

УДК 551.510.534.3

Моделирование изменений климата и вариаций атмосферного озона с 1980 по 2020 г. с помощью химико-климатической модели SOCOLv3

М.А. Усачева^{✉1,2}, С.П. Смышляев^{1,2}, В.А. Зубов^{2,3}, Е.В. Розанов^{2,4*}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет

192007, г. Санкт-Петербург, Воронежская ул., 79

²Санкт-Петербургский государственный университет

199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

³Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

⁴Davos Physico-Meteorological Laboratory and the World Radiation Center PMOD/WRC

7260, Switzerland, Davos-Dorf, Dorfstrasse, 33

Поступила в редакцию 27.07.2023;

после доработки 11.10.2023;

принята к печати 12.10.2023

Для оценки относительного вклада основных химических и физических процессов в наблюдаемую изменчивость климата и газового состава атмосферы в 1980–2020-х гг. проведены численные эксперименты с химико-климатической моделью SOCOLv3. Исследовались следующие факторы, определяющие изменчивость основных климатических характеристик: изменение содержания озоноразрушающих субстанций; изменения концентраций парниковых газов, температуры поверхности океана и площади морского льда; вариации солнечной активности; изменение содержания атмосферного аэрозоля. Для оценки относительной роли данных факторов были проведены расчеты по сценариям с учетом каждого фактора по отдельности, а также базовый модельный эксперимент по сценарию, учитывающему все факторы одновременно. По результатам численных экспериментов выявлен относительный вклад разных факторов в изменения температуры тропосферы и нижней стратосферы, а также содержания озона с 1980 по 2020 г. Результаты модельных расчетов сопоставлялись с данными спутниковых измерений SBUV.

Ключевые слова: численное моделирование, стратосферный озон, озоноразрушающие вещества, изменения климата, Монреальский протокол, солнечная активность, стратосферный аэрозоль; numerical modeling, stratospheric ozone, ozone-depleting substance, climate change, Montreal Protocol, solar activity, stratospheric aerosol.

Введение

Исследование вариаций параметров озонового слоя и поиск основных причин этих изменений не теряют своей актуальности из-за существенной роли озона в сложной системе «Солнце – атмосфера – поверхность Земли – космос». Поглощая ИК-излучение Земли в полосе 9,6 мкм, озон вносит вклад в изменение температуры нижней атмосферы, а поглощая УФ-излучение Солнца в диапазоне 200–320 нм, защищает биосферу Земли и влияет на температурную стратификацию стратосферы.

В конце XX в. увеличение выбросов озоноразрушающих веществ (ОРВ) и аэрозоля привело к резкому уменьшению содержания озона в атмо-

сфере и создало угрозу жизни на Земле. Эта проблема была обнаружена в 1980-х гг. и привела в 1987 г. к подписанию Монреальского протокола – международного соглашения, которое запрещало производство ОРВ и их применение в промышленности и быту. Благодаря Монреальскому протоколу содержание ОРВ в атмосфере перестало расти и состояние озонового слоя стабилизировалось. Однако потепление глобального климата также оказывает существенное влияние на озоновый слой, что требует переосмысления роли Монреальского протокола в условиях наблюдаемых климатических изменений [1].

Соответствующие исследования показали, что глобальное потепление сопровождается охлаждением стратосферы, прежде всего в высоких широтах, что может вызвать дополнительное разрушение озона, особенно в полярных районах [2]. Обусловленное климатическими изменениями ускорение циркуляции Брюера–Добсона может привести к уменьшению

* Маргарита Александровна Усачева (usa4eva.m@mail.ru); Сергей Павлович Смышляев (smyshl@rshu.ru); Владимир Аркадьевич Зубов (v_zubov@rambler.ru); Евгений Владимирович Розанов (eugene.rozanov@pmodwrc.ch).

содержания тропического озона, в то время как в средних и высоких широтах его концентрация будет расти. Наконец, вероятные изменения солнечной активности, увеличение содержания стратосферного аэрозоля в результате крупных вулканических извержений и изменения температуры поверхности океана могут также повлиять на температуру, скорость химических реакций и перенос озона в атмосфере.

