

Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 21—38.
Hydrometeorology and Ecology. 2026;(82):21—38.

Научная статья
УДК 551.515.1:551.510.42
doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-21-38

Композитный анализ влияния стратосферного полярного вихря на приземную температуру в Северном полушарии

*Маргарита Александровна Ткаченко^{1, 2}, Арина Андреевна Окуличева¹,
Татьяна Евгеньевна Симакина¹, Владимир Аркадьевич Зубов²,
Евгений Владимирович Розанов², Сергей Павлович Смышляев¹*

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, smsl@rshu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты композитного анализа влияния стратосферного полярного вихря на приземную температуру Северного полушария с использованием модели SOCOLv3 за период с 1980 г. по 2020 г. Проанализировано семь климатических сценариев, учитывающих озоно-разрушающие вещества, парниковые газы, солнечную активность, вулканические аэрозоли и температуру океана. Статистически значимый отклик ($p < 0,05$) наблюдается на 6—32 % территории Северного полушария в зависимости от сценария, с амплитудой региональных аномалий до ± 2 —3 К. Наибольший отклик выявлен в сценарии с вариациями температуры океана (32,2 % площади значимости), максимальная межсценарная согласованность наблюдается в Североатлантическом секторе.

Ключевые слова: стратосферный полярный вихрь, приземная температура, климатические сценарии, стратосферно-тропосферное взаимодействие.

Благодарности: Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ (проект FSZU-2026-0003). Анализ влияния метеоусловий на приземную температуру осуществлялся в рамках проекта РНФ 23-77-30008. Влияние стратосферных процессов на приземную температуру в Арктике изучалось при поддержке проекта РНФ 24-17-00230. Расчеты с использованием химико-климатической модели SOCOLv3 выполнены при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета, исследовательский проект № 124032000025-1.

Для цитирования: Ткаченко М. А., Окуличева А. А., Симакина Т. Е. и др. Композитный анализ влияния стратосферного полярного вихря на приземную температуру в Северном полушарии // Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 21—38. doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-21-38.

Composite analysis of the stratospheric polar vortex influence on surface temperature in the northern hemisphere

*Margarita A. Tkachenko^{1, 2}, Arina A. Okulicheva¹, Tatiana E. Simakina¹,
Vladimir A. Zubov², Evgeny V. Rozanov², Sergey P. Smyshlyaev¹*

¹ Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia,
smshl@rshu.ru

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Summary. This study presents a composite analysis of the stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere surface temperature using the SOCOLv3 chemistry-climate model for 1980—2020. Seven climate scenarios were analyzed, isolating effects of ozone-depleting substances (ODS), greenhouse gases (GG), solar activity (Solar), sea surface temperature (SST), volcanic aerosols (Aero), and their combinations (Clim, All_var). For each scenario, 10 winters with extreme vortex states were selected based on polar cap temperature at 10 hPa.

Statistically significant temperature response ($p < 0.05$) covers 6—32 % of the Northern Hemisphere, varying by scenario. The SST scenario shows maximum response area (32.2 %) with coherent cooling over the North Atlantic (up to -2 K), while Clim shows minimum (6.1 %). Regional anomalies reach ± 2 —3 K in significant areas.

Scenarios with anthropogenic factors (ODS, GG) exhibit warming over continental regions during strong vortex phases. Inter-scenario agreement is highest in the North Atlantic sector (five of seven scenarios show consistent cooling) and minimal over Eurasia. Agreement in identifying extreme winters reached 40 % (strong vortex) and 50 % (weak vortex). Results demonstrate that climate factors qualitatively modify stratosphere-troposphere coupling structure, with oceanic processes providing the most spatially coherent response.

Keywords: stratospheric polar vortex, surface air temperature, composite analysis, climate scenarios, stratosphere-troposphere coupling, North Atlantic Oscillation, SOCOLv3, chemistry-climate model, sub-seasonal forecast

Acknowledgments: This work was carried out at the Russian State Hydrometeorological University within the framework of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project FSZU-2026-0003). The analysis of meteorological conditions on surface temperature was carried out within the framework of the RSF project 23-77-30008. The study of stratospheric processes on surface temperature in the Arctic was studied with the support of the RSF project 24-17-00230. Calculations using the SOCOLv3 chemistry-climate model were carried out with the support of St. Petersburg University, research project No. 124032000025-1.

