очень эффективно предотвращает численную диффузию.

В SOCOLvs1 и vs2 код модуля химии не был распараллелен, и поэтому модель могла быть запущена только на одном процессоре. Чтобы воспользоваться преимуществами современных параллельных компьютерных архитектур, распараллеливание химического кода было еще одной важной целью. Для SOCOLvs3 код химии был переведен на Fortran95 и полностью переработан в соответствии с инфраструктурой и модульностью ECHAM5.

Целью этого документа является предоставление технического описания новой версии SOCOLvs3 и оценка производительности обновленной модели в отношении динамики и химии модели, документирование улучшений модели и выявление оставшихся недостатков. Как и в предыдущих публикациях по оценке моделей, это исследование основано на моделировании переходных процессов с горизонтальным разрешением T31 (3,75◦×3.75◦), охватывающий 1975-2004 годы, включая многочисленные природные и антропогенные воздействия. Кроме того, здесь

мы также используем горизонтальное разрешение T42 (2.8◦×2.8◦). Анализ результатов модели соответствует руководящим принципам WCRP/SPARC (Всемирная программа исследований климата/Стратосферные процессы и их роль в климате) химия–деятельность по валидации климатической модели CCMVal1 (Eyring et al., 2006). Инициатива CCMVal-2 (SPARC, 2010) использовала более продвинутый и обширный набор диагностических средств, который выходит за рамки данной статьи.

2.1 Динамический модуль MA-ECHAM5

MA-ECHAM5 (Manzini et al., 2006) - это недавняя среднеатмосферная версия ECHAM GCM, разработанная в MPI для метеорологии, Гамбург. ECHAM первоначально развился из спектральной модели прогнозирования погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF; Simmons et al., 1989), ополненной комплексным пакетом параметризации для климатических приложений. Подробное описание модели ECHAM5 дано Roeckner et al. (2003,2006). В рамках SOCOLvs3 используется модель MA-ECHAM версии 5.4.00.

Все версии ECHAM представляют собой спектральные модели общей циркуляции, основанные на примитивных уравнениях с прогностическими переменными температурой, завихренностью, расходимостью, логарифмом приземного давления, влажности и облачной воды. Перенос трассировщика и физика модели рассчитываются на сетке преобразования Гаусса. В вертикали используется гибридная система координат сигма-р. Версия MA-ECHAM5 для средней атмосферы может работать с 39 или 90 вертикальными уровнями. Верхняя часть модели центрирована на 0,01 ГПа (≈ 80 км) для обоих вертикальных разрешений. В SOCOLvs3 по умолчанию используется 39 уровней. Временной шаг модели для динамических процессов и физических параметризаций составляет 15 минут.

По сравнению с ECHAM4, в ECHAM5 были изменены несколько параметров физических процессов. Была разработана новая параметризация слоистых облаков, включающая отдельную обработку облачной воды и облачного льда, усовершенствованную микрофизику облаков и статистическую модель для расчета облачного покрова. Описание процессов связи между поверхностью суши и атмосферой было улучшено, включая новый набор данных о поверхности суши. Водяной пар, переменные облачности и химические соединения перемещаются с помощью основанной на потоке схемы переноса с сохранением массы и формы (Lin and Rood, 1996) вместо полулагранжевого подхода, используемого в ECHAM4. Схема рассчитана на временные шаги произвольной длины. Таким образом, что касается полулагранжевой схемы, то критерий устойчивости CFL не обязательно должен выполняться.

Схема коротковолнового излучения основана на радиационном коде ECMWF (Fouquart and Bonnel, 1980) и в основном такая же, как в ECHAM4. Однако спектральное разрешение было увеличено с 2 до 6 полос, с тремя полосами в УФ-видимом диапазоне (185-250 нм, 250-440 нм, 440-690 нм) и тремя полосами в ближнем ИК-диапазоне (690-1190нм, 1190-2380 нм, 2380-4000 нм) (Cagnazzo et al.,2007). Чтобы получить реалистичные скорости нагрева в мезосфере, SOCOL дополнительно учитывает поглощение O2 и O3 в линии излучения Лаймана-альфа солнечного водорода (121,6 нм) и O2.

Полосы поглощения Шумана–Рунге (175-200 нм); см. Егорова и др. (2004). Эта параметризация не является частью исходного (MA-) кода ECHAM5. Схема длинноволнового излучения также была изменена по сравнению с ECHAM4: вместо метода излучения, применяемого в ECHAM4, используется RRTM (быстрая передача излучения Модель) используется схема (Mlawer et al., 1997), основанная на более точном k-коррелированном методе. По сравнению с MAECHAM4 количество спектральных интервалов было увеличено с 6 до 16 длинноволновых полос.

Полные расчеты переноса излучения выполняются каждые 2 часа. Рассчитанные длинноволновые потоки поддерживаются постоянными в течение всего временного шага излучения, в то время как коротковолновые потоки обновляются каждый динамический временной шаг с учетом изменений локального зенитного угла.

Параметризация эффектов спектра гравитационных волн основана на так называемой теории доплеровского распространения и следует формулировке Хайнса (1997a, b). Спектр источника схемы Хайнса приведен Манзини и др. (2006).

2.2 Химический модуль MEZON

Химический модуль, используемый в модели, носит название MEZON. Он имеет ту же вертикальную и горизонтальную сетку, что и MA-ECHAM5; т.е. химические расчеты выполняются на гауссовой сетке с гибридной сигма-координатой p по вертикали. Модель включает 41 химический элемент кислородной, водородной, азотной, углеродной, хлорной и бромной групп, которые определяются 140 газофазными реакциями, 46 реакциями фотолиза и 16 гетерогенными реакциями в/на водных аэрозолях серной кислоты, а также тремя типами полярных стратосферных облаков (PSC), супер охлажденные капли тройного раствора (STS), водяной лед и азотная кислота тригидрат кислоты (NAT).

В параметризации гетерогенной химии учитывается поглощение HNO_3 водными аэрозолями серной кислоты, приводящее к образованию STS. Параметризация коэффициентов поглощения реактивности в жидкой фазе (PSC) для водяного льда использует предписанную плотность частиц 0,01 $см^{-3}$ (вместо 0,1 $см^{-3}$, используемого в SOCOLvs2) и предполагает, что частицы облака находятся в термодинамическом равновесии с их газообразной средой. NAT образуется, если парциальное давление HNO_3

превышает его давление насыщения, предполагая, что средний радиус частиц для NAT составляет 5 мкм. Плотности числа частиц ограничены верхней границей 5×10^{-4} $см^{-3}$, чтобы учесть тот факт, что наблюдаемые облака NAT часто сильно перенасыщены, что является численно простым термодинамическим приближением для кинетики медленного роста этих частиц. Осаждение NAT и водяного льда основано на теории Стокса.

Водяной лед и NAT явно не переносятся, но испаряются обратно в водяной пар и газообразный HNO_3 после каждого химического временного этапа транспортируется в фазе пара, а затем в зависимости от условий насыщения регенерируется на следующем временном этапе с помощью термодинамического приближения, описанного выше.

Коэффициенты скорости химической реакции берутся из документа JPLPublications Скорости фотолиза рассчитываются на каждом химическом временном шаге с использованием метода справочной таблицы, включая эффекты изменения солнечной освещенности. Влияние облачности на скорость фотолиза уже было включено в расширенную тропосферную версию SOCOL, но не в рабочую модель, как представлено здесь.

Решение химических уравнений основано на неявном итеративном Ньютоне–Схема Рафсона (Озолин, 1992; Стотт и Харвуд, 1993). Химические расчеты выполняются каждые 2 часа. МЕЗОН рассматривает сухое осаждение O3, CO, NO, NO2, HNO3 и H2O2. Скорости сухого осаждения на суше и в море основаны на данных Hauglustaine et al. (1994). Кроме того, в тропосферный вымыв HNO3 описывается постоянной скоростью удаления $4 \times 10^{-6} с^{-1}$; т.е. каждые два часа удаляется 2,8 % тропосферного HNO3.

В отличие от SOCOLvs2, перенос химических микроэлементов рассчитывается с использованием схемы адвекции Лина и Руда (1996), реализованной в MA-ECHAM5, вместо гибридной схемы Зубова и др. (1999), которая была частью МЕЗОН. Как и в предыдущей версии модели, переносятся все отдельные химические соединения семейств Cly, Bry и NOy

(а также сами семейства, чтобы по-прежнему быть в состоянии применить семейную коррекцию).

В отличие от предыдущих версий модели, транспортировка рассчитывается каждый динамический временной шаг (15 минут) вместо каждых 2 часов.SOCOLvs2 различал два поля водяного пара: поле GCM, используемое ниже 100 ГПа, которое включало полный гидрологический цикл в тропосфере, и поле CTM, используемое выше 100 ГПа для учета образования/разрушения водяного пара в результате химических реакций. В vs3 это неудовлетворительное разделение устарело. SOCOLvs3 учитывает только одно поле водяного пара, т.е. водяное поле ECHAM5 (пар).