Наземные и космические наблюдения указывают на увеличение глобального содержания озона на 0,3% за последнее десятилетие [3]. Ожидается, что озоновая дыра в Антарктике постепенно закроется к 2065 г. (общее содержание озона (ОСО) в сентябре-октябре 2065 г. вернется к значениям 1980 г.) [4]. При этом в Арктике ОСО вернется к значениям 1980 г. немного раньше середины века (около 2045 г.). По результатам работы Оценочной комиссии Монреальского протокола, значительная потеря озона в Арктике будет происходить в зимне-весенние периоды, пока концентрации ОРВ существенно превышают естественный уровень их содержания в атмосфере. Изменения стратосферной динамики, связанные с увеличением выбросов парниковых газов, приводят к более раннему восстановлению арктического озона, увеличению содержания водяного пара в стратосфере и CO_2 . Охлаждение нижней стратосферы может увеличить количество полярных стратосферных облаков в условиях устойчивого полярного вихря, что приведет к уменьшению содержания озона [5].

Ранее был выполнен ряд модельных исследований роли различных факторов, влияющих на изменения содержания озона и температуры. В работе [6] исследовано формирование и распределение озона в нижней тропосфере с использованием численных моделей. Были рассмотрены выбросы от источников загрязнений, метеорологические условия, химические реакции и процессы переноса. Полученные результаты позволили лучше понять основные механизмы формирования тропосферного озона и определить ключевые факторы, влияющие на его содержание. В [7] с использованием численных моделей была исследована взаимосвязь изменений климата с уровнем содержания озона в атмосфере. Результаты расчетов показали, что изменение климата может существенно влиять на атмосферное содержание озона и могут потребоваться дополнительные меры для предотвращения его негативных последствий.

Работа выполнена с целью оценки относительного вклада основных химических и физических процессов в наблюдаемую изменчивость климата и газового состава атмосферы с использованием химико-климатической модели (ХКМ) SOCOLv3 в 1980–2020 гг.

1. Методология работы и описание численной модели

Для выполнения задачи исследования были заданы сценарии вариаций основных факторов,

влияющих на изменчивость климата и газового состава атмосферы, в численных расчетах с помощью ХКМ SOCOLv3 за 1980–2020 гг. Далее были проведены численные эксперименты и верификация полученных результатов по данным наблюдений серии спутниковых приборов (радиометров) SBUV (Solar Backscatter UltraViolet), а также проанализирована изменчивость температуры тропосферы и нижней стратосферы и эволюция содержания атмосферного озона для каждого сценария. При этом для анализа результатов численного моделирования использовались модельные значения ОСО, концентрации озона и температуры воздуха в нижней тропосфере и нижней стратосфере с 1980 по 2020 г.

1.1. Описание модельных экспериментов

Оценка влияния основных климатообразующих факторов и выбросов ОРВ на газовый состав и климат атмосферы проводилась путем моделирования климатических параметров и содержания озона в атмосфере согласно четырем сценариям эволюции с 1980 по 2020 г. основных климатообразующих факторов:

1) изменение содержания ОРВ вблизи земной поверхности на основании данных WMO2018 [8];

2) изменение атмосферных концентраций парниковых газов на основании сценариев IPCC, температуры поверхности океана и площади морского льда по данным MetOffice;

3) вариации потоков солнечной радиации по данным CMIP-6;

4) изменение содержания стратосферного аэрозоля на основании результатов спутниковых измерений.

Временная изменчивость факторов с 1980 по 2020 г. представлена на рис. 1 (цв. вкладка).

Помимо описанных выше сценариев для оценки относительной роли указанных факторов был проведен базовый модельный эксперимент, в котором все исследуемые параметры изменялись за рассматриваемый период.

1.2. Краткое описание модели ХКМ SOCOLv3

SOCOL (SOlar Climate Ozone Links) – современная химико-климатическая модель, охватывающая атмосферу от поверхности Земли до мезосферы (около 80 км). Текущее третье поколение SOCOL состоит из версии модели общей циркуляции MA-ECHAM5 для средней атмосферы и модифицированной версии UIUC (Университет Иллинойса в Урбане-Шампейне) транспортно-фотохимической модели MEZON. Фотохимический модуль модели включает моделирование стратосферной газовой фазы и гетерогенной химии и наиболее важных химических процессов 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) [9].

