ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ДИНАМИКИ СТРАТОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В XXI ВЕКЕ ПО РАСЧЕТАМ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИВМ РАН

П.Н. Варгин¹, Е.М. Володин²

¹ Центральная аэрологическая обсерватория, Росгидромет, г. Долгопрудный, Московская область

² Институт вычислительной математики им. Г.И.Марчука РАН, г. Москва

p_vargin@mail.ru volodin@inm.ras.ru

Аннотация. С использованием данных расчетов 5-й версии совместной климатической модели ИВМ РАН для будущего климата (2015–2100 гг.), проведенных в рамках международного проекта CMIP6 по сценариям умеренного и жесткого роста парниковых газов, анализируются изменения температуры, среднезонального ветра, активности планетарных волн, меридиональной циркуляции атмосферы, дат весенней перестройки циркуляции стратосферы Арктики.

Ключевые слова: физика атмосферы, динамическое взаимодействие стратосферы и тропосферы, моделирование климата.

1. Введение

Продолжающийся рост концентраций парниковых газов в атмосфере приводит к изменению климата не только тропосферы, но и стратосферы и мезосферы, где связанное с ним уменьшение температуры в целом однородное по широте, усиливается с высотой и проявляется сильнее, чем её рост в тропосфере [1, 2]. Другим фактором, влияющим на тренды температуры стратосферы, является восстановление озонового слоя к уровню начала 1980-х гг., ожидаемое во второй половине текущего столетия. Извержения вулканов, достигающие стратосферы, способны понизить её температуру [1, 3]. Например, в результате извержения вулкана Пинатубо в 1991 г. снижение температуры стратосферы наблюдалось в течение почти двух лет.

Так как стратосфера динамически связана с тропосферой в зимний период и, её изменения могут влиять на климат и погодные условия [напр., 4–7], верхнюю атмосферу [8], характер разрушения озонового слоя в полярных регионах [5], исследование изменений циркуляции стратосферы в условиях меняющегося климата является актуальной научной задачей.

Циркуляция внетропической стратосферы характеризуется сильной межгодовой изменчивостью, определяющей главным образом распространением из тропосферы волновой активности. При этом стратосфера не только реагирует на это распространение, но и влияет на него [5].

Изучение изменений стратосферы в условиях будущего климата возможно только с использованием расчетов климатических моделей, реализация которыми современного климата (как тропосферы, так и стратосферы) и его изменений за последние десятилетия признана успешной в сравнении

с результатами анализа данных наблюдений и расчетами большинства других моделей. Задача по валидации воспроизведения климатическими моделями приземного климата и циркуляции тропосферы и стратосферы решается в рамках международных проектов CMIP [9] и DynVar [10]. Увеличение верхней границы и вертикального разрешения в стратосфере, добавление параметризации неорографических гравитационных волн в моделях проекта CMIP5 позволило улучшить воспроизведение изменчивости стратосферного полярного вихря в Арктике [11].

Воспроизведение будущего климата моделью ИВМ РАН анализируется в статье [12]. Показано, что величина глобального потепления, предсказываемая этой моделью, меньше, чем у других моделей CMIP6. Летом именно на территории России температура самого жаркого месяца может расти быстрее, чем среднесезонная температура. Ни при каком из сценариев не происходит полного освобождения Северного Ледовитого океана ото льда в XXI веке. Сравнение результатов модельных экспериментов в рамках проекта DynVar по сценарию 4х-кратного увеличения содержания CO₂ к концу XXI века показало, что воспроизведение моделью ИВМ РАН изменений циркуляции стратосферы близко к средним показателям других моделей [13].