Крупномасштабная адвекция, кучевая конвекция и тропосферный гидрологический цикл рассчитываются GCM, в то время как химическое образование/разрушение водяного пара, а также образование PSC рассчитываются модулем химии. Чтобы избежать помех между схемой облаков ECHAM5 и процедурой PSC, создатели гарантируют, что параметризация слоистых облаков ECHAM5 отключена в стратосфере.

2.3 Настройка модели и граничные условия

Оценка новой версии модели SOCOLvs3 основана на двух моделях моделирования переходных процессов с 1975 по 2004 год для горизонтальных разрешений T31 и T42. Моделирование обеих моделей было выполнено с разрешением по вертикали 39 уровней. Настройка моделирования соответствует спецификациям эталонного моделирования CCMVal2 REF-B1 (Eyring et al., 2008), которое было разработано для максимально реалистичного воспроизведения прошлых атмосферных условий. Моделирование обусловлено несколькими природными и антропогенными воздействиями, такими как 11-летний цикл, квазидвухлетнее колебание (QBO), стратосферная сульфатная аэрозольная нагрузка, а также изменения концентраций следовых газов.

Глобальные температуры поверхности моря (SSTs) и покрытие морского льда (SIC) указаны в качестве ежемесячных средних значений в соответствии с набором данных HadISST1, предоставленным Центром Хэдли Метеорологического бюро Великобритании (Rayner et al., 2003). Набор данных основан на объединенных спутниковых и натурных наблюдениях. Атмосферные концентрации наиболее значимых зеленых-бытовые газы (CO2, CH4, N2O) для лет до 1996 года предписаны в соответствии с МГЭИК (2001). Этот временной ряд объединен с наблюдениями NOAA за период с 1997 по 2004 год (Eyringet al., 2008). Зависящие от времени коэффициенты поверхностного смешивания озоноразрушающих веществ (ОРВ) взяты из ВМО (2007). Потоки выбросов CO и оксидов азота (NOx) из промышленных источников, трафик и сжигание биомассы взяты из РЕТРО-набора данных (Schultz and Rast, 2007), в то время как выбросы из почв и океанов следуют за Horowitz et al. (2003).

Химический эффект повышенной аэрозольной нагрузки в стратосфере после двух крупных извержений вулканов Эль-Чичон (1982 г.) и Маунт-Пинатубо (1991 г.) учитывается путем определения наблюдаемых значений плотности площади поверхности сульфатного аэрозоля (SAD) в качестве среднемесячных значений. Временные ряды SAD основаны на наблюдениях SAGE I, SAGE II, SAM II и SME и охватывают период с 1979 по 2005 год. Более подробная информация о объединенных временных рядах SAD приведена в Eyring et al. (2008). Радиационные эффекты извержений вулканов рассчитываются онлайн. Для этой цели коэффициент экстинкции, асимметрия фактор и альбедо однократного рассеяния записи стратосферного аэрозоля были предварительно рассчитаны с использованием теории Ми, как описано в Schraner et al. (2008), с плотностью площади поверхности аэрозоля и эффективным радиусом аэрозоля (оба получены из набора данных SAGE Томасоном и Питером, 2006) в качестве входных параметров. Тропосферная аэрозольная климатология (Lohmann et al., 1999)

используется для расчета локальных скоростей нагрева и коротковолнового обратного рассеяния. Взаимодействия аэрозоля и облака и гетерогенный химический состав тропосферных аэрозолей или облаков в SOCOL не рассматриваются.

Квазидвухлетнее колебание (QBO) вызвано линейной релаксацией (“подталкиванием”) моделируемых зональных ветров в экваториальной стратосфере к временному ряду наблюдаемых профилей ветра (Giorgetta, 1996). Подталкивание применяется между 20◦N и 20◦S от 90 ГПа и выше до 3 ГПа. В пределах основного домена QBO (10◦N–10◦S, 50-8ГПа) время релаксации равномерно устанавливается равным 7 дням; за пределами этой области затухание зависит от широты и высоты. Следует отметить, что описанный подход подталкивания необходим только для версии модели с 39 уровнями. Версия MA-ECHAM5 с 90 вертикальными уровнями самопроизвольно имитирует QBO (Giorgetta et al., 2006).

Изменчивость солнечной радиации была учтена при расчетах потоков солнечной радиации, скоростей фотолиза и нагрева с использованием временных рядов среднемесячной внеземной спектральной солнечной радиации (SSI), составленных Lean et al. (2005). Эти данные были использованы для расчета интегрированных внеземных солнечных потоков для шести интервалов кода солнечного излучения MA-ECHAM5, а также параметров для параметризации скоростей нагрева из-за поглощения на длинах волн линии Лаймана-альфа и Оркестры Шумана–Рунге. Временные ряды SSI также использовались для расчета ежемесячных справочных таблиц для расчета скоростей фотолиза в химической части модели.

3. Численное моделирование влияния изменения климата на газовый состав атмосферы

Оценка влияния изменения климата на газовый состав атмосферы проводилась путем моделирования содержания озона в атмосфере согласно различным сценариям. Авторами были разработаны шесть сценариев, позволяющих оценить роль ОРВ, парниковых газов, температуры поверхности океана и площади морского льда, вариаций солнечной активности и атмосферного аэрозоля в изменение количества озона в атмосфере.

В качестве основных рассматривались следующе факторы:

(1) изменение содержания озоноразрушающих веществ;

(2) изменение атмосферных концентраций парниковых газов, температуры поверхности океана и площади морского льда;

(3) вариации солнечной активности;

(4) изменение содержания атмосферного аэрозоля.

При этом, для оценки относительной роли указанных факторов были проведены расчеты по сценариям с учетом каждого фактора (с 1 по 4) по отдельности, а также базовый модельный эксперимент по сценарию с учетом всех факторов совместно.

Моделирование проводилось с 1977 по 2020 год. Анализ результатов и оценка воздействия проводилась с 1980 по 2020 год. В каждом сценарии изменялся только один влияющий фактов, остальные фиксировались на уровне 1980 года. Данные сценарии позволили оценить только те изменения озона, которые происходили за счет изменяющихся факторов. Временное распределение влияющих факторов представлено на рисунке 1.