Верификация модели проводилась по данным наблюдений ОСО, полученным с помощью серии спутниковых приборов (радиометров) SBUV с 1980 по 2020 г.

2. Результаты модельных экспериментов

Численное моделирование проводилось с 1980 по 2020 г. Результаты расчетов по базовому сценарию, в котором учитывалось влияние всех факторов, сравнивалось с результатами расчетов по дополнительным сценариям, в каждом из которых изменялся только один фактор, а остальные фиксировались на уровне 1980 г. Сравнение результатов расчетов по базовому и дополнительным сценариям позволило выделить только те изменения содержания озона и температуры, которые происходили за счет конкретного фактора.

Для верификации способности модели воспроизводить наблюдаемую изменчивость ОСО в течение исследуемого периода на рис. 2 (цв. вкладка) представлено сравнение рассчитанных по базовому сценарию отклонений ОСО от средних значений за 1980–2020 гг. с данными спутниковых измерений SBUV. В целом результаты численного моделирования соответствуют наблюдаемым фазам изменения ОСО. При этом модель преувеличивает влияние крупных извержений вулканов на ОСО, особенно в Южном полушарии для Пинатубо (1991 г.) и Северном полушарии для Эль-Чичона (1982 г.). Это может быть связано с неучетом влияния изменения площади поверхности частиц стратосферного аэрозоля при изменении атмосферных условий на скорости гетерогенных химических реакций в стратосфере. Рассмотрение микрофизики стратосферного аэрозоля в следующей версии XKM SOCOL-4 позволило улучшить соответствие результатов численного моделирования и измерений [10].

На рис. 3 (цв. вкладка) представлены результаты численного моделирования изменения среднеглобального ОСО для разных сценариев учета влияющих факторов. В базовом сценарии, где все исследуемые факторы меняются, наблюдается вызванное ростом ОРВ (синяя кривая) понижение общего содержания озона до середины 1990-х гг., после чего его содержание постепенно увеличивается в соответствии с уменьшением содержания ОРВ. Наиболее значительные понижения ОСО в конце XX в., как уже было сказано выше, связаны с выбросами большого количества аэрозоля в стратосферу в результате извержений вулканов Эль-Чичон и Пинатубо (зеленая кривая). При этом минимальные значения ОСО в середине 1990-х гг. вызваны одновременным увеличением содержания ОРВ (синяя кривая) и вулканического аэрозоля в стратосфере (зеленая кривая), а также минимумом солнечной активности (оранжевая кривая). В первые 20 лет XXI в. на фоне уменьшения роли ОРВ отмечается увеличение влияния климатических факторов на рост глобального озона (темно-зеленая кривая).

Отдельно проанализировано изменение содержания озона и температуры в тропосфере и стратосфере. Результаты численного моделирования приведены на рис. 4 и 5 соответственно (цв. вкладка).

Данные расчетов модели при различных сценариях показывают рост содержания тропосферного озона (рис. 4, а), что неблагоприятно сказывается на здоровье человека. Наибольший вклад в увеличение содержания тропосферного озона вносят в основном такие климатические факторы (зеленая кривая), как изменение температуры поверхности океана и площади поверхности морского льда. Также к увеличению приводит уменьшение содержания ОРВ. Интересным в данном случае является то, что в тропосфере также прослеживается влияние стратосферного аэрозоля, что еще раз подчеркивает важность динамики атмосферы.

Содержание озона в стратосфере по данным расчетов для различных сценариев (рис. 4, б), наоборот, уменьшается. Здесь наибольшее влияние оказывают содержание ОРВ (синяя кривая) и солнечная активность (оранжевая кривая), в то время как аэрозоль (светло-зеленая кривая) и климатические факторы (зеленая кривая) увеличивают количество озона в стратосфере. Минимум озона в стратосфере в 1993–1997 гг. обусловлен наложением нескольких факторов: максимальное количество ОРВ в атмосфере, извержение вулкана Пинатубо и минимум солнечной активности.

