



Научный совет РАН по проблемам климата Земли
Отделение наук о Земле РАН
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования

Под редакцией
академика РАН И.И. Мохова,
члена-корреспондента РАН А.А. Макоско,
к.ф.-м.н. А.В. Чернокульского

МОСКВА
2024

ИЗМЕНЕНИЯ СТРАТОСФЕРЫ АРКТИКИ В XXI ВЕКЕ В РАСЧЕТАХ МОДЕЛИ SOCOL4

П.Н. Варгин^{1,2*}, С.В. Кострыкин^{3,4}, А.В. Коваль^{5,6}, Е.В. Розанов^{7,8},
Т.Е. Егорова⁸, С.П. Смышляев⁶

¹Центральная аэрологическая обсерватория, Московская область

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

⁴Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Изразля, Москва

⁵Кафедра физики атмосферы Физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург

⁶Кафедра метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического факультета, Санкт-Петербург

⁷Лаборатория озонового слоя и исследований верхней атмосферы Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург

⁸*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC), Davos, Switzerland*

**p_vargin@mail.ru*

Аннотация. Исследованы изменения динамических процессов стратосферы Арктики, влияющих на озоновый слой, по результатам расчетов химико-климатической модели SOCOLv4 с 2015 г. по 2100 г. по умеренному и жесткому сценариям роста парниковых газов (SSP2-4.5 и SSP5-8.5). Сравнение периодов 2080 - 2099 гг. и 2015 - 2034 гг. для марта показывает снижение температуры стратосферы на 5° - 10° и увеличение содержания водяного пара на 5% - 20%. Во 2-й половине XXI века выявлено 8 эпизодов с отрицательными аномалиями общего содержания озона (OCO) до ~80 е.Д., что сравнимо с мартом 2011 г., но меньше, чем в марте 2020 г., когда в Арктике разрушение озона было максимальным. Выявлено усиление изолированности полярного вихря и рост объемов воздушных масс, с температурами достаточными для формирования полярных стратосферных облаков 1-го типа (NAT) в марте, что свидетельствует об усилении вихря весной к концу XXI века. В полярной нижней стратосфере при жестком сценарии выявлено увеличение концентраций жидких частиц водяного пара, серной и азотной кислоты (STS, H₂SO₄-H₂O-HNO₃), важных для активации озоно-разрушающих соединений. Выявленный по обоим сценариям значимый положительный тренд минимальных значений OCO в марте свидетельствует в целом об увеличении содержания озона к концу XXI века. Проанализирована изменчивость среднезональной и остаточной меридиональной циркуляции, волновой активности.

Ключевые слова: изменение климата, озон, стратосферный полярный вихрь, остаточная меридиональная циркуляция, SOCOLv4.

Введение

Наблюдаемое и прогнозируемое увеличение концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере приводит к потеплению в тропосфере и похолоданию в стратосфере, что влияет на ее циркуляцию и химический состав, ускоряя восстановление концентрации озона к уровням, существовавшим до 1980 г. (WMO 2022; Baldwin et al., 2019). Несмотря на принятые и запланированные большинством стран меры по сокращению выбросов ПГ в рамках Киотского протокола и Парижского соглашения, рост концентраций ПГ, несомненно, продолжится в XXI веке.

Охлаждение стратосферы способствует увеличению концентрации озона выше 10 гПа, что обусловлено снижением галогенной нагрузки за счет реализации Монреальского протокола и его поправок из-за замедления температурно-зависимых циклов каталитического разрушения озона (Zubov et al., 2013; WMO 2022). Увеличение содержания других парниковых газов, таких как метан CH_4 , дополнительно способствует восстановлению озонового слоя в верхних слоях стратосферы посредством реакции $\text{CH}_4 + \text{Cl} \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CHCl}$. Однако увеличение содержания оксида азота N_2O может усилить потерю озона за счет каталитических реакций с участием NO_x (Revell et al., 2012). Предполагается, что N_2O будет самым важным антропогенным соединением, препятствующим восстановлению озонового слоя на протяжении XXI века (Wang et al., 2014).

Хотя увеличение содержания озона в верхней стратосфере уже наблюдается и, вероятно, продолжится в ближайшие десятилетия, тенденции к восстановлению озонового слоя в нижней стратосфере менее очевидны. Например, выявлена статистически устойчивая отрицательная тенденция для озонового слоя между уровнями давления 146 гПа и 32 гПа в почти глобальном масштабе (55° ю.ш.– 55° с.ш.) (Ball et al., 2018). Среди возможных причин, которые могут способствовать уменьшению содержания озона в нижней стратосфере: изменение относительной силы нижней и верхней ветвей меридиональной циркуляции Брюера-Добсона (ЦБД) (Keeble et al., 2017); недавнее снижение солнечной активности (Arsenovic et al., 2018); влияние галогенсодержащих короткоживущих частиц и других газов, не учтенных Монреальским протоколом (Oram et al., 2017); увеличение выбросов неорганического йода (Karagodin-Doyennel et al., 2021) и аэрозольной нагрузки (Andersson et al., 2015); спонтанное увеличение выбросов трихлорфторметана (ХФУ-11), нарушающее Монреальский протокол (Fleming et al., 2020); изменения высоты внетропической тропопаузы.

Анализ 20 климатических моделей проекта CMIP6, включая 4 модели с интерактивной химией, показал, что охлаждение нижней внетропической стратосферы, связанное с выбросами парниковых газов, может способствовать усилению стратосферного полярного вихря и, следовательно, истощению озона в арктической стратосфере, особенно при жестком сценарии роста концентраций парниковых газов в XXI веке (SSP5.8-5) (von der Gathen et al., 2021). Этот вывод подтвержден анализом результатов моделирования ИВМ CM5 (Vargin et al., 2022). Предполагается, что после 2050-х гг. динамические условия в стратосфе-

ре Арктики в некоторые зимы могут быть благоприятными для значительного разрушения озона в конце зимнего сезона, несмотря на продолжение снижения содержания озоноразрушающих соединений (ОРС) из-за реализации Монреальского протокола (von der Gathen et al., 2021).