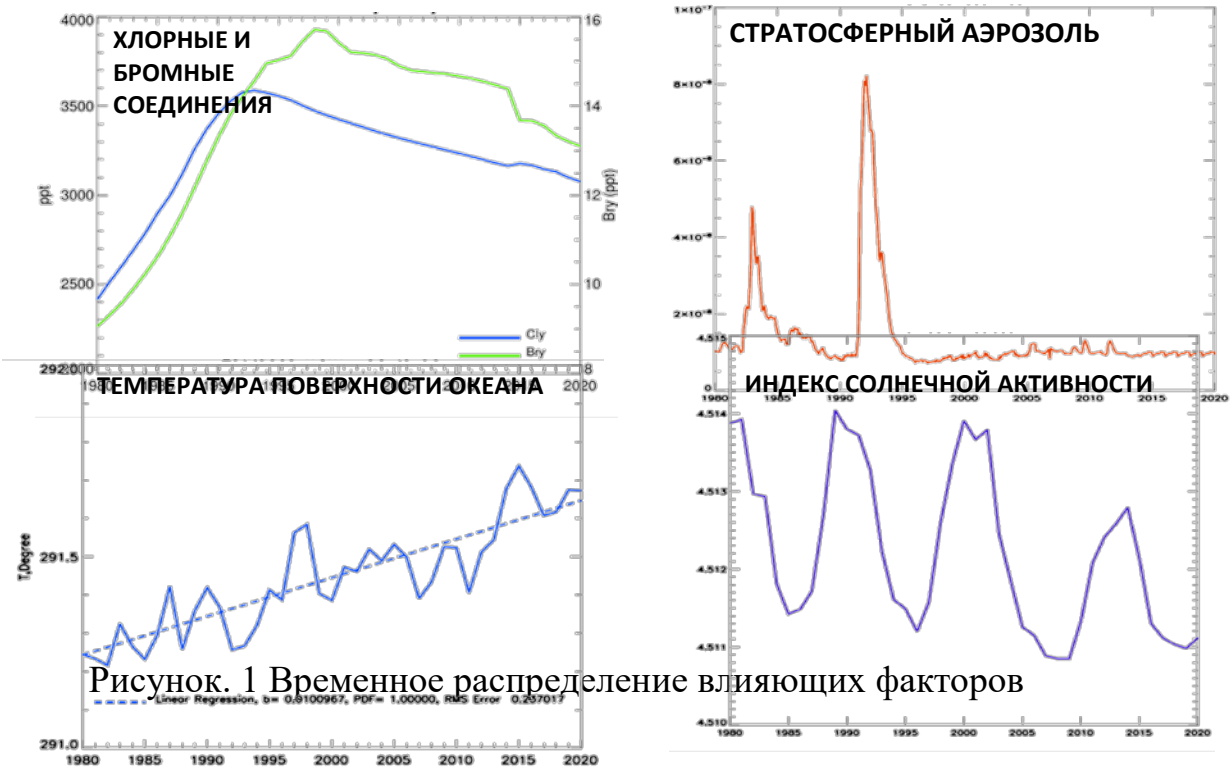

Рисунок. 1 Временное распределение влияющих факторов

На графике (а) мы видим, что количесвто ОРВ увеличивается, а после 2000 года идет на спад. Такое распределение должно уменьшить количество озона до 2000 года, после чего его содержание должно возрасти. Поскольку ОРВ уменьшаю количество озона и уменьшение их концентрации приведет к увеличению озона. На графике (б) представлена солнечная активность, которая прямо пропорциональна количеству озона, поскольку озон образуется под действием ультрафиолета. Чем больше солнечная активность, тем больше молекул кислорода разрушается и больше молекул О3 образовывается. Амплитуда солнечных циклов уменьшается, следовательно и количество озона предположительно должно уменьшаться и иметь меньшую амплитуду. На графике (в) представлено распределение стратосферного аэрозоля. Здесь четко видны 2 максимума – извержение вулканов, которые имели наибольшее влияние на стратосферный озон. Предполагается, что в случае с озоном, должен быть противоположный эффект и в годы с максимальным содержанием стратосферного аэрозоля будет наблюдаться минимальное количество озона. На графике (г) изображена температура поверхности океана. Здесь четко прослеживается

тенденция к росту температуры, что должно привести к росту содержание озона в атмосфере. Поскольку увеличение температуры должно привести к увеличению скоростей гетерогенных реакций и более быстрому образованию озона.

Следует отметить, что хоть в работе все эти процессы рассмотрены по отдельности, все процессы в атмосферы сложны и взаимодействуют между собой.

Для верификации модели использовались данные ре-анализа по общему содержанию озона и данные наблюдений со спутника. Результаты представлены на рисунке 2.

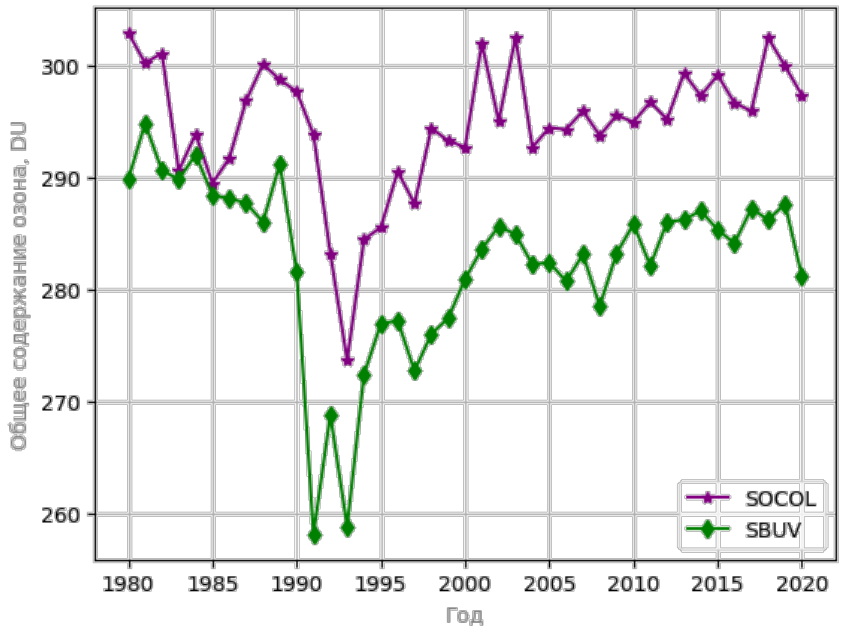

Рисунок 1. Верификация модели SOCOLv3

Анализ данных показал, что смоделированные значения хорошо соотносятся с данными других моделей, ре-анализов и данных наблюдений. Результаты SOCOLv3 сильнее всех занижают значения озона в 1983 и 1985 годах и завышают в 1993 и 2005-2007 годах. В целом можно считать, что данные достоверны, так как придерживаются общей тенденции.

Рассмотрим среднегодовое общее содержание озона в столбе воздуха для полярных регионов, средних и тропических широт. На рисунке 3

представлено среднегодовое общее содержание озона в столбе воздуха по всему земному шару.

Рисунок 2. Общее содержание озона по всему земному шару для всех разработанных сценариев.

На рисунке 3 мы видим, что наименьшее количество озона наблюдается при сценарии, где все факторы изменяются во времени, минимальные значения достигают 273 DU в годы, в которые наблюдались два мощных извержения вулкана. Однако, если посмотреть на распределение озона при варьирующихся значениях аэрозоля, то мы видим, что наибольший вклад аэрозоль внес только в 1983 году при извержении вулкана Эль-Чичона. В то время, как при всех остальные факторах наблюдались пики, которые подняли вверх кривую с общим запуском. В 1991-1992 годах, при извержении вулкана Пинатуба, также наблюдается яркий отрицательный пик

содержания озона, однако в этот раз все остальные сценарии находятся на минимуме, что также уменьшило значение при общем запуске. Сценарий с ОРВ, как и предполагалось, уменьшается до 2000 года, а после возвращается к норме, так как ведет себя прямо пропорционально содержание ОРВ в атмосфере. Климатические факторы повышают содержание озона. Озон при вариациях солнечной активности показывает определенную цикличность и уменьшает свою амплитуду к 2020 году.

На рисунке 4 представлено распределение озона в тропических широтах.

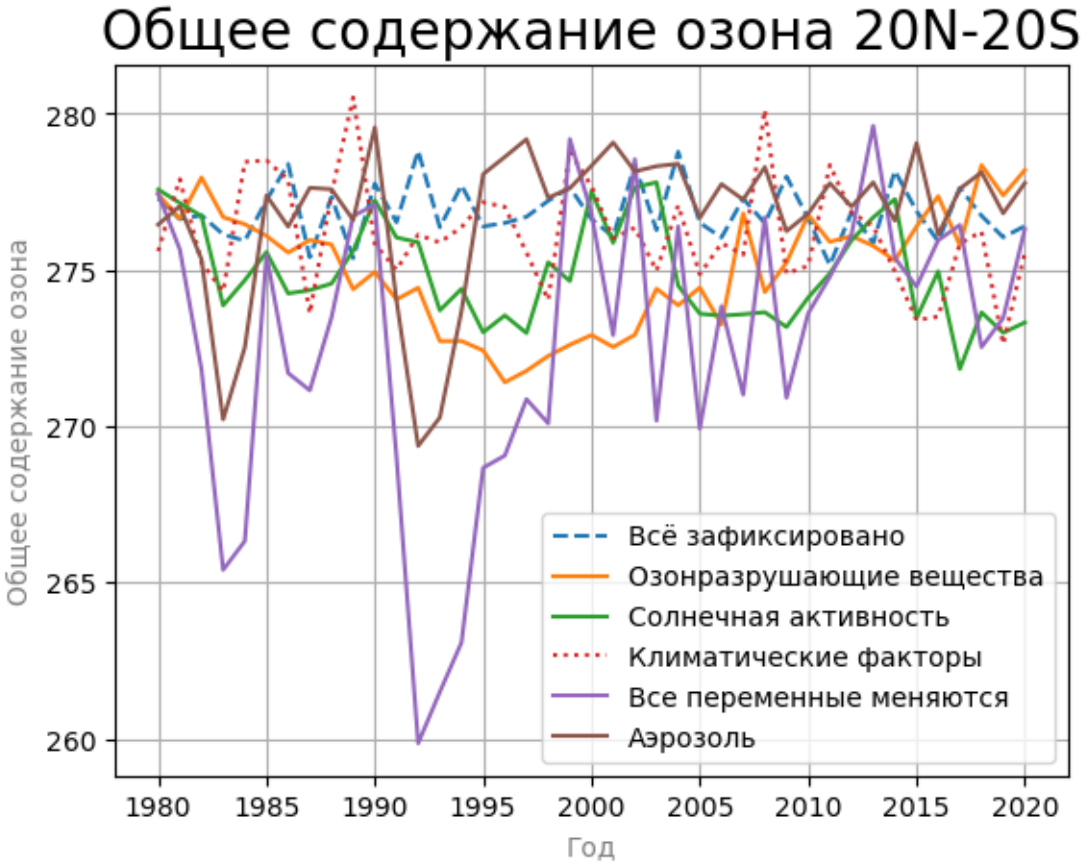

Рисунок 3. Распределение общего содержания озона в тропическом регионе

В данном случае мы видим более отчетливую цикличность при сценарии с меняющейся солнечной активностью, т.к. в тропических широтах влияние солнца прослеживается круглый год и является основным

источником образования озона. Изменение климатических факторов привело к образованию пиков в 1987 и 2008 годах на фоне общего повышения озона. Сценарий с ОРВ имеет меньшую амплитуду и менее ярко выражен, по сравнению с общим содержанием озона. На рисунке также четко прослеживается влияние стратосферного аэрозоля в годы извержения вулканов. В целом, значения содержания озона ниже, чем при глобальном распределении на 10 DU.