For citation: Tkachenko M. A., Okulicheva A. A., Simakina T. E. et al. Composite analysis of the stratospheric polar vortex influence on surface temperature in the northern hemisphere *Atlantic Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(82):(21—38). doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-21-38. (In Russ.).

Введение

Стратосферный полярный вихрь представляет собой крупномасштабную циркуляционную систему, формирующуюся в зимний период над полярными регионами на высотах 10—50 км и оказывающую существенное влияние на погоду и климат средних широт [1]. Связь между состоянием стратосферного вихря и

приземными погодными условиями привлекает значительное внимание научного сообщества в контексте улучшения прогнозов погоды на субсезонных временных масштабах, поскольку стратосфера обладает более долгой «памятью» по сравнению с тропосферой [2, 3]. Изменчивость полярного вихря совместно с такими экстремальными событиями как внезапные стратосферные потепления (ВСП) может приводить к формированию устойчивых аномалий температуры и осадков в Северном полушарии, сохраняющихся в течение нескольких недель [4].

Недавние исследования показали, что интенсивность полярного вихря определяет характер взаимодействия между стратосферой и тропосферой на субсезонных и сезонных временных масштабах в зимне-весенний период [3]. Предполагается, что механизм этого взаимодействия реализуется через модуляцию Североатлантического колебания (NAO) и других мод атмосферной изменчивости [5]. Температурные аномалии полярной шапки тесно коррелируют с аномалиями высоты геопотенциала в тропосфере, что обеспечивает эффективный механизм стратосферно-тропосферного взаимодействия [4]. Во время ВСП температура над полярной шапкой может возрастать на десятки градусов в течение нескольких дней [6], что позволяет рассматривать стратосферную температуру полярной шапки в качестве чувствительного индикатора экстремальных событий в тропосфере.

Несмотря на значительный прогресс в понимании стратосферно-тропосферного взаимодействия, остается недостаточно изученным вопрос об относительном вкладе различных климатических факторов в формирование взаимодействия между стратосферой и тропосферой. Солнечная активность, вулканические извержения, антропогенные выбросы парниковых газов и озоноразрушающих веществ, а также естественная изменчивость океанических процессов — каждый из этих факторов может модулировать интенсивность полярного вихря через различные физические механизмы [3]. Однако большинство предыдущих исследований рассматривали либо данные реанализов, где все факторы учитываются одновременно, либо результаты отдельных идеализированных экспериментов. Систематического сравнения влияния различных климатических факторов на стратосферно-тропосферное взаимодействие с использованием единой модельной платформы до настоящего времени не проводилось.

Целью настоящего исследования является выявление и количественная оценка относительного вклада различных климатических факторов в формирование взаимодействия между стратосферным полярным вихрем и приземной температурой в Северном полушарии. Научная новизна работы заключается в использовании композитного анализа семи климатических модельных сценариев, что позволяет впервые изолировать и сопоставить эффекты отдельных факторов воздействия (озон, парниковые газы, солнечная активность, океан, вулканы) в рамках единого методологического подхода. Особое внимание уделяется выявлению временных масштабов отклика (синхронного относительно задержанного) и пространственной структуры температурных аномалий в различных секторах Северного полушария.

Методика исследования

Модель и данные

В работе использованы результаты численных экспериментов с химико-климатической моделью SOCOLv3 (SOCOL version 3) [7] за период с 1980 г. по 2020 г. Модель представляет собой комбинацию модели общей циркуляции атмосферы ECHAM5 и химического модуля MEZON (Model for Evaluation of oZONe trends) и имеет горизонтальное разрешение T42 с 39 вертикальными уровнями. Верхняя граница модельной области на высоте ~80 км позволяет адекватно воспроизводить как тропосферные, так и стратосферные процессы. Детальное описание конфигурации модели, постановки экспериментов и результатов валидации приведено в [8].