Многочисленные эксперименты химико-климатических моделей (ХКМ) показывают, что ожидаемое восстановление озона в конце зимы будет зависеть не только от уменьшения содержания ОРС, но также из-за возможного сдвига стратосферного полярного вихря, приводящего к отрицательным аномалиям общего содержания озона над Северной Евразией и положительным над Северной Америкой. Уменьшение ледового покрова Арктики, по-видимому, способствовало устойчивому смещению полярного вихря в последние 30 лет в конце зимы в сторону Евразии (Zhang et al., 2018). Поэтому восстановление озона в конце зимы в некоторых внетропических регионах Северного полушария может происходить с задержкой.

Согласно модельным расчетам, увеличение концентрации ПГ будет сопровождаться ускорением ЦБД и усилением переноса атмосферных примесей. Модельные расчеты демонстрируют до конца XXI века увеличение восходящих движений в тропиках в верхней стратосфере на ~1% за десятилетие, а в нижней стратосфере – до ~2% за десятилетие, в результате средний возраст стратосферного воздуха уменьшится до 60 и 30 дней за десятилетие (Oberländer et al., 2013). Однако между модельными оценками и данными ассимиляции наблюдениями сохраняются значительные различия.

В настоящей работе исследуются изменения динамики стратосферы Арктики, связанных с состоянием стратосферного озона в течение XXI века с использованием модели климатической системы Земли SOCOLv4 (SOlar Climate Ozone Links, версия 4, далее - SOCOLv4), включающей интерактивную химию, важную для моделирования температуры, озона и динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы (Rieder et al., 2019; Haase and Matthes, 2019; Friedel et al., 2022).

ХКМ SOCOL4, эксперименты и методы анализа

Химико-климатическая модель (ХКМ) SOCOLv4 разработана на основе Модели земной системы Института метеорологии им. Макса-Планка (MPI-ESM1.2) и интерактивно связана с химическим блоком MEZON, модулями микрофизики, океана и биохимии океана (Sukhodolov et al., 2021).

ХКМ SOCOLv4 - спектральная модель с горизонтальной сеткой T63 (соответствующей разрешению по долготе - широте $\sim 1.9^\circ \times 1.9^\circ$) и 47 вертикальными уровнями от поверхности до 0,01 гПа (~ 80 км). Шаг по времени - 15 минут для динамических и физических процессов и 2 часа для радиационных и химических. ХКМ SOCOLv4 моделирует ~ 100 химических составляющих, участвующих в 216 газовых реакциях, 72 реакциях фотолиза и 16 гетерогенных реакциях на поверхности или внутри частиц сульфатных аэрозолей и полярных стратосферных облаков.

Анализировались два эксперимента для периода с 2015 г. по 2099 г. по умеренному (SSP2-4.5) и жесткому (SSP5-8.5) сценариям роста концентраций парниковых газов проекта CMIP6. По сценарию SSP2-4.5 к концу XXI века концентрация CO_2 увеличится до ~ 600 ppm, а радиационное воздействие на $\sim 4.5 \text{ W/m}^2$ по сравнению с доиндустриальным периодом (до 1750 г.). По сценарию SSP5-8.5 радиационное воздействие увеличится на $\sim 8.5 \text{ W/m}^2$, а концентрация CO_2 вырастет в 4 раза до ~ 1135 ppm. Глобальная температура поверхности вырастет на $\sim 3^\circ\text{C}$ и $\sim 5^\circ\text{C}$ к 2100 г. по этим сценариям соответственно. Каждый эксперимент состоял из 3-х ансамблевых расчетов с слегка меняющимися начальными условиями: $\sim 0.1\%$ возмущения концентрации CO_2 в первый месяц (Karagodin-Doyennel et al., 2023).

Полярные стратосферные облака (ПСО) играют важнейшую роль в разрушении озона поздней зимой и весной. ПСО состоят из переохлажденного раствора трех соединений $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--HNO}_3\text{--H}_2\text{O}$ (supercooled ternary solutions — STS) и кристаллического тригидрата азотной кислоты ($\text{HNO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (ПСО I типа - NAT) и ледяных кристаллов (ПСО II типа). ПСО I типа формируются при температуре ниже -78°C , II типа — ниже -85°C . ПСО обеспечивают поверхность для перехода нейтральных соединений HCl , HBr , ClONO_2 в Cl_2 , BrCl , и ClNO_2 . После проникновения солнечной радиации в полярную стратосферу эти соединения переходят в активные формы, что приводит к разрушению озонового слоя в каталитических циклах (Solomon et al., 1986).

Твердые частицы NAT ПСО также ответственны за денитрификацию - оседание активного азота из стратосферы, что приводит к разрушению озона, препятствуя формированию неактивных резервуарных соединений. Поэтому хорошее воспроизведение ПСО является необходимым для ХКМ, учитывающих кратко- и долгосрочную изменчивость озонового слоя и её связь с динамическими процессами.

Параметры ПСО в расчетах ХКМ SOCOLv3, согласуются с выявленными в спутниковых и наземных наблюдениях (Steiner et al., 2021), что позволяет оценивать изменения ПСО в XXI веке в расчетах SOCOLv4, имеющей ту же схему расчета параметров ПСО, что и SOCOLv3.

Расчеты ХКМ SOCOLv4 для последних десятилетий показывают небольшой значимый отрицательный тренд озонового слоя в низких широтах в нижней стратосфере, что согласуется в целом с результатами анализа спутниковых наблюдений (Karagodin-Doyennel et al., 2022).

Анализируемые в настоящей работе расчеты ХКМ SOCOLv4 ранее использовались для исследования эволюции озонового слоя в течение XXI (Karagodin-Doyennel et al., 2023).

Результаты показали вероятное увеличение содержания озона в мезосфере, верхней и средней стратосфере и в нижней стратосфере высоких широт. При сценарии SSP5-8.5 увеличение озона сильнее из-за более сильного снижения температуры стратосферы, замедляющего каталитические циклы разрушения озона. По обоим сценариям в нижней тропической стратосфере содержание озо-

на снижается и увеличивается в средних и высоких широтах обоих полушария из-за усиления меридионального переноса.

В настоящем исследовании анализируются рассчитанные ХКМ SOCOLv4 среднемесячные значения температуры, зонального и меридионального ветра, геопотенциальной высоты, поверхностной плотности (SAD) твердых частиц тригидрата азотной кислоты (NAT) и жидких капель (STS) ПСО I типа, а также изменения концентраций HNO_3 , H_2O и O_3 .