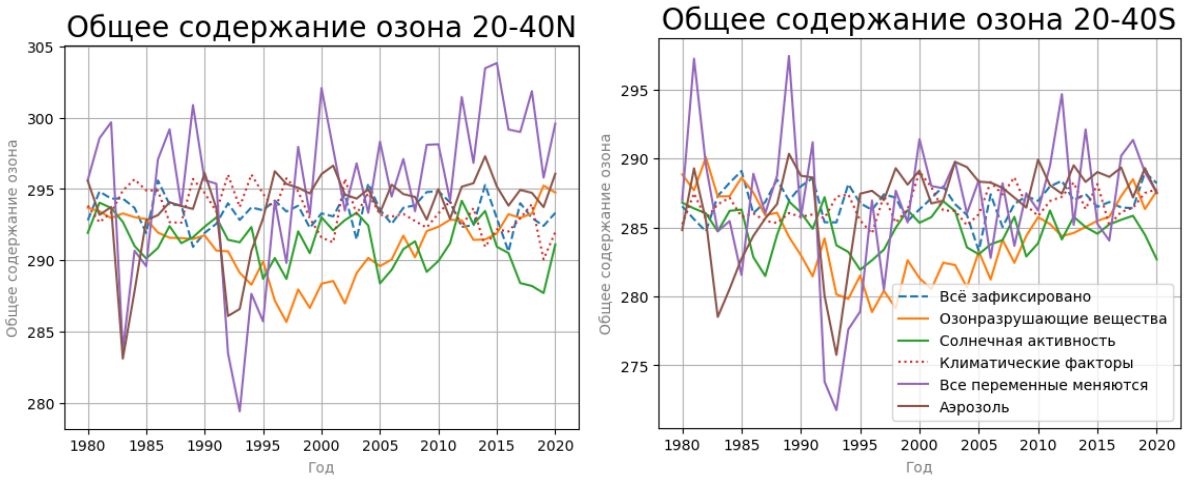

Рисунок 4. Общее содержание озона в средних широтах для северного(слева) и южного(справа) полушарий

Если говорить в целом, то в северном полушарии количество озона больше, чем в южном. На рисунке 5 слева мы видим два отрицательных пика, которые отражают извержение вулканов, в то время как южном полушарии (справа) видно извержение только вулкана Пинатубо в 1992 году. При полном сценарии мы видим рост количества озона, в то время как в южном полушарии озон варьируется около 185-190 DU. Прямая сценария с ОРВ более сглажена в северном полушарии и имеет схожий ход, при это она более ярко выражена, чем в тропиках и находится примерно на одном уровне как в северном, так и в южном полушариях. Озон при сценарии с варьирующейся солнечной активностью в обоих полушариях отражает свой 11-летний цикл,

однако в северному полушарии амплитуда колебаний увеличивается, а в южном – уменьшается к 2020 году. Эта разница связано с наличием суши в северном полушарии. Следует отметить, что при распределении озона, его экстремумы сдвинуты на 1-2 года относительно экстремумов солнечной активности. При рассмотрении сценария с климатическими изменениями мы видим, что количество озона в северном полушарии уменьшается к 2020 году, а в южном полушарии – увеличивается. Это также связано с тем, что большая часть средних широт южного полушария представлена океаном.

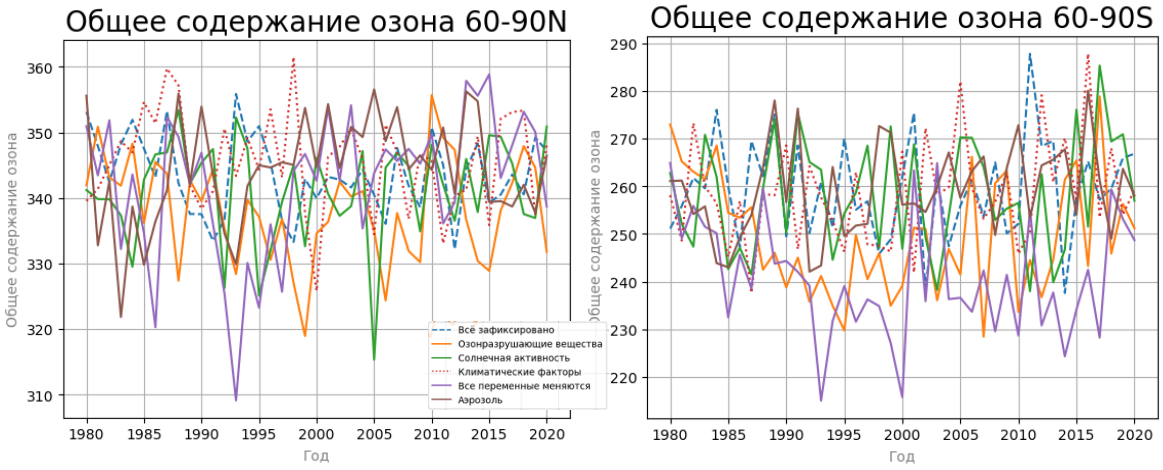

Рисунок 5. Общее содержание озона в полярных широтах для северного (слева) и южного (справа) полушарий

Содержание озона в полярных регионах более подвержено динамическому влиянию, поэтому описание с помощью моделирования и анализа одного изменяющегося фактора достаточно сложно. Слева мы видим, что полный сценарий придерживается общего распределения, как и в других широтах, однако имеет гораздо меньшую амплитуду. Озон в сценарии с климатическими факторами имеет достаточно большую амплитуда, что может говорить о влиянии площади морского льда и температуры поверхности океана. Влияние аэрозоля прослеживается, но гораздо в меньшей степени, чем в средних широтах, однако можно сделать вывод о том, что его вклад велик, поскольку во многих местах пики аэрозоля совпадают с пиками полного сценария. Внутренняя изменчивость озона при

контрольном сценарии также имеет неоднородное распределение. Справа на рисунке мы видим распределение озона в южном полярном регионе. Здесь все сценарии имеют ярко выраженный цикличный 11-12-летний ход. Возможно, это можно объяснить влиянием солнца и ошибкой в запуске модели, так как есть вероятность того, что какой-то компонент вариации солнечной активности не был отключен и его влияние в полярных регионах оказалось гораздо сильнее, чем в средних и низких широтах. Это влияние прослеживается как в северном, так и в южном полушарии, однако в Антарктиде это выражено более ярко.

Помимо глобального распределения общего содержания озона важно также посмотреть влияние рассматриваемых факторов как в тропосфере, так и в стратосфере. Это интересно с точки зрения того, что на разных высотах озон играет различную роль. Существует тенденция к увеличению температуры в тропосфере и её уменьшению в стратосфере. Что может привести к различным последствиям - может повлиять на скорости химических реакций, горизонтальный и вертикальный перенос атмосферных газов, волновые процессы, устойчивость полярного вихря и формирование полярных стратосферных облаков.

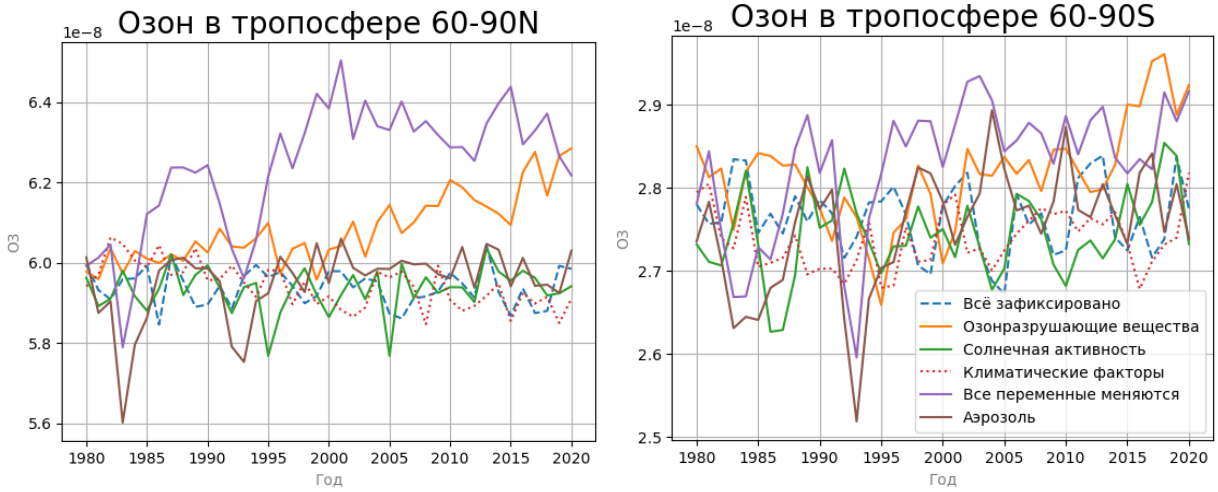

Рисунок 6. Озон в тропосфере в полярных широтах северного (слева) и южного (справа) полушарий

На рисунке 7 видно, что содержание озона в тропосфере северных широт почти в 2 раза выше, чем в южных. При этом в северном полушарии количество тропосферного озона при полном сценарии растет, а наибольший вклад вносит озон, полученный при сценарии с варьирующимися значениями ОРВ. Здесь также заметны отрицательные пики при извержении вулканов, хоть они и имеют совсем небольшие значения. Озон при климатических факторах в Арктике уменьшается. Озон при солнечной активности имеет достаточно сглаженный ход, цикл солнечной активности не выражен. В тропосфере Антарктики также прослеживается небольшое отклонение, вызванное извержением вулканов. Полный сценарий показывает, что количество озона увеличивается к 2020 году, при это наибольший вклад вносит озон, полученный при запуске сценария с ОРВ. Также как и в северном полушарии наибольшую роль играют сценарии с ОРВ и аэрозолем.