2. Используемые данные и методы анализа

Анализируются результаты двух расчетов с 2015 г. по 2100 г. 5-й версии климатической модели ИВМ РАН [14], проведенных в рамках проекта CMIP6. Расчеты отличаются между собой изменением радиационного воздействия из-за роста концентраций парниковых газов в атмосфере. В первом случае к 2100 г. оно увеличится на 4.5 Вт/м² (умеренный

сценарий ssp2–4.5) по сравнению с преиндустриальным климатом (т.е. до 1750 г.), концентрация двуокси углерода CO_2 возрастет до $\sim 600 \text{ млн}^{-1}$, а во втором случае при жестком сценарии (ssp5–8.5) – на 8.5 Вт/м^2 , что соответствует увеличению концентрации CO_2 примерно в 4 раза до 1135 млн^{-1} . В обоих сценариях, обозначаемых далее, как ssp2–4.5 и ssp5–8.5, предусматривался также умеренный или жесткий рост концентраций метана CH_4 и оксида азота N_2O . Начальными условиями для расчетов будущего климата (с 2015 г.) были результаты исторических экспериментов с 1850 г. по 2014 г.

Пространственное разрешение модели в атмосфере по долготе-широте: $2^\circ \times 1.5^\circ$, 73 вертикальных уровня до 0.2 гПа ($\sim 60 \text{ км}$), в океане: $0.5^\circ \times 0.25^\circ$ и 40 вертикальных уровней. Среди важнейших отличий 5-й версии модели от предыдущей: улучшение вертикального разрешения в верхней стратосфере и нижней мезосфере, улучшение параметризации крупно-масштабной конденсации и облачности, добавление аэрозольного блока [15]. В результате совершенствования модель ИВМ РАН воспроизводит квазидвухлетний цикл колебаний зонального

ветра в экваториальной стратосфере (КДЦ) и близкую к наблюдаемой частоте возникновения внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Выявлено хорошее соответствие реализации основных динамических процессов стратосферы Арктики в расчетах климатической модели ИВМ РАН по сравнению с данными реанализа [16]. Однако распространение аномалий циркуляции стратосферы Арктики в тропосфере в модели занижено [17].

Данные расчетов модели ИВМ РАН и других моделей, участвующих в проекте CMIP6, размещены на сайте <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>

3. Результаты

3.1. Изменения температуры тропосферы и стратосферы

Изменение среднезональной температуры января между периодами 2080–2100 гг. и 2015–2035 гг. для умеренного и жесткого сценариев представлены на Рис. 1. При умеренном сценарии уменьшение температуры составляет примерно от -1° в нижней стратосфере до -4° в верхней. При этом в верхней стратосфере Арктики температура снижается сильнее: до -8° .

Рис. 1. Изменение среднезональной температуры (К) в январе между периодами 2080–2100 гг. и 2015–2035 гг. по сценариям ssp2–4.5 (а) и ssp5–8.5 (б)

Жесткий сценарий сопровождается снижением температуры также примерно от -1° в нижней до -11° в верхней стратосфере. Наибольшее уменьшение температуры до -12 – -13° наблюдается в верхней стратосфере уже во всем Северном полушарии. Сильнее при жестком сценарии и рост температуры в тропосфере: более 3° над тропиками.

Наблюдается усиление среднезонального ветра в средних и высоких широтах Северного полушария: при умеренном сценарии до 3 м/с, при жестком сценарии до 5 м/с. Анализ изменчивости температуры стратосферы показал, что наибольшее ее снижение ожидается в феврале-марте.

3.2. Изменение волновой активности

Распространяющаяся из тропосферы в стратосферу волновая активность оказывает существенное

влияние на стратосферный полярный вихрь, определяя характер разрушения озонового слоя. При высокой волновой активности существенного разрушения озона в стратосфере Арктики не наблюдается [18].

Снижение температуры стратосферы сопровождается изменением распространения потоков волновой активности в стратосфере. В качестве параметра такого распространения используется среднезональный меридиональный поток тепла, где v' и T' – отклонение меридионального ветра и температуры от среднезональных значений (Рис. 2).

При жестком сценарии к концу XXI века наблюдается усиление распространения волновой активности из тропосферы и нижней стратосферы в верхнюю стратосферу в зимний период (декабрь – февраль).