Для анализа межгодовой изменчивости стратосферы Арктики с использованием результатов расчетов ХКМ SOCOLv4 рассчитывался объем воздушных масс с температурой ниже необходимой для формирования ПСО (далее V_{psc}) и объем стратосферного полярного вихря (V_{vortex}) по методике (Lawrence et al., 2018). Ранее таким же образом были получены оценки V_{psc} в расчетах модели ИВМ РАН CM5 для условий современного и будущего климата (Варгин и др., 2020; Vargin et al., 2022).

Используя трехмерные данные температуры, скорости ветра и геопотенциала, вычислялась потенциальная завихренность (PV) на изобарических поверхностях. Далее значения PV и температуры интерполировались на изэнтропические уровни, где вычислялся положение максимума градиента PV от эквивалентной широты, а соответствующее значение PV обозначало границу вихря. Эти значения осреднялись за январь - март и использовались для определения климатической границы полярного вихря. Температура формирования ПСО NAT (T_{nat}) рассчитывалась на уровнях давления, используя средние вертикальные профили H_2O и HNO_3 в области от 60° с.ш. до 90° с.ш. в течение зимнего сезона. Затем значения T_{nat} интерполировались на уровни потенциальной температуры и использовались для оценки границы области формирования ПСО. На каждом изэнтропическом уровне ячейка сетки относилась к области ПСО, если она находилась внутри области полярного вихря и внутри температурной изолинии $T = T_{nat}$. Объемы V_{psc} и V_{vortex} рассчитывались в диапазоне высот нижней стратосферы от уровня потенциальной температуры 390 К до 590 К (~ 120 hPa - ~ 30 hPa) по площади ПСО на каждом изэнтропическом уровне с учетом их толщины, суммируя с соответствующими весами.

Для анализа распространения потоков волновой активности в стратосфере рассчитывались: амплитуды планетарных волн с зональными числами 1-3, зональный меридиональный поток тепла, двумерные векторы Элиассена-Пальма (ЭП) и трехмерные векторы Пламба (Plumb 1985). Векторы Пламба по сравнению с векторами ЭП позволяют лучше оценить особенности динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы и распространения волновой активности (напр., Geçaité et al., 2021; Wei et al., 2021). Рассчитав дивергенцию векторов ЭП, оценивалось влияние распространения волновой активности на среднезональную циркуляцию стратосферы.

Для дальнейшего исследования динамических процессов оценивались изменения остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ), представляющей собой суперпозицию адвективного и индуцированного волнами вихревого движений. В ос-

нове расчета ОМЦ лежит преобразованный Эйлеров подход (Transformed Eulerian Mean, TEM, (напр., Andrews et al., 1984). Расчет меридиональной и вертикальных компонент ОМЦ (V^* и W^*) в настоящее время широко используется для анализа взаимодействия планетарных волн со средним потоком и оценки переноса долгоживущих примесей в меридиональном направлении. ОМЦ позволит оценить ту часть среднего потока, вклад которой в адиабатическое изменение температуры воздуха не компенсируется дивергенцией индуцированного волной потока тепла (Shepherd, 2007). Расчет ОМЦ осуществляется по методике (Koval et al., 2021).

Наше исследование сфокусировано на изменениях стратосферы в марте, когда химическое разрушение озонового слоя наибольшее из-за увеличивающегося зенитного угла Солнца и проникновения солнечной радиации в стратосферу Арктики после полярной ночи.

Значимость трендов, выявленных в результатах модельных расчетов, оценивалась с использованием теста Стьюдента с уровнем значимости 95%.

Результаты

Мы изучили некоторые динамические характеристики стратосферного полярного вихря (СПВ), в том числе - объем воздуха внутри него (V_{vortex}), объем воздуха внутри СПВ с температурой ниже порога формирования частиц ПСО NAT (V_{psc}), а также максимальный градиент нормированной потенциальной завихренности ($MPVG$), который связан с величиной динамического барьера, расположенного на границе СПВ. Критическая температура формирования ПСО NAT (T_{nat}) зависит от концентрации в воздухе молекул HNO_3 и H_2O (Hansen, Mauersberger, 1988). Поэтому сначала была исследована эволюцию концентраций этих химических компонентов в стратосфере Арктики (60° с.ш. - 90° с.ш.) в зимний период в течение XXI века.

По сценарию SSP2–4.5 средняя концентрация HNO_3 увеличивается на 1 ppm вблизи своего максимума в нижней стратосфере к концу XXI века. Концентрация водяного пара увеличивается на 0,2 ppm в верхней стратосфере и уменьшается на 0,4 ppm в нижней стратосфере. По сценарию SSP5–8.5 средняя концентрация HNO_3 не изменяется, а концентрация водяного пара увеличивается до 1–1,5 ppm в стратосфере к концу XXI века.

Если рассчитать критическую температуру формирования частиц ПСО NAT с использованием средних концентраций H_2O и HNO_3 за два периода времени, то она увеличивается на 0,5–1,1 K в сценарии SSP5–8.5, а для SSP2–4.5 увеличивается в нижней стратосфере до 0,5 K и уменьшается в средней стратосфере на 0,2 K (рис. 1а).

Увеличение V_{psc} в Арктике к концу XXI века выявлено в марте для всех модельных расчетов и среднего значения по ансамблю (рис. 2б-в). Положительный тренд значим только в сценарии SSP5–8.5.

Максимальное значение V_{psc} в марте за весь анализируемый период в умеренном сценарии составляет ~69 млн км³, при жестком сценарии ~62 млн км³.

Для сравнения, по данным реанализа MERRA-2 (Gelaro et al., 2017), V_{psc} в марте 2011 и 2020 гг., когда разрушение озона в Арктике стратосфере было наибольшим за весь период наблюдений: ~29,3 и ~37,6. млн км³ соответственно. Тем не менее, к концу XXI века общее содержание озона в Арктике увеличится из-за меньшей интенсивности источника разрушения озона из-за продолжающегося сокращения эмиссии ОРС в атмосферу. Предположительно, положительный эффект от уменьшения ОРС на разрушение озона превысит отрицательный эффект от ожидаемого увеличения объема ПСО за счет охлаждения стратосферы.