Анализировались результаты семи численных экспериментов, каждый из которых учитывал отдельное влияние определенного фактора или комбинацию нескольких факторов на климатическую систему (табл. 1). Для оценки относительного воздействия этих факторов для каждого сценария было проведено моделирование с 1980 г. по 2020 г. При этом изменчивость каждого фактора (1—7) в отдельном сценарии учитывалась индивидуально, в то время как все остальные факторы были зафиксированы на уровне 1980 г. Также был проведен базовый эксперимент (BASE), учитывающий одновременное влияние всех факторов.

Таблица 1

Описание численных экспериментов SOCOLv3
Description of numerical experiments SOCOLv3

Эксперимент	ODS	SST/SIC	GG	SSI	SSA	NOx	Описание
BASE	+	+	+	+	+	+	Все факторы изменяются
ODS	+	–	–	–	–	–	Только ODS изменяются
GG	–	–	+	–	–	–	Только GG изменяются
SST	–	+	–	–	–	–	Только SST/SIC изменяются
SSI	–	–	–	+	–	–	Только солнечная радиация изменяется
SSA	–	–	–	–	+	–	Только стратосферный аэрозоль изменяется
CLIM	–	+	+	–	–	–	GG и SST/SIC изменяются
NOx	–	–	–	–	–	+	Только NOx эмиссии изменяются

Примечание: «+» означает изменяющийся фактор; «–» означает фактор, зафиксированный на уровне 1980 года.

Граничные условия и источники данных

Граничные условия для большинства рассматриваемых факторов соответствовали базе данных input4MIPs [9]. Все воздействия до 2018 г. основывались на наблюдениях и переходили на сценарий IPCC SSP2-4.5 после 2018 г. Конкретные источники данных:

1. Озоноразрушающие вещества (ODS): приповерхностные отношения смеси хлор- и бромсодержащих ODS (CFC-11, CFC-12, HCFC-22, галоны) были взяты из [10].

2. Парниковые газы (GG): отношения смеси CO, CH₄ и N₂O у поверхности основаны на данных input4MIPs [9].

3. Спектральное солнечное излучение (SSI): среднемесячные значения спектральной солнечной радиации для каждого года с 1980 г. по 2020 г. были получены из [9]. Данные учитывали спектральное изменение солнечной активности, характеризующееся одиннадцатилетним циклом, при этом амплитуда колебаний УФ-излучения на длине волны 205 нм составляла до ~30% между минимумом и максимумом цикла.

4. Стратосферный аэрозоль (SSA): содержание стратосферного сульфатного аэрозоля учитывало крупные вулканические извержения Эль-Чичон (март 1982 г.) и Пинатубо (июнь 1991 г.). Площадь поверхности аэрозоля на уровне 70 гПа увеличивалась до 5 раз относительно фонового уровня после извержения Эль-Чичон и до 8 раз после извержения Пинатубо [9].

5. Температура поверхности океана (SST) и площадь покрытия океана морским льдом (SIC): данные о SST и SIC основаны на реанализе MetOffice HadISST [11]. SST демонстрировала общую тенденцию к повышению с выраженной межгодовой изменчивостью, связанной с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

6. Климатический сценарий (CLIM): комбинация изменений GG и SST/SIC, позволяющая оценить совместный эффект антропогенного потепления.

7. Эмиссии оксидов азота (NO_x): приповерхностные эмиссии NO_x и CO на основе данных input4MIPs [9].

Влияние квазидвухлетнего колебания (QBO) и Эль-Ниньо — Южного колебания (ENSO) на стратосферный полярный вихрь учитывалось косвенно через изменения температуры поверхности океана (SST) и динамические обратные связи в модели [12]. Недавние исследования показали, что совместное воздействие западной фазы QBO и условий Ла-Нинья способствует усилению полярного вихря через модуляцию планетарных волн [12, 13].