Проанализировано изменение амплитуд, доминирующих в зимней стратосфере внетропических широт

стационарных планетарных волн с зональными числами 1 и 2 (далее СПВ1 и СПВ2) (Рис. 3). При умеренном сценарии амплитуда СПВ1 усиливается в верхней стратосфере в области 60–70° с.ш. на ~100 геопотенциальных метров (гпм) (~15 %), у СПВ2 изменения амплитуды не превышают 20 гпм. При жестком сце-

нарии усиление СПВ1 составляет в верхней стратосфере в области 60–70° с.ш. уже более 250 гпм (~25 %), у СПВ2 в средней стратосфере усиление составляет более 40 гпм, а ослабление вблизи 40° с.ш. ~20 гпм. По-видимому, усиление среднезонального ветра в стратосфере способствует усилению СПВ1.

Рис. 2. Изменение среднезонального меридионального потока тепла (К м/с) в декабре-феврале между периодами 2080–2100 гг. и 2015–2035 гг. по сценариям ssp2–4.5 (а) и ssp5–8.5 (б)

Рис. 3. Изменение амплитуд СПВ1 и СПВ2 (гпм) в декабре-феврале между 2081–2100 гг. и 2016–2035 гг. по сценариям ssp2–4.5 (а, б) и ssp5–8.5 (в, г)

3.3. Внезапные стратосферные потепления в Арктике

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) – важнейшее динамическое явление, наблюдаемое почти каждый год в стратосфере Арктики зимой и определяющее её межгодовую изменчивость. ВСП сопровождаются быстрым ростом температуры на десятки градусов, замедлением зональной циркуляции (иногда – изменением ее направления), а также ослаблением стратосферного полярного вихря. Возникающие вследствие нелинейного взаимодействия распространяющихся из тропосферы в стратосферу планетарных волн и циркуляции стратосферы ВСП определяют температурный режим полярной стратосферы и тем самым – характер разрушения озонового слоя. Без ВСП стратосферный полярный вихрь сохраняется до весенней перестройки циркуляции, внутри него формируется большой объем полярных стратосферных облаков, на частицах которых в присутствии солнечного све-

та активно разрушается стратосферный озон как, например, зимой 2019–2020 г.

Главные ВСП выявлялись при выполнении условия: изменение знака среднезонального ветра на 10 гПа и 60° с.ш. должно наблюдаться не менее 4 суток подряд. Таких главных ВСП при жестком сценарии выявлено 13. Также было выявлено 16 наиболее холодных зимних сезонов.

3.4. Весенние перестройки циркуляции стратосферы Северного полушария

Даты весенних перестроек циркуляции стратосферы для двух анализируемых сценариев представлены на Рис. 5. При умеренном сценарии изменений в распределении дат перестроек не наблюдается. Климатическая (при осреднении за весь период) дата перестройки – 21 марта (171-й день начиная с 1 октября), большинство перестроек наблюдаются в марте (Рис. 4а). Выявлено 9 наиболее ранних перестроек в конце января и начале февраля.

Рис. 4. Даты весенних перестроек циркуляции стратосферы Северного полушария для сценариев ssp2.45 (а) и ssp5.85 (б) с 2015 г. по 2100 г.

При жестком сценарии наблюдается небольшой положительный тренд дат перестроек к более поздним датам. Климатическая дата перестройки – 24 марта. Меньше наблюдается наиболее ранних перестроек, в том числе в феврале (Рис. 4б). При умеренном сценарии средняя дата перестройки в первые 20 лет: 18 марта (168-й день), в последние 20 лет: 25 марта (175-й день), при жестком сценарии соответственно: 22 марта (172-й день) и 25 марта.

3.5. Связь дат весенних перестроек и амплитуды волны 1

Из диаграмм рассеяния амплитуды СПВ1 в марте на 10 гПа и дат весенней перестройки следует, что и в

будущем климате ранние перестройки будут сопровождаться усилением СПВ1 (Рис. 5).

Планетарные волны могут влиять на дату весенней перестройки стратосферы: ранние перестройки сопровождаются усилением СПВ1. При поздних перестройках волновая активность слабее и перестройка вызывается сезонным нагревом средней атмосферы [19]. Выявленная значимая линейная связь между датами весенней перестройки и амплитудой СПВ1 в марте (коэф. корреляции -0.62) в данных реанализа ERA-Interim с 1980 г. по 2017 г. и расчетах (3 из 5) модели ИВМ РАН с 1965 г. по 2015 г.: коэф. корреляции от -0.29 до -0.53 [20].