В табл. 1 представлены климатологические значения абсолютных V_{psc} и V_{vortex} в начале и конце XXI века. Можно сделать вывод, что к концу XXI века в среднем V_{psc} увеличиваются на ~160% и ~320% при умеренном и жестком сценариях. Не выявлено существенных изменений климатологических значений V_{vortex} . Эти выводы согласуются с результатами моделирования будущего климата в рамках проекта CMIP6 (von der Gathen et al., 2021; Варгин и др., 2022).

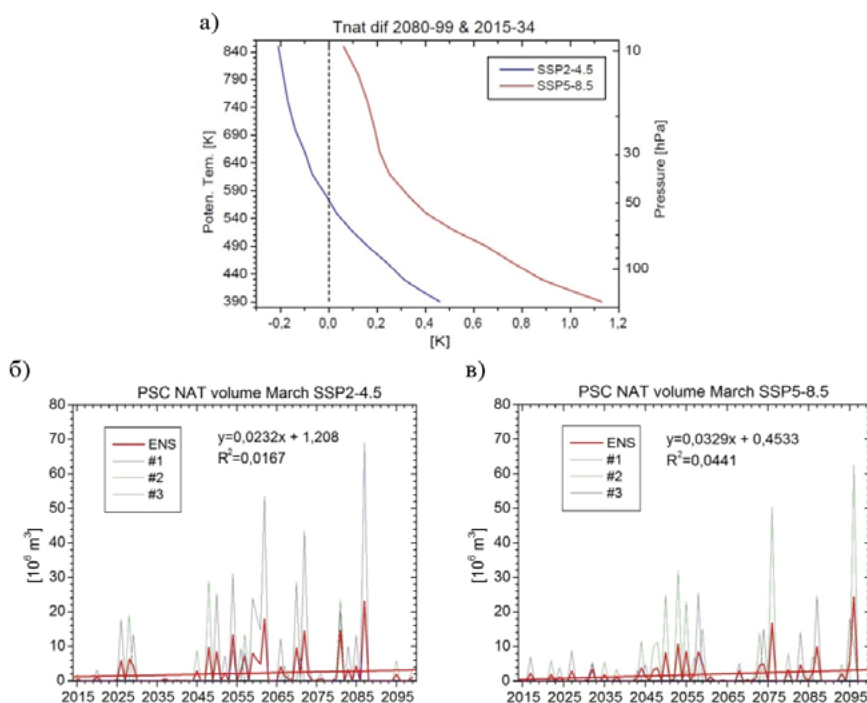


Рис. 1. Различия средних по 3 расчетам вертикальных профилей температуры формирования ПСО NAT (T_{nat}) в области 60° с.ш. - 90° с.ш. между периодами 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. для сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (а). Изменение «объема» ПСО (V_{psc}) в марте с 2015 г. по 2099 г. по сценариям SSP2-4.5 (а) и SSP5-8.5 (б). Красная прямая - линейный тренд, красная кривая - среднее по 3 расчетам значение

Различное поведение V_{vortex} и V_{psc} со временем можно объяснить, если предположить, что градиент PV увеличивается к концу XXI века, но положение его максимума существенно не меняется со временем. Следовательно, площадь

полярного вихря (и объем в нижней стратосфере) также не меняется. Но при этом температура воздуха внутри вихря снижается, что со временем может привести к росту V_{psc} .

Граница стратосферного полярного вихря зависит от положения максимума меридионального градиента скорости ветра. Анализ модельных данных показал, что максимальное увеличение $MPVG$ наблюдается вблизи изобарического уровня 550 К (~30 гПа / ~23 км) в конце XXI века в январе – феврале до $0,8 - 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1} \text{ град}^{-1}$ / $1,2 - 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1} \text{ град}^{-1}$ (~15% - 20%) при умеренном и в декабре - феврале при жестком сценарии соответственно (рис. 3 а, б).

Табл. 1. Увеличение среднего по 3 членам ансамбля относительного и абсолютного объема ПСО (V_{psc}) и объема стратосферного полярного вихря (V_{vortex}) в марте между периодами 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5

	$V_{psc}, 10^6 \text{ km}^3$		$V_{vortex}, 10^6 \text{ km}^3$	
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2015-2034	0,953	0,63	325	345
2080-2099	2,45	2,7	349	358
8099-1534 (%)	~163	~329	~7.4	~3.8

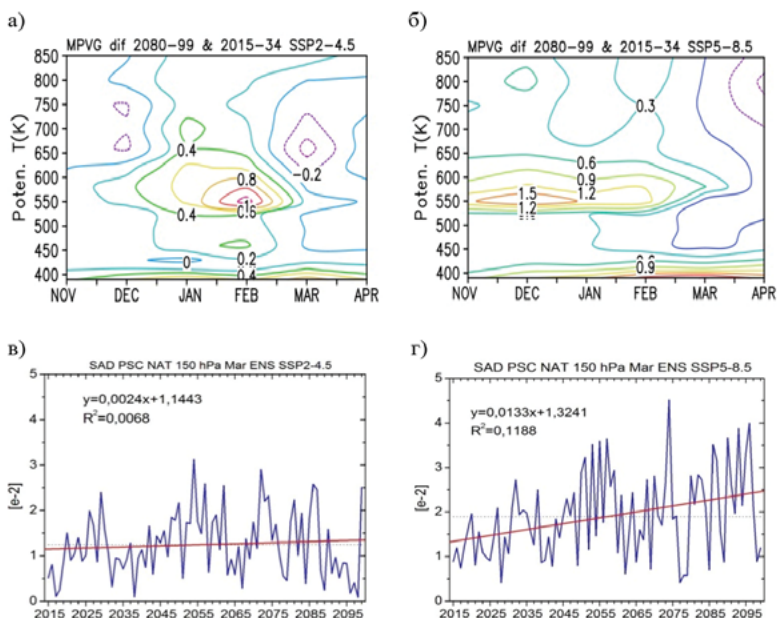


Рис. 2. Различия среднего по 3 расчетам максимального градиента PV ($10^{-6} \text{ с}^{-1} \text{ град}^{-1}$) с ноября по март между периодами 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. для сценариев SSP2-4.5 (а) и SSP5-8.5 (б). Изменение средней по 3 расчетам плотности поверхности (SAD) ПСО NAT в области $60^\circ \text{ с.ш.} - 90^\circ \text{ с.ш.}$ на уровне давления 150 гПа в марте с 2015 г. по 2099 г. по сценариям SSP2-4.5 (в) и SSP5-8.5 (г)