Расчет индекса интенсивности полярного вихря

В качестве индикатора интенсивности стратосферного полярного вихря использовалась температура полярной шапки (65°—90° с.ш.) на уровне 10 гПа (~30 км). Для каждого года рассчитывалось среднее значение за три зимних месяца (январь-февраль-март). Следует заметить, что динамическое воздействие полярных стратосферных процессов на тропосферу, как правило, происходит на временных масштабах в несколько недель, однако в данном исследовании рассматривались межгодовые тенденции, характерные для всего сезона, поэтому осреднение осуществлялось за три месяца. Выбор этого индекса обусловлен его физической связью с интенсивностью циркуляции через термический ветровой баланс: низкие температуры указывают на сильный меридиональный градиент температуры и интенсивные западные ветры (сильный вихрь), высокие температуры — на ослабленную циркуляцию (слабый вихрь). Аналогичные температурные индексы широко используются в современных исследованиях стратосферной динамики [14—17].

Композитный анализ

Для каждого из семи сценариев независимо проводился отбор экстремальных зим. Из 41 года периода с 1980 г. по 2020 г. отбирались 10 зим с наименьшими значениями температуры полярной шапки (композит «сильный вихрь») и 10 зим с наибольшими значениями (композит «слабый вихрь»). Размер выборки в 10 зим (около 24 % от общего числа) был выбран эмпирически, исходя из необходимости обеспечить, с одной стороны, достаточную экстремальность событий, а с другой — статистическую надежность композитов приземной температуры.

Для оценки влияния полярного вихря на тропосферу рассчитывалась разность приземной температуры (уровень 1000 гПа) между композитами:

$$\Delta T = T_{\text{(сильный вихрь)}} - T_{\text{(слабый вихрь)}}$$

Отрицательные значения ΔT соответствуют охлаждению при усилении вихря, положительные — потеплению. Композиты рассчитывались для двух временных окон: январь-март (синхронный отклик, совпадает с периодом идентификации экстремальных зим) и февраль-апрель (задержанный отклик с временным лагом 1 месяц). Такой подход позволяет выявить как непосредственный, так и отложенный эффект зимней стратосферной циркуляции на приземные температуры.

Результаты исследований

Межсценарное распределение экстремальных зим

Применение композитного анализа к семи климатическим сценариям привело к формированию четырнадцати независимых выборок экстремальных зим (по две на каждый сценарий). Результаты отбора (рис. 1) демонстрируют различную степень межсценарного согласия, что отражает специфику влияния различных климатических факторов на стратосферную циркуляцию.

Для сильного вихря (рис. 1, *а*) 40 % отобранных лет присутствуют минимум в двух сценариях, при этом 10 % лет демонстрируют согласие трех и более сценариев. Для слабого вихря (рис. 1, *б*) эти показатели выше: 50 % и 15 % соответственно. Более высокая согласованность для слабого вихря может быть связана с тем, что дестабилизация полярного вихря часто инициируется мощными волновыми событиями, которые проявляются независимо от фоновых условий, тогда как формирование устойчиво сильного вихря требует благоприятного сочетания нескольких факторов.

Наибольшая межсценарная согласованность для сильного вихря наблюдается в период с 1985 г. по 1988 г. Год 1987 идентифицирован в четырех сценариях одновременно (Solar, SST, All_var, Clim), что указывает на согласованность внешних факторов воздействий: высокой солнечной активности, океанической конфигурации фазы Ла-Нинья и фоновых трендов парниковых газов. Год 2020 присутствует в двух сценариях (SST и ODS), что согласуется с опубликованными наблюдениями рекордно сильного полярного вихря зимой 2019/2020 [18].

Для слабого вихря характерна более выраженная роль отдельных событий. Годы 1998 и 2016 идентифицированы в сценариях SST, Clim и All_var — оба года