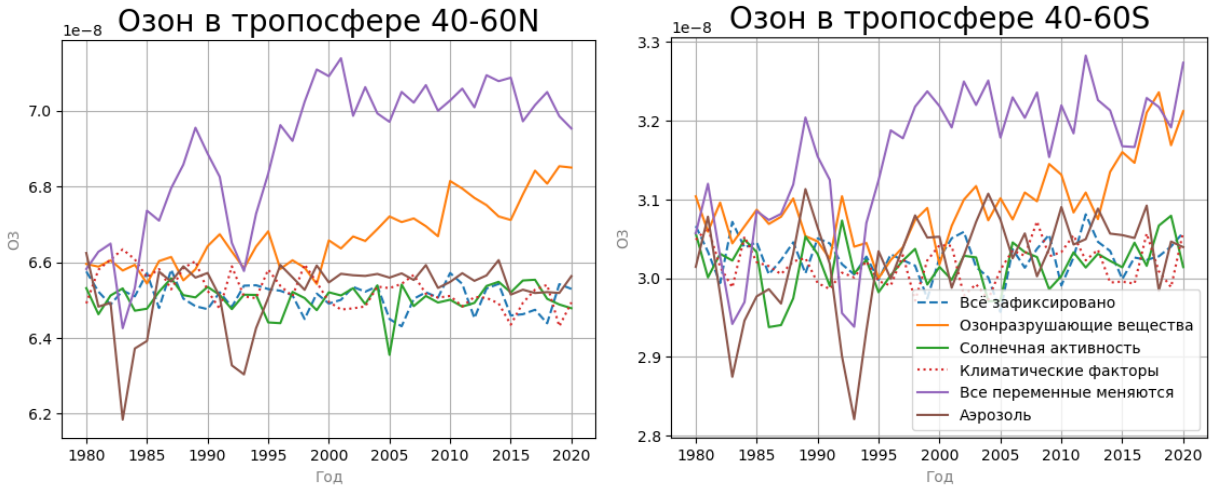

Рисунок 7. Озон в тропосфере в средних широтах северного (слева) и южного (справа) полушарий

Озон в тропосфере в средних широтах северного полушария имеет такой же ход, как и в полярных, однако максимум выше на 1 ppm. Наименьшее значение при моделировании с изменением аэрозолей, а максимальный эффект дают ОРВ. Климатические факторы, солнечная

активность, сосредоточены в районе контрольного запуска, где все параметры зафиксированы на уровне 1980 года. В южном полушарии эффект от сценариев более заметен Также как в южном, самыми низкими значениями обладает сценарий с вариацией аэрозолей, а максимальные значения имеют ОРВ. В целом можно отметить тенденцию роста содержания озона в тропосфере с 1980 по 2020 год. И если в северном полушарии пик содержания тропосферного озона приходился на 2000 год, то в южном полушарии – это 2005 год.

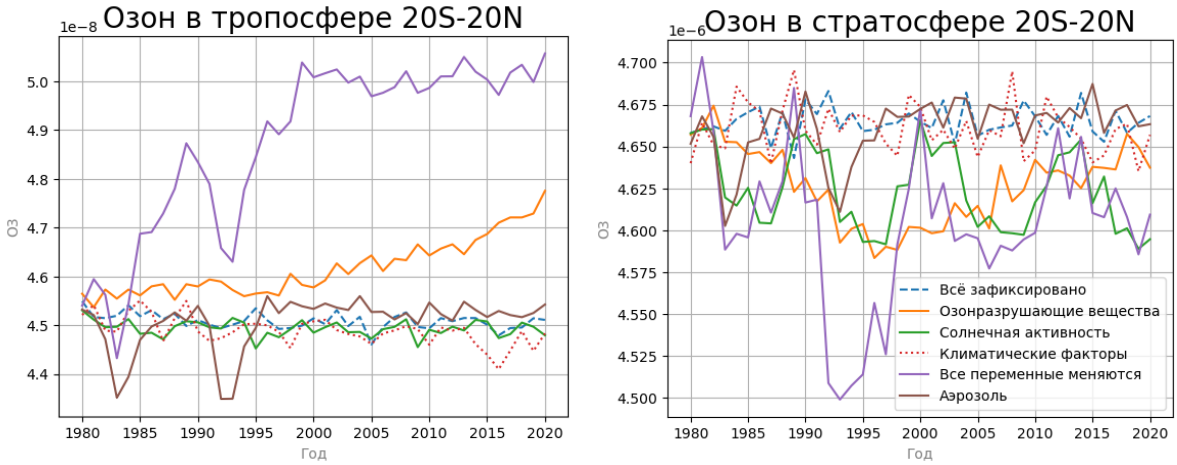

Рисунок 8. Озон в тропических широтах в тропосфере (слева)
и стратосфере (справа)

Сравнивая содержание озона в тропосфере и стратосфере тропических широт, видно, что в стратосфере содержание озона больше в 20 раз. При этом в тропосфере содержание озона при полном сценарии растет и достигает своего максимума в 2000 году, после чего держится на одном уровне. Также отражается влияние аэрозоля и извержений вулканов. Солнечная активность и климатические факторы имеют небольшое влияние, так как сосредоточены на уровне контрольного сценария и слабо изменяются. Наибольший вклад в содержание озона вносят ОРВ, а точнее их уменьшение. В стратосфере наибольшее влияние оказали аэрозоли и извержения аэрозолей. Здесь это наблюдается более отчетливо и продолжительно. В стратосфере

прослеживается 11-летний цикл солнечной активности, что связано с естественным процессом образования озона. Климатические факторы также находятся на уровне контрольного запуска. Содержание озона при полном сценарии имеет цикличный ход и имеет тенденцию на уменьшение озона. В целом можно сделать вывод, что озон в тропосфере растет, а в стратосфере уменьшается.

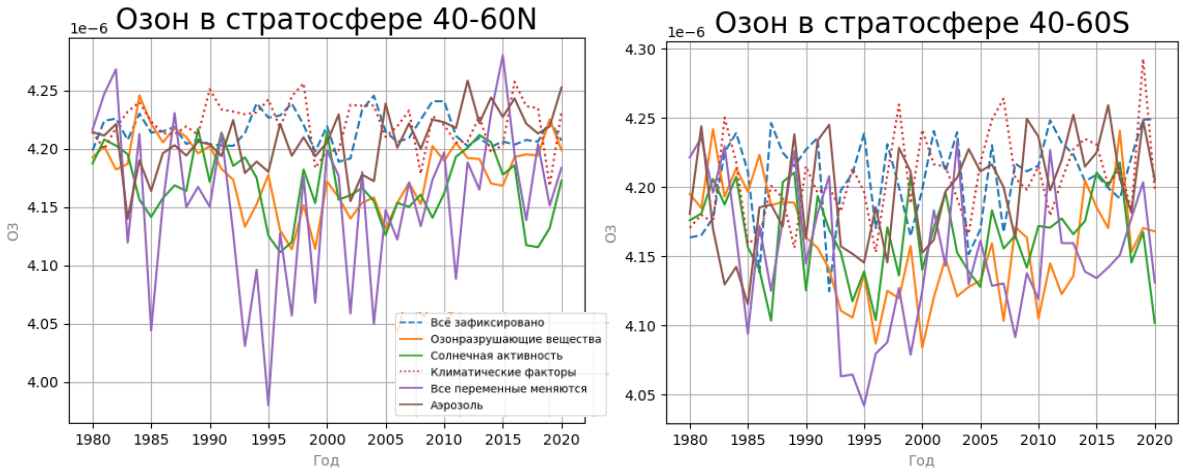

Рисунок 9. Озон в стратосфере в средних широтах северного (слева) и южного (справа) полушарий

Озон в стратосфере в средних широтах в северном полушарии на рисунке 10 (слева) при полном сценарии имеет общий ход с сценарием, где варьируются ОРВ. Они вносят существенный вклад в ход прямой. В аэрозолях не видно извержений вулканов, однако в полном сценарии, где задействованы все факторы, наблюдаются пики с минимальным количеством озона в годы с извержением вулканов. Климатические факторы привели к увеличению содержания стратосферного озона. Солнечная активность имеет ярко выраженную цикличность как в северном, так и в южном полушарии. В южном полушарии на средних широтах прямые имеют менее сглаженный ход и повторяют пики контрольного сценария, в котором все влияющие факторы зафиксированы. Минимум стратосферного озона сосредоточен в 1995 году, на что повлияло извержение вулкана Пинатубо. Максимумы рассредоточены и имеют цикличный характер.