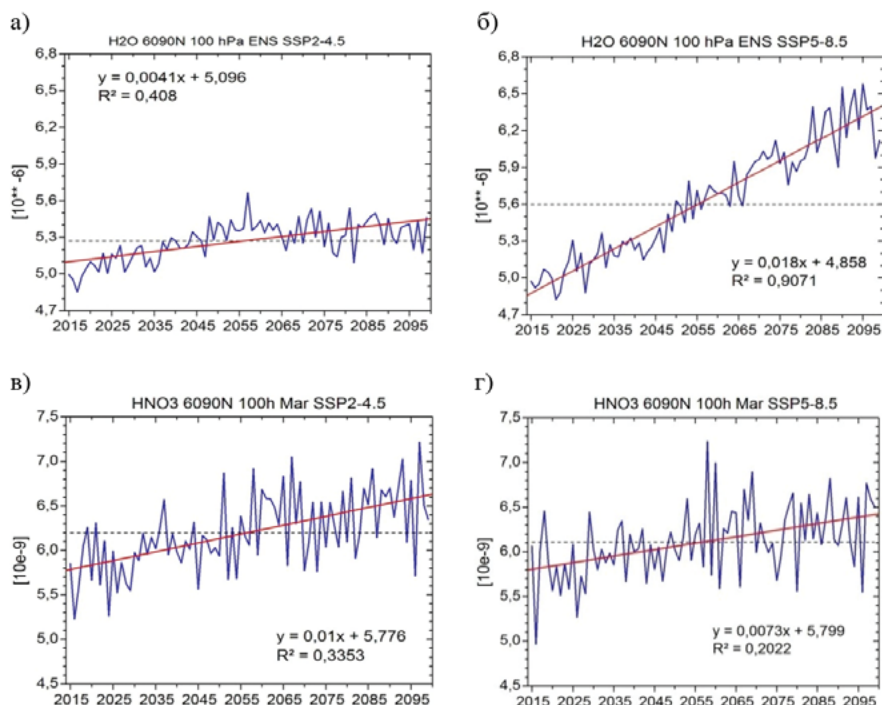


Рис. 3. Среднее по 3 расчетам изменение отношения смеси водяного пара в марте на 100 гПа в области 60°-90° с.ш. с 2015 г. по 2099 г. по сценарию SSP2-4.5 (а) и SSP5-8.5 (б). Аналогично для отношения смеси HNO₃ (в, г). Красная прямая - линейный тренд, пунктирная линия - среднее значение за весь период

Аналогичное усиление *MPVG* было получено при анализе модельных данных INMCM5 (Варгин и др., 2022). Известно, что усиление *MPVG* соответствует уменьшению эффективного коэффициента диффузии на границе полярного вихря и увеличению его изолированности (Kostykin, Schmitz, 2006). Следовательно, охлаждение арктической стратосферы приводит как к увеличению *V_{psc}*, так и к увеличению изолированности полярного вихря на протяжении всего XXI века.

Для проверки соответствия полученных расчетных оценок объема PCO NAT с параметрами, являющимися прогностическими в модели SOCOLv4, была проанализирована долговременная изменчивость поверхностной плотности (SAD) PCO NAT в нижней полярной стратосфере в XXI веке. Результаты показали, что выявленный положительный тренд SAD PCO NAT в области 60° с.ш. - 90° с.ш. на уровне давления 150 гПа в марте является незначимым в сценарии SSP2-4.5, но значимым в SSP5-8.5 (рис. 2), что согласуется с оценками тенденций рассчитанного *V_{psc}* (рис. 1б, в).

Увеличение влажности нижней стратосферы Арктики в марте на 10% и 20% ожидается по умеренному и жесткому сценариям (рис. 3 а, б). Большой рост влажности при жестком сценарии, вероятно, обусловлен её усиленным проникновением из тропосферы и формированием при окислении метана CH₄.