Рис. 5. Диаграмма рассеяния амплитуды СПВ1 (гпм) в марте на уровне давления 10 гПа в области 45–75° с.ш. и дат весенней перестройки для расчетов по сценариям ssp4.5 (а) и ssp8.5 (б) для периода с 2015–2100 гг.

3.6. Изменчивость меридиональной циркуляции стратосферы

В тропосфере меридиональная циркуляция характеризуется главным образом ячейками Хэдли в тропиках и ячейками Ферреля (севернее и южнее ячеек Хэдли). По расчетам модели ИВМ РАН к концу XXI века ожидается ослабление ячеек Хэдли в обоих полушариях, а также её распространение вверх и расширение (особенно в Сев. полушарии) [12].

В стратосфере к концу века в зимний сезон будет наблюдаться усиление восходящих движений в области экватор – северные тропики и нисходящих движений в высоких широтах Северного полушария (Рис. 6). Эти изменения будут сильнее при жестком сценарии. Усиление меридиональной циркуляции стратосферы может привести к уменьшению среднего «возраста» воздуха.

Рис. 6. Изменение остаточной функции тока ($\text{кг/с} \cdot 10^9$) в декабре-феврале 2081–2100 гг. по сравнению с 2016–2035 гг. по сценариям ssp2–4.5 (а), ssp5–8.5 (б)

4. Заключение

Анализ результатов расчетов совместной климатической модели ИВМ РАН по сценариям умеренного и жесткого роста парниковых газов показывает, что в конце XXI века снижение температуры составит от 1° в нижней стратосфере до 4° в верхней при умеренном и до 11° при жестком сценарии. Снижение температуры стратосферы

в зимний период будет сопровождаться усилением среднезонального ветра и распространения волной активности в среднюю и верхнюю стратосферу, ростом амплитуды волны с зональным числом 1. При жестком сценарии будет наблюдаться небольшой тренд дат весенних перестроек циркуляции стратосферы Арктики к более поздним срокам. При обоих сценариях сохранится

тенденция – более ранние весенние перестройки будут сопровождаться волнами с зональным числом 1 с большей амплитудой по сравнению с более поздними перестройками. В средних и высоких широтах в зимний период в Северном полушарии ожидается усиление среднезональной меридиональной циркуляции.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-05-00370).