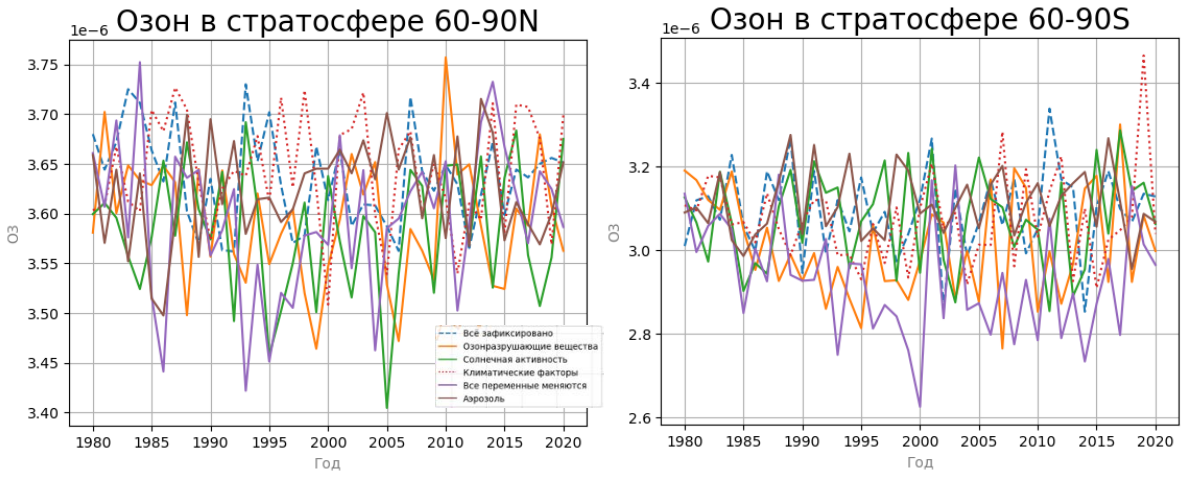

Рисунок 10. Озон в стратосфере в полярных широтах северного (слева) и южного (справа) полушарий

Стратосферный озон в полярных широтах представлен на рисунке 11. В северном полушарии мы видим отклик стратосферного аэрозоля при извержении вулкана в 1982 году. Также в северном полушарии наблюдается увеличение озона в сценарии с изменением ОРВ. В отличии от других широт, здесь невозможно четко сказать, что количество озона напрямую зависит от количества ОРВ. Озон при сценарии с климатическими факторами уменьшается, возможно, это обусловлено наличием большого количества льда и океана. Озон из сценария с солнечной активности также имеет цикличный вид. В южном полушарии амплитуда колебаний меньше, чем в северном. При этом минимум в содержании стратосферного аэрозоля наблюдается в 2000 году. В сценарии с аэрозолем нет влияния извержений вулкана. Озон в сценарии с солнечной активностью меняется равномерно, нет четкой 11-летней цикличности. В целом, на протяжении 40 лет количество стратосферного озона держится на одном уровне с периодическими локальными минимумами, обусловленными влиянием всех факторов одновременно.

Помимо озона была проанализирована температура воздуха для тропосферы и стратосферы в низких, средних и высоких широтах и зональный ветер на широте 65 градусов. На рисунке 12 представлено распределение температуры воздуха в тропосфере средних широт для северного и южного полушарий.

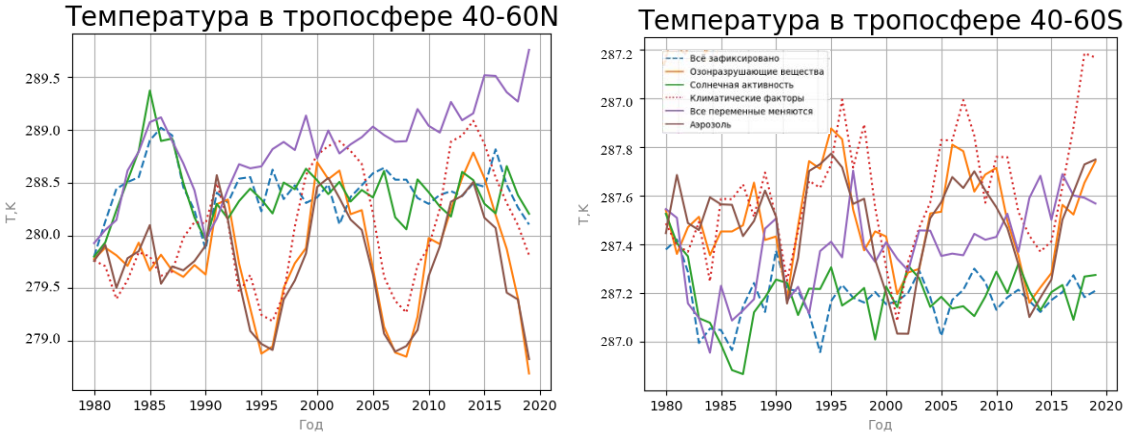

Рисунок 11. Температура воздуха в тропосфере в средних широтах северного (слева) и южного (справа) полушарий

Температура в средних широтах северного полушария растет. Температура в сценариях с ОРВ и климатическими факторами имеет цикличный характер и повторяет 11-летний солнечный цикл. Однако, в отличии от солнечной активности, амплитуда их колебаний растет со временем после 1990 года. Максимум температуры воздуха в северном полушарии наблюдается в 1985 году. В южном полушарии температура в тропосфере ниже на 1 градус. Сценарии с ОРВ и климатическими факторами повторяют свой ход, как в южном полушарии, но действуют со сдвигом по фазе на 1-2 года. Температура полного сценария в тропосфере средних широт южного полушария растет. В то время, как в северном полушарии локальный максимум соответствовал 1985 году, в южном полушарии наблюдалось минимальное значение.

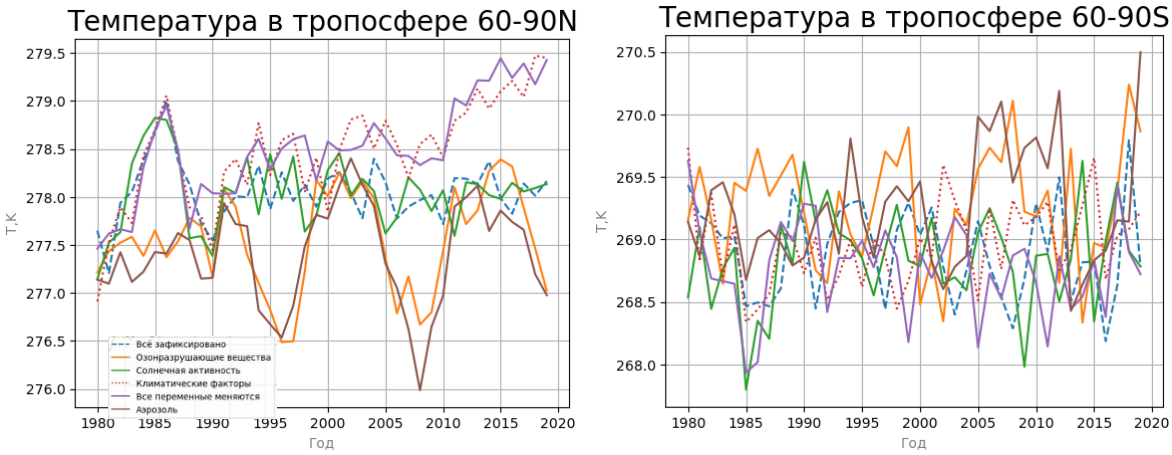

Рисунок 12. Температура воздуха в тропосфере в полярных широтах северного (слева) и южного (справа) полушарий

На рисунке 13 (слева) представлено распределение температуры воздуха в полярных широтах северного полушария. Здесь мы наблюдаем картину,

похожую на поведение температуры в средних широтах, но ниже на 20 градусов. На рисунке 13 (справа) сценарий с ОРВ имеет цикличность с максимумом в 2007 году. В целом, температура с держится на одном уровне с минимумом в 1985 году. Наибольшая температура в сценариях с ОРВ. Пик влияния климатических факторов на температуру наблюдается в 1994 году.