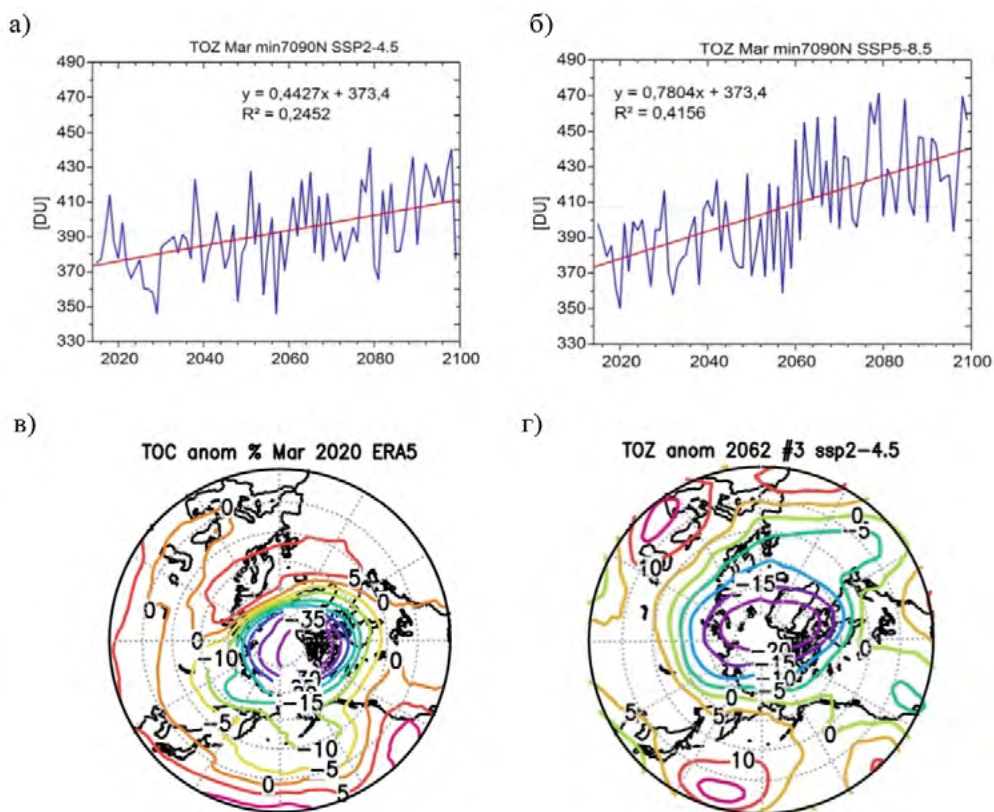


Рис. 4. Изменение средних по 3 расчетам минимальных значений ОЗО (е.Д.) в области 70° с.ш. - 90° с.ш. в марте с 2015 г. по 2099 г. по сценариям SSP2-4.5 (а) и SSP5.8-5 (б). Красная прямая - линейный тренд, пунктирная линия - среднее значение за весь период. Аномалии ОЗО (%) в данных наблюдений - март 2020 г. (в) и в модельных расчетах - март 2062 г. (3-й расчет) (г) по сценарию SSP2-4.5

По обоим сценариям выявлен значимый положительный тренд минимальных значений ОЗО в марте, что свидетельствует об увеличении содержания озона к концу XXI века в Арктике (рис. 4 а, б). Минимальные среднемесячные значения ОЗО в марте 2020 г. составляли 270 е.Д., аномалии до -150 е.Д. (~-35%) (рис. 4в), в то время как в модельных расчетах минимальные значения не опускались ниже 300 е.Д., а аномалии достигали -100 е.Д. (~20%). В качестве примера представлены аномалии ОЗО в марте 2062 г. из 3-го расчета по сценарию SSP2-4.5 (рис. 4г). В модельных расчетах выявлено 8 таких эпизодов с минимальными значениями ОЗО в марте. Эти эпизоды характеризуются значениями V_{psc} , значительно превосходящими средние климатические значения, что свидетельствует о формировании аномалий ОЗО из-за химического разрушения озона.

Были проанализированы изменения среднезональной температуры, зонального ветра и ОМЦ. Цветовая заливка на рисунке 5 (а, г) иллюстрирует широтно-высотные распределения температуры и зонального ветра из расчетов ХКМ

SOCOLv4 в марте, осредненные за 2015-2034 гг. Стрелки на рисунке 5а показывают компоненты ОМЦ, а серые контуры на рисунке 5г - дивергенцию потока ЭП. Приращения соответствующих величин между 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. представлены на центральной (SSP2-4,5) и правой (SSP5-8,5) панелях рисунка 5. При умеренном сценарии SSP2-4,5 прогнозируется похолодание в марте к концу XXI века от ~ 1 К в нижней стратосфере до ~ 3 К в верхней стратосфере и мезосфере (рис. 5б). Как и ожидалось, жесткий сценарий SSP5-8,5 приводит к более сильному снижению температуры от ~ 1 К в нижней стратосфере до ~ 10 К в верхней стратосфере (рис. 5в). При умеренном сценарии изменения температуры в арктической стратосфере сильнее, чем на средних широтах: до ~ 4 К, а при жестком сценарии изменения температуры в арктической стратосфере, наоборот, меньше. В целом наблюдается ожидаемое охлаждение стратосферы и мезосферы и потепление тропосферы (рис. 5б, в), что согласуется с результатами, например, (Steiner et al., 2021), (Butchart, 2022).

Помимо изменений температуры, наблюдается общее усиление компонент ОМЦ. Это видно по стрелкам приращений ОМЦ на рисунке 5б, которые в основном сонаправлены компонентам ОМЦ на рис. 5а. Однако имеются некоторые исключения. Наиболее сильные приращения наблюдаются в верхней стратосфере и мезосфере, а также в верхней тропосфере. Усиление ОМЦ гораздо сильнее при сценарии SSP5-8,5, когда изменения могут достигать 20% (рисунок 5в). Ускорение ОМЦ из-за увеличения выбросов ПГ неоднократно прогнозировалось большинством ХКМ (напр., Butchart et al., 2010). Существенную роль в изменении ОМЦ играет волновая активность: индуцированная волной вихревая составляющая ОМЦ напрямую связана с активностью планетарных волн (ПВ). Расчеты показывают, что ослабление вихревой составляющей ОМЦ вызывает ослабление нисходящей ветви ОМЦ в арктической стратосфере (10 гПа - 1 гПа) (рис. 5б), что, в свою очередь, вероятно, является основной причиной похолодания в этой области к концу XXI века для умеренного сценария. При жестком сценарии ослабление волновой активности наблюдается и в другой области: в нижней стратосфере (100 - 50 гПа) средних широт, где также наблюдается ослабление ОМЦ. Усиление ОМЦ к концу XXI века, особенно при жестком сценарии, существенно влияет на состав средней атмосферы, в частности, способствуя уменьшению возраста воздуха (напр., Waugh, 2009).

Изменения температуры стратосферы и ОМЦ приводят к усилению зонального ветра в высоких широтах нижней и средней стратосфере: до 1-2 м/с при умеренном и до 6 м/с при жестком сценарии (рис. 5д, е). Например, усиление меридиональной компоненты ОМЦ в стратосфере при обоих сценариях за счет силы Кориолиса соответствует ускорению зонального ветра в восточном направлении. Однако при умеренном сценарии вызванное ПВ ослабление вихревой компоненты ОМЦ в арктической стратосфере может также вызвать замедление зонального ветра между 5 и 100 гПа (рис. 5е).