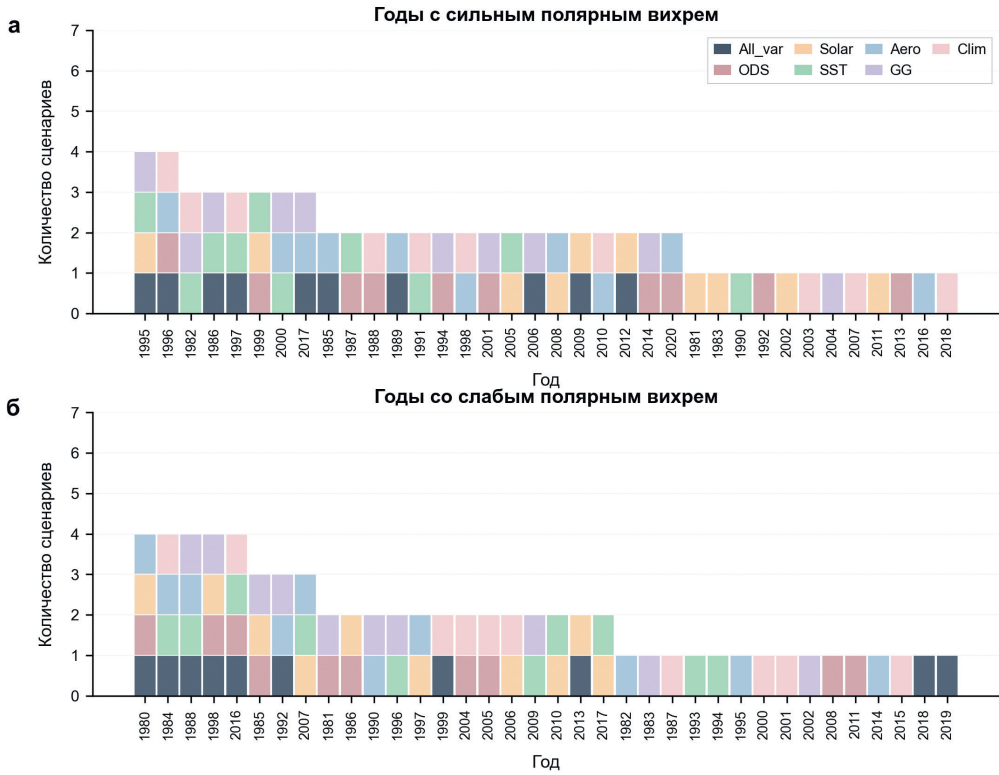


Рис. 1. Межсценарное распределение отобранных экстремальных зим за период с 1980 г. по 2020 г.

а) Годы с сильным полярным вихрем (нижние 10 по температуре полярной шапки 65°–90° с.ш. на уровне 10 гПа для каждого сценария). б) Годы со слабым полярным вихрем (верхние 10 по температуре полярной шапки). Высота столбца показывает количество сценариев, идентифицировавших данный год как экстремальный. Цвета соответствуют различным климатическим сценариям: All_var (темно-синий), Solar (оранжевый), Aero (голубой), Clim (розовый), ODS (красный), SST (зеленый), GG (сиреневый).
Годы с высотой столбца ≥ 3 указывают на высокую межсценарную согласованность.

Fig. 1. Inter-scenario distribution of selected extreme winters for the period 1980–2020.

а) Years with a strong polar vortex (the lowest 10 years by polar cap temperature at 65°–90° N and 10 hPa for each scenario). б) Years with a weak polar vortex (the highest 10 years by polar cap temperature).
The bar height indicates the number of scenarios that identified a given year as extreme.
Colors correspond to different climate scenarios: All_var (dark blue), Solar (orange), Aero (light blue), Clim (pink), ODS (red), SST (green), GG (lilac).
Years with bar height ≥ 3 indicate high inter-scenario agreement.

ассоциируются с сильными событиями Эль-Ниньо, влияние которого на ослабление полярного вихря через усиление планетарных волн хорошо документировано. Год 1992 представлен в четырех сценариях (All_var, Aero, Clim, ODS), что прямо указывает на роль стратосферных аэрозолей после извержения вулкана Пинатубо в 1991 г.

Сценарий All_var демонстрирует ряд лет (1986 г., 1989 г., 1995—1997 гг. для слабого вихря), которые слабо представлены в изолированных сценариях. Это может свидетельствовать о нелинейных эффектах взаимодействия факторов, когда несколько воздействий умеренной интенсивности в совокупности приводят к экстремальному состоянию вихря.

Статистические характеристики температуры полярной шапки

Статистический анализ температуры полярной шапки за период с 1980 г. по 2020 г. выявляет существенные различия в характеристиках стратосферной циркуляции между климатическими сценариями (табл. 2). Среднее значение температуры варьирует в диапазоне от 214,1 К (сценарий GG) до 216,9 К (сценарий SST), что отражает различия в базовом радиационном режиме стратосферы при учёте различных климатических факторов.