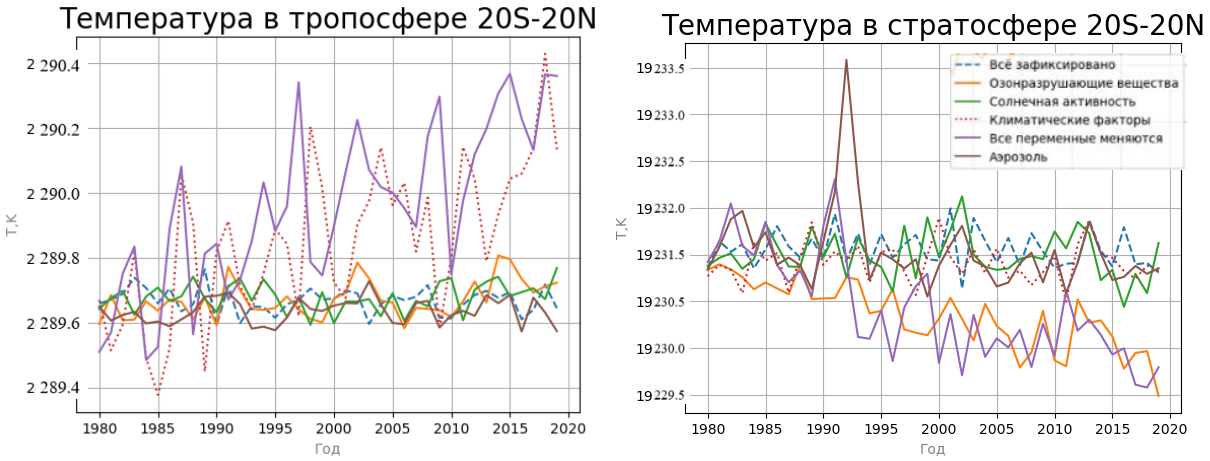

Рисунок 13.Температура воздуха в тропических широтах в тропосфере (слева) и стратосфере (справа)

Анализируя поведение температуры в тропосфере и стратосфере, главным отличием будет рост температуры в тропосфере и понижение температуры в стратосфере. В тропосфере наибольший вклад в рост температуры вносят климатические факторы. Все остальные показатели находятся на одном уровне с контрольным запуском, где все влияющие факторы зафиксированы. В стратосфере наблюдается снижение температуры с максимумами в годы извержения вулканов, что объясняется большим количеством аэрозоля в стратосфере. В стратосфере наибольший вклад вносят ОРВ. Климатические факторы практически не вносят никакого вклада, поскольку температура данного сценария соответствует температуре контрольного запуска.

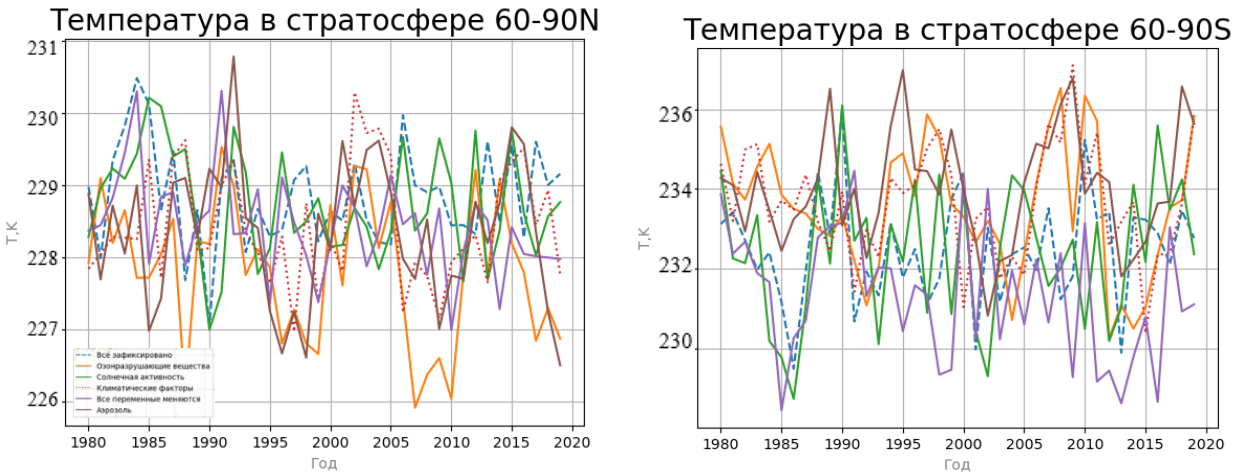

Рисунок 14. Температура воздуха в стратосфере в полярных широтах северного (слева) и южного (справа) полушарий

Анализ рисунка 15 показал, что в северном полушарии температура стратосферы понижается сильнее, чем в южном. Также в южном полушарии наблюдается минимум температуры по 3 сценариям в 1985 году, где максимальный вклад вносит солнечная активность. В северном полушарии климатические факторы завышают температуру в 2002-2003 годах, а в южном этот пик доходит в 2008-2009 году.

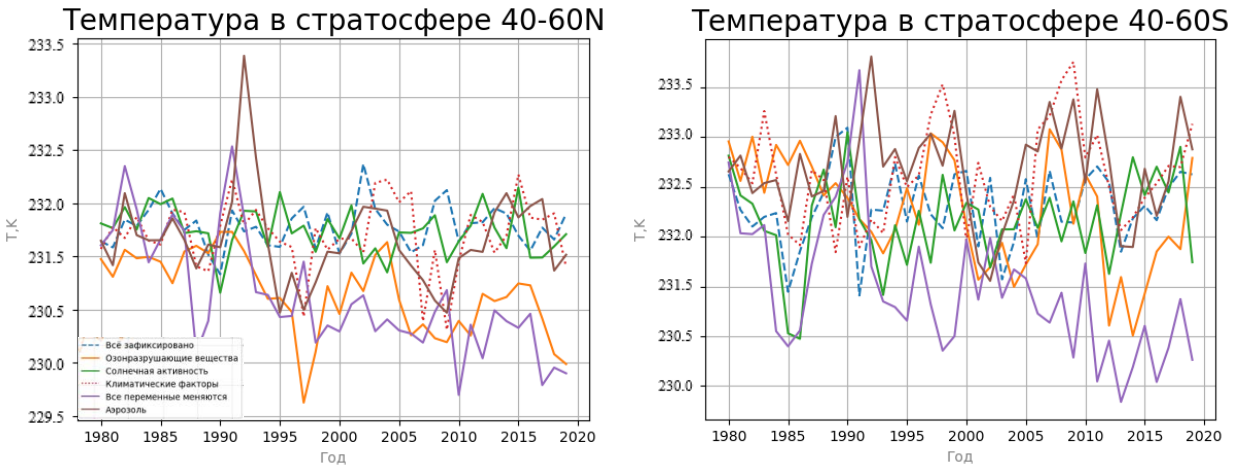

Рисунок 15. Температура воздуха в стратосфере средних широт северного (слева) и южного (справа) полушарий

На рисунке 16 представлены изменения стратосферной температуры в

средних широтах. Температура в обоих полушариях имеет тенденцию на уменьшение. Максимум в обоих полушариях достигается в 1991 году. В северном полушарии максимальный вклад вносит содержание ОРВ. В южном полушарии более весомый вклад солнечной активности в стратосферную температуру. Климатические факторы имеют ярко выраженную цикличность и действуют в разных фазах в южном и северном полушариях. В обоих случаях результат температуры при контрольном запуске, где зафиксированы все влияющие факторы имеет относительно ровный ход на одинаковом уровне.

Анализ влияния влияющих факторов на температуру воздуха подтвердил, что температура и озон взаимосвязаны. Температура в тропосфере растет, как и содержание тропосферного озона. Это является неблагоприятным явлением, поскольку озон в тропосфере является плохим газом для здоровья человека. Температура в стратосфере уменьшается, а количество стратосферного озона относительно не изменяется. Это говорит о сложности процессов, происходящих в атмосфере. С одной стороны, уменьшение температуры стратосферы приводит к уменьшению скоростей гетерогенных реакций, разрушающих озон, а с другой стороны – приводит к образованию полярных стратосферных облаков. Вероятно, это стабилизирует озон на одном уровне на протяжении 40 лет.

Влияния температуры не до конца объясняет поведение озона в атмосфере, здесь важную роль также влияет динамика атмосферы. Для этого был рассмотрен зональный ветер на широте 65 градусов. Величина зонального ветра также влияет на количество озона, поскольку от его величины зависит устойчивость полярного вихря. На рисунке 17 представлен зональный ветер в стратосфере на 65 градусах северного (слева) и южного (справа) полушарий.