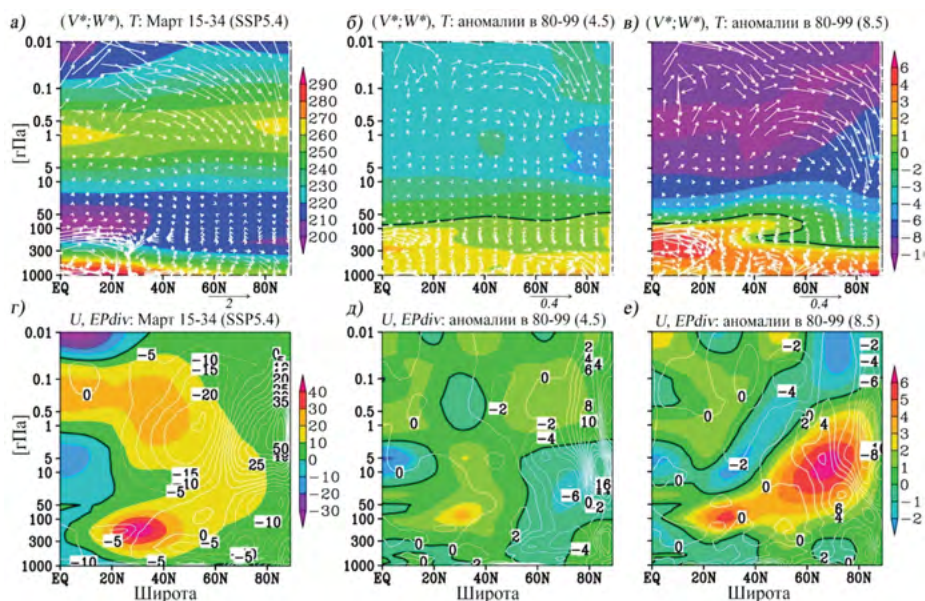


Рис. 5. Широтно-высотное распределение меридиональной V^* и вертикальной W^* компонент ОМЦ (м/с, вертикальная компонента, умноженная на 200) (стрелки) и средnezональной температуры (К) (заливка) в марте 2015-2034 гг. (а) и соответствующие изменения между периодами: 2080-2099 и 2015-2034 гг. в рамках сценариев SSP2-4.5 (б) и SSP5-8.5 (в). Зонально-осредненный зональный ветер (м/с) (заливка) и дивергенция потока ЭП ($m^2/c^2/s$) (контуры) за март 2015-2034 гг. (г); соответствующие изменения между периодами: 2080-2099 гг. и 2015-2034 гг. в рамках сценариев SSP2-4.5 (д) и SSP5-8.5 (е)

Как уже обсуждалось, кроме роста ПГ изменениям динамики стратосферы может способствовать изменение волновой активности. Для анализа этого была рассчитана дивергенция потока ЭП и ее приращения, показанные серыми контурами на рис. 5д, е. Основной причиной ослабления зонального ветра ниже 3-5 гПа при сценарии SSP2-4.5 является отрицательное приращение дивергенции потока ЭП, что соответствует передаче импульса от среднего потока к ПВ (рис. 5д). Аналогичный процесс наблюдается в стратосфере и мезосфере средних широт при SSP5-8.5 (рис. 5е). В полярной области, наоборот, происходит передача импульса среднему течению (положительное приращение дивергенции потока ЭП). Эта передача способствует ускорению зонального ветра. В обоих сценариях усиление субтропических струйных течений в нижней стратосфере (на ~ 2 м/с и ~ 4 м/с для SSP2-4.5 и SSP5-8.5 сценариев соответственно) объясняется усилением меридиональных градиентов температуры. Также усилению субтропической струи способствует перенос волновой энергии в сторону среднего течения (выраженный в дивергенции потока ЭП).

Связанное с ростом концентраций ПГ охлаждение стратосферы влияет на распространение волновой активности. При умеренном сценарии к концу XXI века в январе-феврале ожидается усиление распространения волновой активно-

сти, а также амплитуды волны с зональным числом 1 над высокими широтами с максимумом вблизи 5 гПа. При жестком сценарии для волны 1 ожидается небольшое усиление над средними широтами и ослабление над полярными.

Выводы

Полученные с использованием расчетов ХКМ SOCOLv4 результаты сравнения параметров стратосферы для конца и начала XXI века позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Охлаждение стратосферы к концу XXI века из-за роста концентраций парниковых газов ожидается в расчетах по обоим сценариям. При жестком сценарии похолодание стратосферы сильнее. Охлаждение стратосферы и усиление ОМЦ приведут к усилению среднезональной циркуляции на 1-2 м/с при умеренном и до ~6 м/с при сценарии SSP5-8.5.

2. Увеличение V_{psc} в марте ожидается по обоим сценариям (большее при жестком). Усиление меридионального градиента PV, выявленное в стратосфере Арктики в расчетах по обоим сценариям, соответствует уменьшению эффективной диффузии на границе вихря и приводит к усилению изолированности вихря. Эти изменения соответствуют усилению стратосферного полярного вихря к концу XXI века, что согласуется с результатами анализа расчетов более 20 климатических моделей проекта CMIP6, включая 4 ХКМ (von der Gathen et al., 2021) и расчетов климатической модели ИВМ РАН CM5 (Vargin et al., 2022).

3. Из-за формирования благоприятных динамических условий в отдельные зимние сезоны возможно значительное уменьшение озонового слоя в Арктике в марте с аномалиями ОСО до -80 е.Д. (~20%), что сравнимо с аномалиями марта 2011 г., но меньше наблюдавшихся в марте 2020 г. В расчетах SOCOLv4 по обоим сценариям выявлено 8 таких месяцев. Однако, в целом, выявленный по обоим сценариям значимый положительный тренд минимальных значений ОСО в марте свидетельствует об увеличении содержания озона к концу XXI века в Арктике.

Работа выполнена в Лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы Санкт-Петербургского государственного

Литература

1. Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и объема полярных стратосферных облаков в Арктике по данным моделирования и реанализа // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020, т. 56, № 5, С. 1–13. DOI: 10.31857/S0002351520050119.

2. Andersson S., Martinsson B., Vernier J.-P., et al. Significant radiative impact of volcanic aerosol in the lowermost stratosphere // Nature Commun., 2015, V. 6, 7692, <https://doi.org/10.1038/ncomms8692>.