Таблица 2

Статистические характеристики температуры полярной шапки (65°—90° с.ш., 10 гПа) по сценариям за период с 1980 г. по 2020 г.

Statistical characteristics of polar cap temperature (65°—90° N, 10 hPa) under the scenarios for the period 1980—2020

Сценарий	Среднее (К)	Ст. откл. (К)	μ (Сильный) (К)	μ (Слабый) (К)	ΔT (К)
All_var	215,6	3,1	211,5	219,5	8,0
ODS	214,3	2,7	210,5	217,7	7,1
Solar	215,8	3,0	211,9	219,9	7,9
SST	216,9	3,7	211,7	221,3	9,6
Aero	216,2	3,0	212,6	220,4	7,8
GG	214,1	3,1	210,0	218,2	8,2
Clim	216,0	2,4	212,6	218,8	6,2

Примечание. Температура усреднена по зимним месяцам (январь-февраль-март). μ (Сильный) — средняя температура для 10 зим с наиболее низкой температурой полярной шапки (сильный вихрь); μ (Слабый) — средняя температура для 10 зим с наиболее высокой температурой (слабый вихрь); ΔT — контраст между группами. Экстремальные значения в каждом столбце выделены жирным шрифтом.

Сценарий SST демонстрирует наибольшую межгодовую изменчивость температуры полярной шапки (стандартное отклонение $\sigma = 3,7$ К) и максимальный контраст между экстремальными состояниями вихря ($\Delta T = 9,6$ К). Это указывает на высокую чувствительность стратосферной циркуляции к океаническим процессам, которые модулируют как среднее состояние полярного вихря, так и частоту его экстремальных флуктуаций. Океанические аномалии влияют на распространение планетарных волн из тропосферы в стратосферу, что и определяет высокую изменчивость вихря в этом сценарии.

Сценарии ODS и GG характеризуются наиболее холодной стратосферой в среднем (214,3 К и 214,1 К соответственно) и демонстрируют экстремально низкие температуры для группы сильного вихря (210,5 К и 210,0 К). Это согласуется

с радиационными эффектами озонового истощения и роста концентрации CO_2 , которые охлаждают стратосферу и потенциально усиливают полярный вихрь. Примечательно, что сценарий GG также показывает один из наибольших контрастов между группами ($\Delta T = 8,2$ К), что подтверждает гипотезу об усилении стратосферной изменчивости в условиях роста концентрации парниковых газов и восстановления озонового слоя.

Напротив, сценарий *Clim* демонстрирует наименьшую изменчивость ($\sigma = 2,4$ К) и минимальный контраст ($\Delta T = 6,2$ К). Это может отражать стабилизирующее влияние долгосрочных океанических трендов на стратосферную динамику: медленные изменения температуры поверхности океана создают устойчивый фоновый паттерн волновой активности, который подавляет экстремальные отклонения полярного вихря.

Сценарий *All var* занимает промежуточное положение по всем статистическим характеристикам (среднее $215,6$ К, $\sigma = 3,1$ К, $\Delta T = 8,0$ К). Отсутствие экстремальных значений в этом сценарии может свидетельствовать о частичной компенсации эффектов различных климатических факторов при их одновременном действии.

Критически важным является тот факт, что контраст температур между группами сильного и слабого вихря составляет от $6,2$ К до $9,6$ К для всех сценариев. Это обеспечивает достаточный термический контраст для надёжной идентификации экстремальных состояний полярного вихря и позволяет уверенно интерпретировать последующие различия в приземной температуре как следствие именно различий в стратосферной циркуляции, а не статистического шума.

Меридиональная структура температурного отклика

Анализ меридионального распределения температурного отклика на экстремальные состояния стратосферного полярного вихря выявляет существенную широтную неоднородность и её зависимость от временного лага (рис. 2). Для количественной оценки пространственной структуры отклика территория Северного полушария разделена на три широтные зоны: полярную (60° — 90° с.ш.), средние широты (30° — 60° с.ш.) и всё полушарие (30° — 90° с.ш.).