Наибольшее влияние на рост температуры в тропосфере оказывают климатические факторы (зеленая кривая, рис. 5, а). Дополнительные расчеты с учетом влияния роста содержания парниковых газов и температуры поверхности океана по отдельности показали, что влияние роста температуры поверхности океана преобладает над влиянием содержания парниковых газов. Это влияние настолько велико, что перевешивает вклад всех остальных исследуемых факторов.

Анализ изменения глобальной температуры нижней стратосферы (см. рис. 5, б) показал, что наблюдаемое охлаждение стратосферы в наибольшей степени определяется климатическими факторами (темно-зеленая кривая) и влиянием ОРВ на стратосферный озон (синяя кривая). Значительное уменьшение ОСО в конце XX в. вызвало снижение температуры стратосферы, а незначительное увеличение ОСО в XXI в. пока не привело к ее росту (синяя кривая).

Кратковременные пики температуры нижней стратосферы связаны в основном с влиянием вулканических выбросов аэрозоля в стратосферу, в результате чего солнечная радиация поглощается аэрозолем в стратосфере и нагревает ее (зеленая кривая, рис. 5, б). При этом если на содержание озона вулканические выбросы Эль-Чичона и Пинатубо оказывают похожее действие, то влияние вулканического аэрозоля на температуру нижней стратосферы сильно разнится для этих двух крупнейших вулканических извержений. После извержения Эль-Чичона температура нижней стратосферы увеличивается незначительно, так как сохраняется