Литература

1. Randel W., Smith A., Wu F. Stratospheric Temperature Trends over 1979–2015 Derived from Combined SSU, MLS, and SABER Satellite Observation. *J. Climate*. 2016. V. 29, p. 4843–4859.
2. WMO Ozone Report No. 55. Scientific assessment of ozone depletion. WMO. 2018.
3. Garcia R., Yue J., Russell J. Middle atmosphere temperature trends in the twentieth and twenty-first centuries simulated with the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM). *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2019, V. 124.
4. Baldwin M., Dunkerton T. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*. 2001, V. 294, p. 581–584.
5. Baldwin M., Birner T., Brasseur G., Burrows J., Butchart N., Garcia R., Geller M., Gray L., Hamilton K., Harnik N., Hegglin M., Langematz U., Robock A., Sato K., Scaife A. 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere. *Meteorological Monographs*, 2019, V. 59, Chapter 27. p. 27.1–27.61.
6. Kolstad E., Breiteig T., Scaife A. The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere. *J. R. Meteorol. Soc.*, 2010, V. 136, p. 886–893.
7. Nath D., Chen W., Zelin C., Pogoreltsev A., Wei K. Dynamics of 2013 Sudden Stratospheric Warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection. *Scientific Reports*, 2016, V. 6, 24174.
8. Pedatella N., Chau J., Schmidt H., Goncharenko L., Stolle C., Hocke K., Harvey V., Funke B., Siddiqui T. How sudden stratospheric warming affects the whole atmosphere. *EOS*, 2018, V. 99.
9. Pascoe Ch., Lawrence B., Guilyardi E., Juckes M., Taylor K. Designing and Documenting Experiments in CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2019.
10. Gerber E., Manzini E. The Dynamics and Variability Model Intercomparison Project (DynVarMIP) for CMIP6: assessing the stratosphere–troposphere system. *Geoscientific Model Development*, 2016, V. 9, p. 3413–3425.
11. Cai Z., Wei Ke., Xu L., Lan X., Chen W., Nath D. The Influences of the Model Configuration on the Simulation of Stratospheric Northern-Hemisphere Polar Vortex in the CMIP5 Models. *Advances in Meteorology*. 2017, Article ID 7326759.
12. Володин Е.М., Грищун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5. *Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана*, 2020, том 56, № 3, с. 1–12.
13. Ayarzagüena B., Charlton-Perez A., Butler A., Hitchcock P., Simpson I., Polvani L., Butchart N., Gerber E., Gray L., Hassler B., Lin P., Lott F., Manzini E., Mizuta R., Orbe C., Osprey S., Saint-Martin D., Sigmond M., Taguchi M., Volodin E., Watanabe S. Uncertainty in the response of sudden stratospheric warmings and stratosphere-troposphere coupling to quadrupled CO₂ concentrations in CMIP6 models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2020, V.125.
14. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лыков В.Н., Грищун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2017, т. 53, № 2, с. 164–178.
15. Володин Е.М., Кострыкин С.В. Аэрозольный блок в климатической модели ИВМ РАН. *Метеорология и гидрология*, 2016, № 8, с. 5–17.
16. Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ реализации динамических процессов в стратосфере в расчетах с климатической моделью ИВМ РАН. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2016, т. 52, № 1, с. 3–18.
17. Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы в расчетах климатической модели ИВМ РАН. *Метеорология и гидрология*, 2018, № 11, с. 100–109.
18. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я., Дробашевская Е.А. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов. *Геомagnetизм и аэрономия*, 2016, т. 56, № 1, с. 102–116.
19. Savenkova E.N., Kanukhina A.Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G. Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2012, V. 90–91, p. 1–8.
20. 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, с. 1–13.

INVESTIGATION OF NORTHERN HEMISPHERE STRATOSPHERE VARIABILITY IN XXI CENTURY IN INM CM5 CLIMATE MODEL SIMULATIONS

P. N. Vargin¹, E. M. Volodin²

¹ Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

² Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

E-mail: p_vargin@mail.ru volodinev@gmail.com

Abstract. Simulations of 5th version of INM RAS (Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Science) climate model performed in the framework of CMIP6 project for the future climate under ssp2–4.5 (moderate) and ssp5–8.5 (business as usual or hard) scenarios of green house gases (GHG) increase are employed to analyze temperature, zonal mean wind, stratospheric polar vortex, planetary wave activity, meridional circulation, sudden stratospheric warming (SSW) events, and stratospheric circulation spring break-up date changes during boreal winters from 2015 to 2100. Comparison of averages over two periods of 2080–2100 and 2015–2035 revealed that temperature will decrease from 1° in the lower stratosphere to 4° in the upper stratosphere under moderate scenario and up to 11° under hard scenario. Cooling of stratosphere will be accompanied by strengthening of zonal circulation and planetary wave activity propagation in the middle – upper stratosphere that in turn leads to increase (stronger under hard scenario) of planetary wave with zonal wave number 1 amplitude (wavenumber 1). 13 major sudden stratospheric warming events and 16 very cold stratospheric winter seasons were revealed under hard scenario. Under both scenarios early spring break-up dates will be accompanied by stronger wavenumber 1 in comparison with winter seasons with later spring break-up dates. Strengthening of zonal mean meridional circulation is expected in the late XXI century.