При нулевом временном лаге (синхронный отклик, январь-март) большинство сценариев демонстрирует либо слабую связь между состоянием полярного вихря и приземной температурой, либо выраженную зональную асимметрию отклика. Сценарий SST показывает наиболее интенсивный синхронный отклик с охлаждением полярной зоны на $1,4$ К при сильном вихре, что сопровождается умеренным охлаждением средних широт ($-0,4$ К). Это указывает на быструю реакцию атмосферной циркуляции на океанические аномалии: изменения температуры поверхности океана модифицируют распространение планетарных волн, что практически мгновенно влияет на связь между стратосферой и тропосферой.

Сценарии ODS и GG показывают потепление полярной зоны при сильном вихре ($+0,5$ К и $+1,0$ К соответственно). Это поведение может быть связано с нелинейными радиационными эффектами озоновой динамики и парниковых газов.

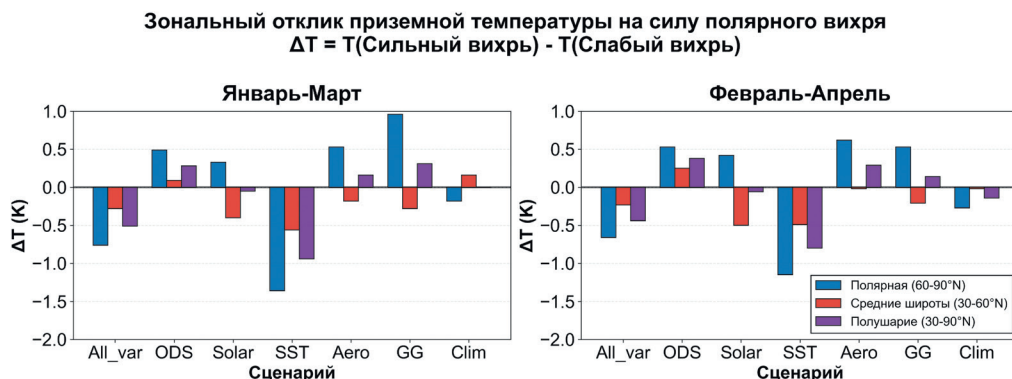


Рис. 2. Зональный отклик приземной температуры (1000 гПа) на экстремальные состояния стратосферного полярного вихря.

Показана разность $\Delta T = T_{(\text{сильный вихрь})} - T_{(\text{слабый вихрь})}$ для трёх широтных зон: полярная (60°—90° с.ш., синий), средние широты (30°—60° с.ш., красный) и всё полушарие (30°—90° с.ш., фиолетовый).

Левая панель — синхронный отклик (январь-март), правая панель — задержанный отклик (февраль-апрель). Отрицательные значения соответствуют охлаждению при сильном вихре, положительные — потеплению. Дипольная структура аномалий (противоположные знаки для полярной зоны и средних широт) отражает механизм Североатлантического колебания.

Fig. 2. Zonal response of near-surface air temperature (1000 hPa) to extreme states of the stratospheric polar vortex.

Shown is the difference $\Delta T = T_{(\text{strong vortex})} - T_{(\text{weak vortex})}$ for three latitudinal bands: the polar region (60°—90° N, blue), the midlatitudes (30°—60° N, red), and the entire hemisphere (30°—90° N, purple). The left panel shows the synchronous response (January-March), and the right panel shows the lagged response (February-April). Negative values correspond to cooling during a strong vortex, while positive values indicate warming. The dipolar structure of the anomalies (opposite signs in the polar region and midlatitudes) reflects the mechanism of the North Atlantic Oscillation.

Антропогенное озоновое истощение и рост концентрации CO₂ не только охлаждают стратосферу, но и изменяют базовое состояние атмосферы, модифицируя тем самым классические механизмы стратосферно-тропосферного взаимодействия. В частности, изменение вертикального градиента температуры может приводить к перестройке путей распространения волн и, как следствие, к инверсии знака отклика в полярных регионах.