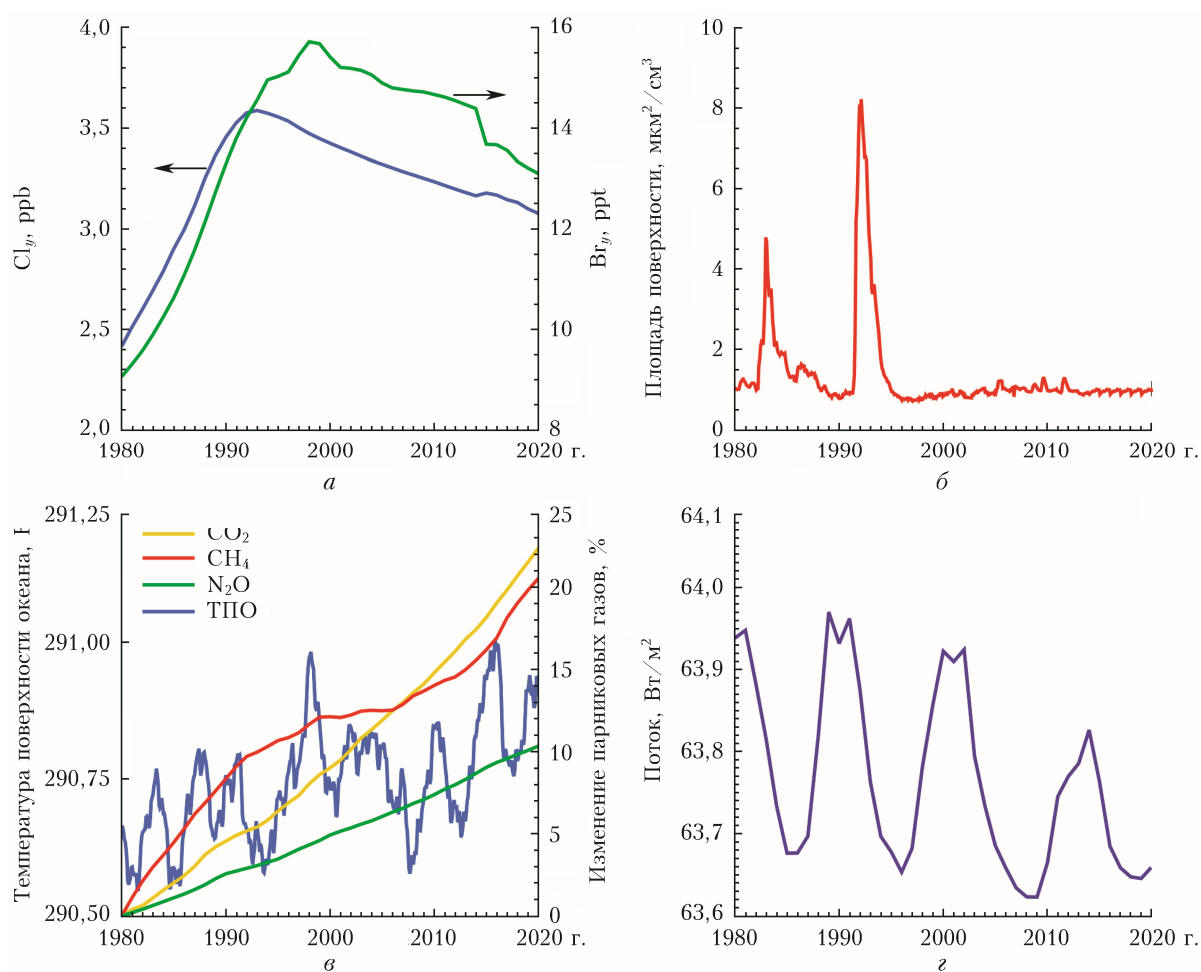


Рис. 1. Временная изменчивость факторов, влияющих на ОСО и температуру атмосферы: *а* — приповерхностные ОРВ; *б* — стратосферный аэрозоль; *в* — климатические факторы; *г* — УФ-радиация

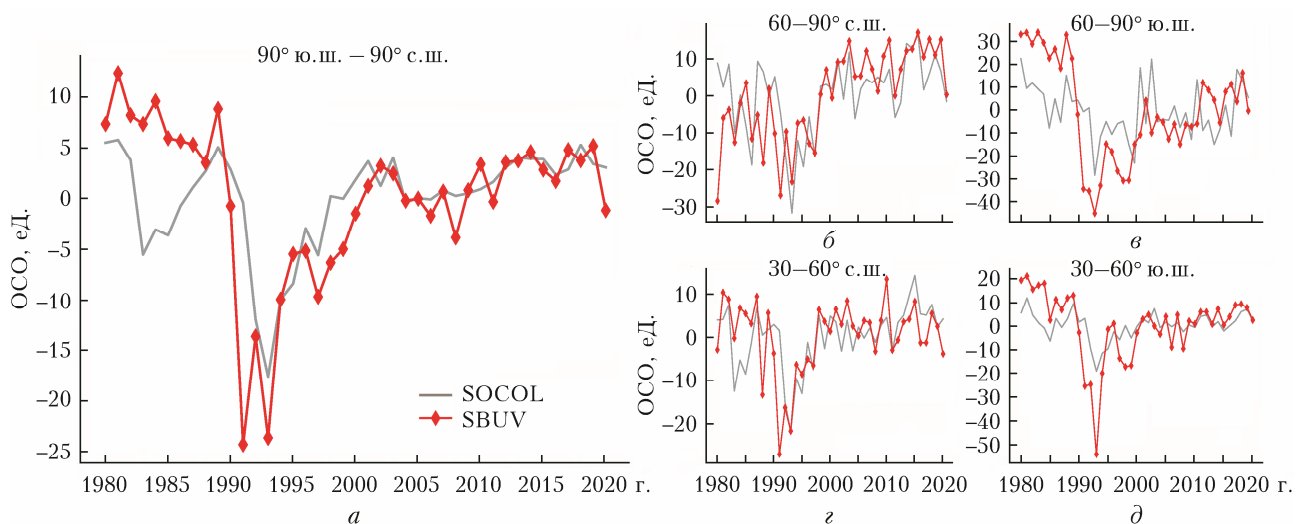


Рис. 2. Отклонения ОСО от средних значений за период 1980–2020 гг. по результатам моделирования ХКМ Socolv3 и данным серии спутниковых приборов (радиометров) SBUV для разных широтных зон: по всему земному шару (*а*); в высоких широтах Северного (*б*) и Южного полушария (*в*); в средних широтах Северного (*г*) и Южного полушария (*д*)