Keywords: atmospheric physics, stratosphere-troposphere dynamical coupling, climate modeling

References

1. Randel W., Smith A., Wu F. Stratospheric Temperature Trends over 1979–2015 Derived from Combined SSU, MLS, and SABER Satellite Observation. *J. Climate*. 2016. V. 29, p. 4843–4859.
2. WMO Ozone Report No. 55. Scientific assessment of ozone depletion. WMO. 2018.
3. Garcia R., Yue J., Russell J. Middle atmosphere temperature trends in the twentieth and twenty-first centuries simulated with the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM). *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2019, V. 124.
4. Baldwin M., Dunkerton T. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*. 2001, V. 294, p. 581–584.
5. Baldwin M., Birner T., Brasseur G., Burrows J., Butchart N., Garcia R., Geller M., Gray L., Hamilton K., Harnik N., Hegglin M., Langematz U., Robock A., Sato K., Scaife A. 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere. *Meteorological Monographs*, 2019, V. 59, Chapter 27. p. 27.1–27.61.
6. Kolstad E., Breiteig T., Scaife A. The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere. *J. R. Meteorol. Soc.*, 2010, V. 136, p. 886–893.
7. Nath D., Chen W., Zelin C., Pogoreltsev A., Wei K. Dynamics of 2013 Sudden Stratospheric Warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection. *Scientific Reports*, 2016, V. 6, 24174.
8. Pedatella N., Chau J., Schmidt H., Goncharenko L., Stolle C., Hocke K., Harvey V., Funke B., Siddiqui T. How sudden stratospheric warming affects the whole atmosphere. *EOS*, 2018, V. 99.
9. Pascoe Ch., Lawrence B., Guilyardi E., Juckes M., Taylor K. Designing and Documenting Experiments in CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2019.
10. Gerber E., Manzini E. The Dynamics and Variability Model Intercomparison Project (DynVarMIP) for CMIP6: assessing the stratosphere–troposphere system. *Geoscientific Model Development*, 2016, V. 9, p. 3413–3425.
11. Cai Z., Wei Ke., Xu L., Lan X., Chen W., Nath D. The Influences of the Model Configuration on the Simulation of Stratospheric Northern-Hemisphere Polar Vortex in the CMIP5 Models. *Advances in Meteorology*. 2017, Article ID 7326759.
12. Volodin E.M., Gritsun A.S. Simulation of Possible Future Climate Changes in 21 Century with Climate Model INM-CM5. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, V. 56, No 3, p. 1–12.
13. Ayarzagüena B., Charlton-Perez A., Butler A., Hitchcock P., Simpson I., Polvani L., Butchart N., Gerber E., Gray L., Hassler B., Lin P., Lott F., Manzini E., Mizuta R., Orbe C., Osprey S., Saint-Martin D., Sigmond M., Taguchi M., Volodin E., Watanabe S. Uncertainty in the response of sudden stratospheric warmings and stratosphere-troposphere coupling to quadrupled CO₂ concentrations in CMIP6 models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2020, V. 125.
14. Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin V.Ya., Lykosov V.N., Gritsun A.S., Dianskii N.A., Gusev A.V., Yakovlev N.G. Simulation of Modern Climate with the New Version of the INM RAS Climate Model. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, V. 53, No 2, p. 164–178.

15. Volodin E.M., Kostykin S.V. The aerosol module in the INM RAS climate model. Russian Meteorology and Hydrology, 2016, V. 41, No 8, p. 519–528.
16. Vargin P., Volodin E., Analysis of the reproduction of dynamical processes in the stratosphere using climate model of Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2016, V. 52, № 1, p.3–18.
17. Vargin P.N., Kostykin S.V., Volodin E.M. Analysis of realization of stratosphere-troposphere dynamical coupling in simulations of INM RAS climate model. Russian Meteorology and Hydrology, 2018, V. 43, No 11, p. 780–786.
18. Smyshlyaev S.P., Pogoreltsev A.I., Galin V.Ya., Drobashevskaya E.A. Influence of Wave Activity on the Composition of the Polar Stratosphere. Geomagnetism and Aeronomy, 2016, V. 56, No 1, p. 95–109.
19. Savenkova E.N., Kanukhina A.Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G. Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere. J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., 2012, V. 90–91, p. 1–8.
20. Vargin P.N., Kostykin S.V., Rakushina E.V., Volodin E.M., Pogoreltsev A.I. Investigation of variability of Spring Breakup dates and Arctic stratospheric polar vortex parameters in modeling and reanalysis data. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2020, V. 56, No 5, p. 1–13.