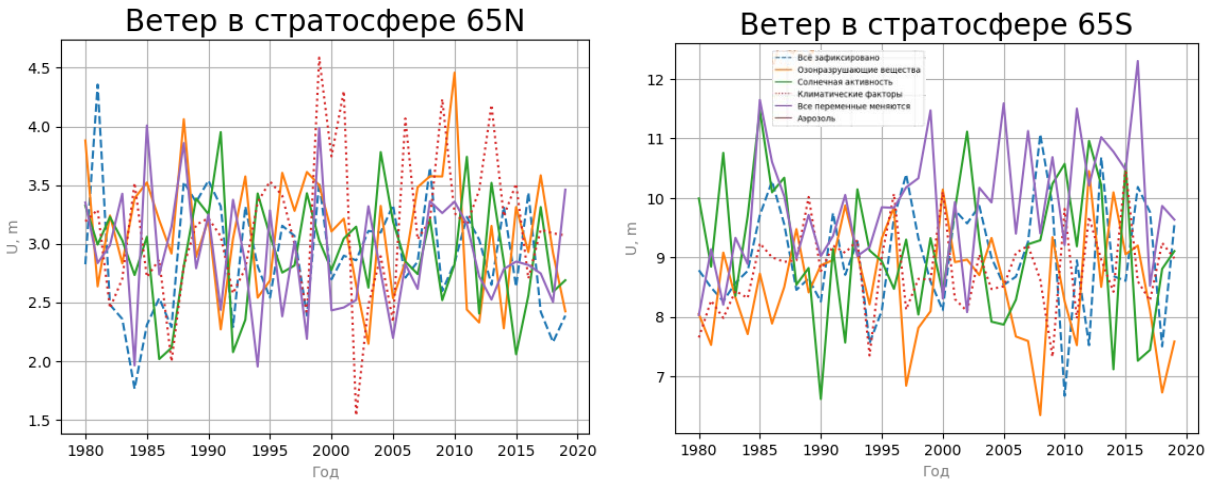

Рисунок 16. Зональный ветер в стратосфере на 65 градусах северного (слева) и южного (справа) полушарий

Ветер в южном полушарии имеет большие значения, чем в южном. Это говорит о том, что в южном полушарии наблюдался более устойчивый полярный вихрь. К наибольшему ослаблению зонального ветра в северном полушарии приводит сценарий с климатическими факторами. Наиболее устойчивый ветер наблюдался в 1997-1998 года, а наименее устойчивый в 2002 году. Наиболее устойчивый ветер наблюдается при сценарии с ОРВ. В южном полушарии, наоборот, сценарий с ОРВ дает наименее устойчивый полярный вихрь, относительно других сценариев. Максимально устойчивый ветер наблюдался в 2016 году, а также в 1985 году, максимум полного сценария совпадает с максимумом зонального ветра сценария с солнечной активностью.

Заключение

Исследование вариаций параметров озонового слоя и поиски основных причин этих изменений до настоящего времени остаются проблемой, актуальность которой определяется существенной ролью озона в сложной системе «Солнце – атмосфера – поверхность Земли – космос». Поглощая ИК-излучение Земли в полосе 9,57 мкм, озон вносит вклад в изменение температуры нижней атмосферы, а поглощая УФ-излучение Солнца в диапазоне 200-320 нм, влияет на температурную стратификацию стратосферы.

В результате работы произведена оценка относительного вклада основных химических и физических процессов в наблюдаемую изменчивость климата и газового состава атмосферы в полярных регионах с использованием химико-климатической модели (ХКМ) SOCOLv3 в 1980-2020 годах.

В результате работы были получены следующие выводы:

1. Изменения климата помимо потепления в тропосфере приводят к охлаждению стратосферы, что влияет на скорости химических реакций, горизонтальный и вертикальный перенос атмосферных газов, волновые процессы, устойчивость полярного вихря и формирование полярных стратосферных облаков;
2. Изменения горизонтального переноса приводит к усилению циркуляции Брюера-Добсона, что вызывает уменьшение содержания озона в тропических широтах, несмотря на уменьшение содержания озоноразрушающих веществ, а также к увеличению содержания озона в средних и полярных районах;
3. Климатические факторы увеличивают температуру в стратосфере и приводят к увеличению общего содержания озона.
4. Озонразрушающие вещества приводят к уменьшению содержания озона в атмосфере и уменьшению температуры в стратосфере.
5. Стратосферный аэрозоль вносит наибольший вклад в тропических и средних широтах, в то время как в полярных широтах его влияние не прослеживается.

6. В Антарктике более устойчивый полярный вихрь и большую роль играют озонразрушающие вещества.

7. В стратосфере Арктики более значительные межгодовые колебания по сравнению с Антарктикой по причине менее устойчивого полярного вихря, поэтому в отдельные годы температура понижается ниже порога температуры формирования полярных стратосферных облаков, гетерогенные реакции на поверхности которых приводят к разрушению озона.

Список литературы

1. Алоян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере – Мю: ИВМ РАНб 2002ю – 201 с.
2. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. С-Петербург: Гидроме-теоиздат, 1992. 288 с
3. Алексеев Г.В. 2003. Исследования изменений климата Арктики в XX столетии. Тр. ААНИИ., т.446, с. 6-21.
4. Борисенков Е.П., Кондратьев К.Я. Круговорот углерода и кли-мат. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 319с.
5. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гид-рометеоиздат, 1987. 416 с.
6. Груздев А.Н., Брассёр Г.П. Воздействие 11-летнего цикла солнечной активности на характеристики годового хода общего содержания озона // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 43. № 3, 2007
7. Гущина Д.Ю. «Модификация Эль-ниньо в условиях меняющегося климата: мониторинг, причины, удаленный отклик», Москва, 2014 – 50с.
8. Гущина Д.Ю., Петросянц М.А., Семенов Е.К. Эмпирическая модель циркуляции тропической тропосферы в период явления Эль-Ниньо – Южное колебание. I. Методика построения эмпирической модели // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 15-26.
9. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 192 с.
10. Хайруллина Г.Р., Астафьева Н.М., Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдения и механизмы формирования.
11. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. - Л.: Гидрометеоиз-дат, 1973. - 296 с.
12. Andreae, M.O., and P. Merlet, Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. Glob Biogeochem Cycles: 15, 955, 2001.

13. Brasseur, G.P., R.A. Cox, D. Hauglustaine, I. Isaksen, J. Lelieveld, D.H. Lister, R. Sausen, U. Schumann, A. Wahner, and P. Wiesen, European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. Atmos Env: 32, 2327, 1998.

14. Crutzen, P.J., The influence of nitrogen oxide on the atmospheric ozone content. Quart J Roy Met Soc: 96, 320, 1970

15. Crutzen, P.J., Estimates of possible variations in total ozone due to natural causes and human activity. Ambio: 3, 201, 1974.

16. Crutzen, P.J., L.E. Heidt, J.P. Krasnec, W.H. Pollock, and W. Seiler, Biomass burning as a source of the atmospheric gases CO, H2, N2O, NO, CH3Cl, and COS. Nature: 282, 253, 1979.

17. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Aviation and the Global Atmosphere. J. Penner et al. (eds.), Cambridge University Press, 1999.

18. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climatic Change 2001: The scientific basis. J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van de Linden, X. Da, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.), Cambridge University Press, 2001.

19. Johnston, H.S., Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust. Science: 173, 517, 1971.

20. Kandel, R.S., Earth and Cosmos. Pergamon Press, 1980.

21. Kasting, J.F., Earth’s early atmosphere. Science: 259, 920, 1993.

22. Lovelock, J.E., and L. Margulis, Atmospheric homeostatis by and for the atmosphere: The gaia hypothesis. Tellus: 26, 2, 1974.

23. McElroy, M.B., J.W. Elkins, S.C. Wofsy, and Y.L. Yung, Sources and sinks for atmospheric N2O. Rev Geophys Space Phys: 14, 143, 1976.

24. Miller, S.L., A production of amino acids under possible primitive earth conditions. Science: 117, 528, 1953.

25. Miller, S.L., and H.C. Urey, Organic compound synthesis on the primitive earth. Science: 130, 245, 1959.

26. Molina, M.J., and F.S. Rowland, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone. Nature: 249, 810, 1974.

27. Moulton, F.R., On the evolution of the solar system. Astrophys J: 22, 165, 1905.

28. Sagan, C., Ultraviolet selection pressure on the earliest organisms. J Theo Bio: 39, 195, 1973.

29. Stolarski, R.S., and R.J. Cicerone, Stratospheric chlorine: A possible sink for ozone. Can J Chem: 52, 1610, 1974.

30. Vitousek, P.M., Beyond global warming: Ecology and global change. Ecology: 75, 1861, 1994.

31. Walker, J.C.G., Evolution of the Atmosphere. McMillan Pub., 1977.

32. Wofsy, S.C., M.B. McElroy, and Y.L. Yung, The chemistry of atmospheric bromine. Geophys Res Lett: 2, 215, 1975