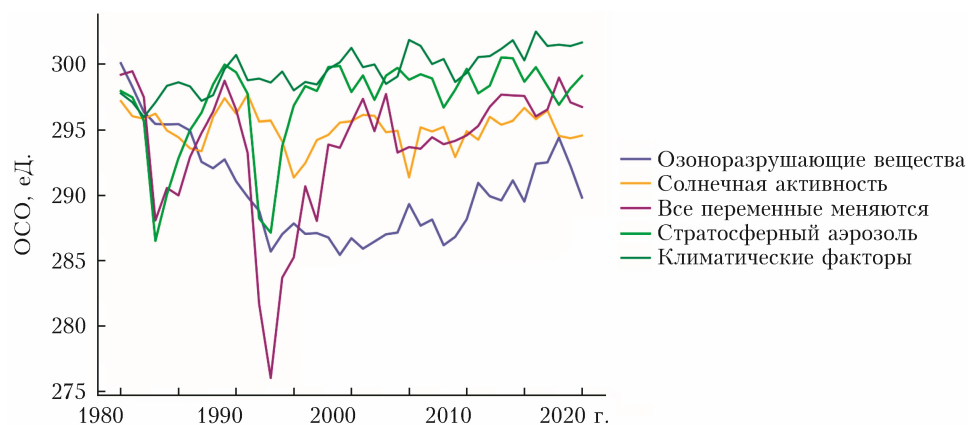


Рис. 3. Результаты численного моделирования влияния различных факторов на величину ОСО

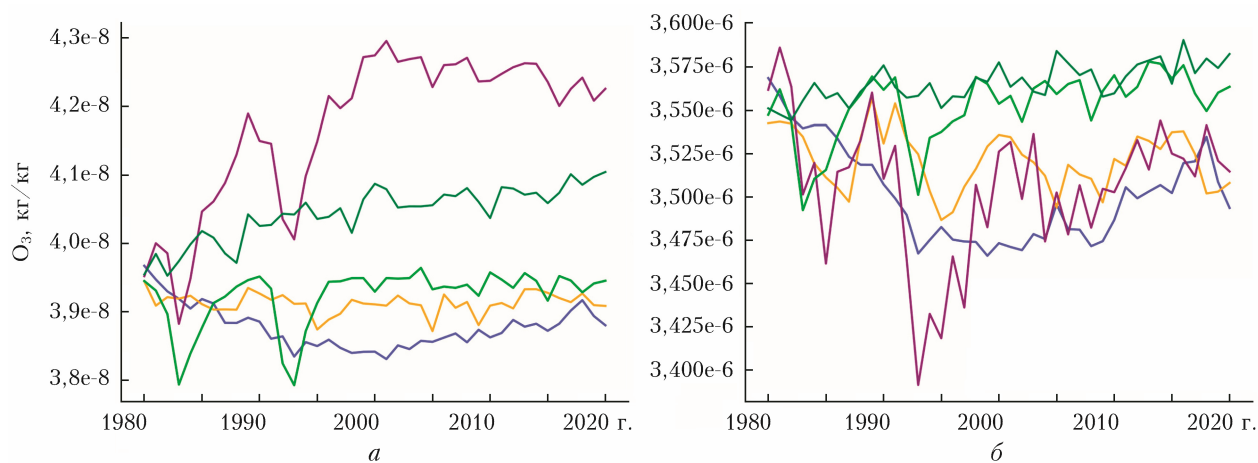


Рис. 4. Результаты численного моделирования влияния различных факторов на ОСО в тропосфере на высоте 0–2 км (а) и стратосфере на высоте 15–30 км (б) (см. легенду на рис. 3)