3. Andrews D. G., McIntyre M. E. Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen–Palm relation and the mean zonal acceleration // *J. Atmos. Sci.*, 1976, Vol. 33, P. 2031–2048.
4. Baldwin M., Birner T., Brasseur G., et al. 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere // *Meteorol. Monogr.*, 2019, Vol. 59, 27.1–27.61. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHIS-D-19-0003.1>
5. Ball W., Alsing J., Mortlock D., et al. Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery // *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, Vol. 18, P. 1379–1394, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>.
6. Chipperfield M. Atmospheric science: Nitrous oxide delays ozone recovery // *Nat. Geosci.*, 2009, Vol. 2, P. 742–743, <https://doi.org/10.1038/ngeo678>.
7. Chipperfield M., Bekki S., Dhomse S., et al. Detecting recovery of the stratospheric ozone layer // *Nature*, 2017, Vol. 549, doi:10.1038/nature23681.
8. Fleming E., Newman P., Liang Q., Daniel J. The Impact of Continuing CFC-11 Emissions on Stratospheric Ozone // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2020, Vol. 125, e31849, <https://doi.org/10.1029/2019JD031849>.
9. Friedel M., Chiodo G., Stenke A., Domeisen D., Fueglistaler S., Anet J. Springtime arctic ozone depletion forces northern hemisphere climate anomalies // *Nat. Geosci.*, 2022, Vol. 15, P. 541–547. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00974-7>.
10. Gečaitė I. Climatology of Three-Dimensional Eliassen–PalmWave Activity Fluxes in the Northern Hemisphere Stratosphere from 1981 to 2020 // *Climate*, 2021, Vol. 9, 124. <https://doi.org/10.3390/cli9080124>.
11. Haase S., Matthes K. The importance of interactive chemistry for stratosphere–troposphere coupling // *Atmos. Chem. Phys.*, 2019, Vol. 19, P. 3417–3432.
12. Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., et al. Iodine chemistry in the chemistry–climate model SOCOL-AERv2-I // *Geosci. Model Dev.*, 2021, Vol. 14, P. 6623–6645, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6623-2021>
13. Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., et al. Iodine chemistry in the chemistry–climate model SOCOL-AERv2-I // *Geosci. Model Dev.*, 2021, Vol. 14, P. 6623–6645, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-6623-2021>.
14. Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., et al. The historical ozone trends simulated with the SOCOLv4 and their comparison with observations and reanalyses // *Atmos. Chem. Phys.*, 2022, Vol. 22, P. 15333–15350, <https://doi.org/10.5194/acp-22-15333-2022>.
15. Karagodin-Doyennel A., Rozanov E., Sukhodolov T., et al. The future ozone trends in changing climate simulated with SOCOLv4 // *EGUsphere*, 2023.
16. Keeble J., Hassler B., Banerjee A., et al. Evaluating stratospheric ozone and water vapour changes in CMIP6 models from 1850 to 2100 // *Atmos. Chem. Phys.*, 2021, Vol. 21, P. 5015–5061. <https://doi.org/10.5194/acp-21-5015-2021>.
17. Kostykin S.V., Schmitz G. Effective diffusivity in the middle atmosphere based on general circulation model winds // *J. Geophys. Res.*, 2006, V. 111, D02304.
18. Koval A., Chen W., Didenko K., Ermakova T., Gavrilov N., Pogoreltsev A., et al. Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events // *Ann. Geophys.*, 2021, Vol. 39, P. 357–368.

19. Lawrence Z., Manney G., Wargan, K. Reanalysis intercomparisons of stratospheric polar processing diagnostics // *Atmos. Chem. Phys.*, 2018, Vol. 18, P. 13547–13579. <https://doi.org/10.5194/acp-18-13547-2018>
20. Oberländer S., Langematz U., Meul S. Unraveling impact factors for future changes in the Brewer-Dobson circulation // *J. Geoph. Res. Atmos.*, 2013, Vol. 118, p. 10296–10312. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50775>.
21. Oram D., Ashfold M., Laube J., et al. A growing threat to the ozone layer from short-lived anthropogenic chlorocarbons // *Atmos. Chem. Phys.*, 2017, Vol. 17, P. 11929–11941, <https://doi.org/10.5194/acp-17-11929-2017>
22. Plumb R. On the Three-Dimensional Propagation of Stationary Waves // *J. Atmos. Sci.*, 1985, Vol. 42, P. 217–229.
23. Rieder H., Chiodo G., Fritzer J., et al. Is interactive ozone chemistry important to represent polar cap stratospheric temperature variability in Earth-System Models? // *Environ. Res. Lett.*, 2019, Vol. 14, 044026 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab07ff>
24. Shepherd T. G. Transport in the middle atmosphere // *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2007, Vol. 85B, P. 165—191.
25. Steiner M., Luo B., Peter T., et al. Evaluation of polar stratospheric clouds in the global chemistry–climate model SOCOLv3.1 by comparison with CALIPSO spaceborne lidar measurements // *Geosci. Model Dev.*, 2021, Vol. 14, P. 935–959.
26. Sukhodolov T., Egorova T., Stenke A., et al. Atmosphere–ocean–aerosol–chemistry–climate model SOCOLv4.0: description and evaluation // *Geosci. Model Dev.*, 2021, Vol. 14, P. 5525–5560. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5525-2021>
27. Vargin, P.N., Kostykin, S.V., Volodin, E.M., Pogoreltsev, A.I., Wei K. Arctic Stratosphere Circulation Changes in the 21st Century in Simulations of INM CM5 // *Atmosphere*, 2022, Vol. 13 (1), 25 <https://doi.org/10.3390/atmos13010025>
28. von der Gathen P., Kivi R., Wohltmann I., et al. Climate change favours large seasonal loss of Arctic ozone // *Nature Commun.*, 2021, Vol. 12, P. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24089-6>.
29. Wang W., Tian W., Dhomse S., et al. Stratospheric ozone depletion from future nitrous oxide increases // *Atmos. Chem. Phys.*, Vol. 14, P. 12967–12982.
30. Wei K., Ma J., Chen W., Vargin P. Longitudinal peculiarities of planetary waves-zonal flow interactions and their role in stratosphere-troposphere dynamical coupling // *Clim. Dyn.*, 2021, Vol. 57, P. 2843–2862. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05842-5>.
31. WMO. Executive Summary of Scientific Assessment of Ozone Depletion. 2022. WMO: Geneva, Switzerland. 2022.
32. Zhang J., Tian W., Xie F., et al. Stratospheric ozone loss over the Eurasian continent induced by the polar vortex shift // *Nature Commun.*, 2018, Vol. 9, 206. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02565-2>.
33. Zubov V., Rozanov E., Egorova T., et al. Role of external factors in the evolution of the ozone layer and stratospheric circulation in 21st century // *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, Vol. 13, P. 4697–4706, <https://doi.org/10.5194/acp-13-4697-2013>.