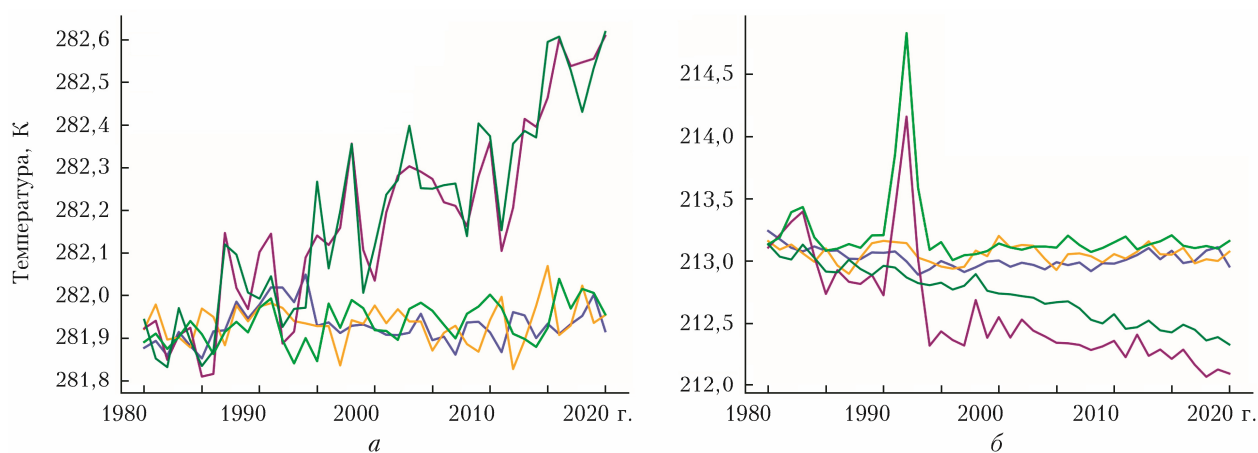


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для температуры

еще достаточно высокий уровень ОСО, который нагревает стратосферу, тогда как после извержения Пинатубо содержание озона уже уменьшилось из-за влияния ОРВ и уменьшения солнечной активности. В результате этого температура растет быстрее, чем после извержения Эль-Чичона. Следует отметить отсутствие аддитивности в сценариях из-за нелинейности атмосферных процессов. Также большое влияние на содержание озона в атмосфере оказывают гравитационные волны, роль которых в каждом сценарии еще не до конца изучено авторами.

Заключение

Результаты численных экспериментов с использованием химико-климатической модели SOCOLv3 позволили оценить относительный вклад основных химических и физических процессов в наблюдаемую изменчивость содержания озона и температуры нижней и средней атмосферы в 1980–2020 гг.

1. В целом модельный ход ОСО соответствует фазам своего изменения, отмечаемым по данным спутниковых измерений.

2. Минимальные значения ОСО в середине 1990-х гг. связаны с одновременным увеличением содержания ОРВ, вулканическими выбросами аэрозоля в стратосферу и минимумом солнечной активности.

3. В первые 20 лет XXI в. на фоне уменьшения влияния ОРВ на содержание озона в атмосфере отмечается увеличение влияния климатических факторов на рост глобального озона.

4. Наибольший вклад в наблюдаемое увеличение содержания тропосферного озона вносят такие климатические факторы, как изменение температуры поверхности океана и площади поверхности морского льда, уменьшение содержания ОРВ и изменение содержания стратосферного аэрозоля. Влияние ОРВ и стратосферного аэрозоля на тропосферный озон еще раз подчеркивает важность вертикального обмена между нижней и средней атмосферой.

5. Наибольшее влияние на рост температуры в тропосфере оказывают климатические факторы, причем увеличение температуры поверхности океана влияет сильнее, чем рост содержания парниковых газов в атмосфере.

6. Охлаждение стратосферы в наибольшей степени определяется климатическими факторами и влиянием ОРВ на стратосферный озон. Значительное снижение ОСО в конце XX в. привело к уменьшению нагрева стратосферы и соответственно ее температуры, а незначительное увеличение ОСО в XXI в. пока не привело к ее росту.

7. Кратковременные пики температуры нижней стратосферы связаны главным образом с вулканическими выбросами аэрозоля в стратосферу, в результате чего солнечная радиация задерживается аэрозолем в стратосфере и нагревает ее.

Финансирование. Исследование влияния различных факторов на изменение климата и содержания атмосферного озона выполнено в рамках го-

сударственного задания Российского государственного гидрометеорологического университета (проект FSZU-2023-0002); численные расчеты проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (соглашение № 075-15-2021-583).

Список литературы

1. *Andreae M.O., Merlet P.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // *Glob. Biogeochem. Cycl.* 2001. V. 15, N 4. P. 955–966.
2. *World Meteorological Organization (WMO).* Scientific Assessment of Ozone Depletion. GAW Report N 278. WMO: Geneva, 2022. 509 p.
3. *Розалев А.Н.* Вопросы реализации гарантированных методов включения выживающих траекторий управляемых систем // *Сиб. аэрокосм. журн.* 2011. Т. 35, № 2. С. 54–58.
4. *Dhomse S.S., Kinnison D., Chipperfield M.P., Salawitch R.J., Cionni I., Hegglin M.I., Abraham N.L., Akiyoshi H., Archibald A.T., Bednarz E.M., Bekki S., Braesicke P., Butchart N., Dameris M., Deushi M., Frith S., Hardiman S.C., Hassler B., Horowitz L.W., Hu R.-M., Jöckel P., Josse B., Kirner O., Kremser S., Langematz U., Lewis J., Marchand M., Lin M., Mancini E., Maréchal V., Michou M., Morgenstern O., O'Connor F.M., Oman L., Pitari G., Plummer D.A., Pyle J.A., Revell L.E., Rozanov E., Schofield R., Stenke A., Stone K., Sudo K., Tilmes S., Visionsi D., Yamashita Y., Zeng G.* Estimates of ozone return dates from Chemistry–Climate Model Initiative simulations // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 8409–8438.
5. *IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Aviation and the Global Atmosphere / J. Penner et al. (eds.).* Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 384 p.
6. *Wang H., Lu X., Jacob D.J., Cooper O.R., Chang K.-L., Li K., Gao M., Liu Y., Sheng B., Wu K., Wu T., Zhang J., Sauvage B., Nédélec P., Blot R., Fan S.* Global tropospheric ozone trends, attributions, and radiative impacts in 1995–2017: An integrated analysis using aircraft (IAGOS) observations, ozonesonde, and multi-decadal chemical model simulations // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 13753–13782. DOI: 10.5194/acp-22-13753-2022.
7. *Isaksen I.S.A., Granier C., Myhre G., Berntsen T.K., Dalsuren S.B., Gauss M., Klimont Z., Benestad R., Bousquet P., Collins W., Cox T., Eyring V., Fowler D., Fuzzi S., Jöckel P., Laj P., Lohmann U., Maione M., Monks P., Preved A.S.H., Raes F., Richter A., Rognérud B., Schulz M., Shindell D., Stevenson D.S., Stenke A., Wuebbles D.* Atmospheric composition change: Climate–chemistry interactions // *Atmos. Environ.* 2009. V. 43. P. 5138–5192.
8. *Engel A., Rigby M., Burkholder J.B., Fernandez R.P., Froidevaux L., Hall B.D., Hossaini R., Saito T., Volmer M.K., Yao B.* Chapter 1: Update on ozone-depleting substances (ODSs) and other gases of interest to the Montreal Protocol // *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018.* WMO, UNEP: Geneva, Switzerland, 2018. P. 91.
9. *Stenke A., Schraner M., Rozanov E., Egorova T., Luo B., Peter T.* The SOCOL version 3.0 chemistry–climate model: Description, evaluation, and implications

- from an advanced transport algorithm // Geosci. Model Dev. 2013. V. 6. P. 1407–1427.
10. Sukhodolov T., Egorova T., Stenke A., Ball W.T., Brodowski C., Chiodo G., Feinberg A., Friedel M., Karagodin-Doyennel A., Peter T., Sedlacek J., Vattioni S., Rozanov E. Atmosphere – ocean – aerosol – chemistry – climate model SOCOLv4.0: Description and evaluation // Geosci. Model Dev. 2021. V. 14. P. 5525–5560.

M.A. Usacheva, S.P. Smyshlyaev, V.A. Zubov, E.V. Rozanov. Modelling the climate changes and atmospheric ozone variations in XX–XXI by CCM SOCOLv3.

To estimate the relative contribution of the main chemical and physical processes to the observed variability of climate and atmospheric gas composition in 1980–2020, numerical experiments were conducted with the chemical and climatic model (CMC) SOCOLv3. The following factors of changes in ozone content and atmospheric temperature were studied: changes in the content of ozone-depleting substances; changes in greenhouse gas concentrations, ocean surface temperature and sea ice area; variations in solar activity, and changes in atmospheric aerosol content. To estimate the relative role of these factors, calculations were carried out on scenarios taking into account each factor separately and all factors together. According to the results of numerical experiments, the relative contribution of various factors to changes in the temperature of the troposphere and the lower stratosphere, as well as the ozone content was revealed for the period from 1980 to 2020. The model results have been compared with the satellite SBUV data.