Сценарий All_var демонстрирует умеренное полярное охлаждение (−0,8 К) при практически нулевом отклике на средних широтах, что отражает частичную компенсацию различных факторов при их одновременном действии. Сценарии Solar, Aero и Clim показывают близкие к нулю или слабо выраженные аномалии, что указывает на отсутствие систематического синхронного влияния вихря на приземную температуру в этих конфигурациях.

При временном лаге в один месяц (задержанный отклик, февраль-апрель) наблюдается качественное изменение пространственной структуры отклика. Практически все сценарии демонстрируют усиление или проявление дипольной структуры аномалий, характерной для механизма Североатлантического колебания:

охлаждение/потепление в одной зоне сопровождается противоположным по знаку откликом в другой зоне. Сценарий SST сохраняет наиболее интенсивный отклик с полярным охлаждением $-1,2$ К, что подтверждает устойчивость океанического влияния на стратосферно-тропосферное взаимодействие на субсезонных временных масштабах.

Критически важным результатом является изменение поведения сценария All_var: полярное охлаждение сохраняется на уровне $-0,7$ К, но средние широты демонстрируют переход к слабому охлаждению ($-0,1$ К), что формирует более однородную структуру отклика по сравнению с нулевым лагом. Это может свидетельствовать о том, что при одновременном действии нескольких факторов для проявления полноценного стратосферно-тропосферного взаимодействия требуется больше времени.

Сценарий ODS демонстрирует усиление аномального полярного потепления до $+0,5$ К при потеплении средних широт ($+0,3$ К), что указывает на систематическое нарушение классической связи вихрь-температура в условиях антропогенного озонового истощения. Сценарий Aero показывает качественное изменение отклика: переход от слабых разнонаправленных аномалий при нулевом лаге к выраженной дипольной структуре с полярным потеплением ($+0,6$ К) и охлаждением средних широт ($-0,1$ К) при лаге в один месяц. Это может отражать специфику влияния вулканических аэрозолей на временные масштабы стратосферно-тропосферного взаимодействия: аэрозоли изменяют радиационный режим и устойчивость атмосферы, что задерживает и модифицирует проявление стратосферного сигнала в тропосфере.

Диапазон межсценарной изменчивости полярного отклика составляет от $-1,4$ К до $+1,0$ К при нулевом лаге и от $-1,2$ К до $+0,6$ К при лаге в один месяц. Для средних широт диапазон существенно меньше: от $-0,4$ К до $+0,2$ К, что указывает на большую устойчивость тропосферной циркуляции на средних широтах к прямому стратосферному форсингу. Это можно объяснить тем, что на средних широтах тропосферная динамика в большей степени определяется местными процессами (бароклинная неустойчивость, орография, контрасты суша-океан), тогда как полярные регионы более чувствительны к стратосферным возмущениям из-за меньшей роли локальных факторов.

Анализ зональной структуры подтверждает, что временная задержка в 1—2 месяца является критической для проявления систематической связи между состоянием полярного вихря и приземной температурой в большинстве сценариев. Исключением является сценарий SST, демонстрирующий устойчивый отклик на обоих временных масштабах, что связано с инерционностью океанической системы и её способностью поддерживать аномалии атмосферной циркуляции на субсезонных временных масштабах.

Пространственное распределение температурных аномалий

Композитные карты разности приземной температуры между периодами с сильным и слабым стратосферным полярным вихрем выявляют выраженную региональную неоднородность отклика при синхронном взаимодействии

(январь-март, рис. 3). Статистически значимые аномалии ($p < 0,05$) охватывают от 2 до 32 % территории Северного полушария в зависимости от сценария, что указывает на локализованный характер стратосферно-тропосферного взаимодействия. Сценарий SST демонстрирует максимальную площадь значимого отклика (32,2 %), тогда как сценарий Clim показывает минимальную (6,1 %), что подтверждает ведущую роль океанических процессов в формировании устойчивых температурных аномалий. В областях статистически значимого отклика амплитуда локальных аномалий достигает ± 2 — 3 К, что существенно превышает средние по полушарию значения (см. рис. 2).

При синхронном отклике (январь-март, рис. 3) наиболее обширные статистически значимые аномалии наблюдаются в Североатлантическом секторе.

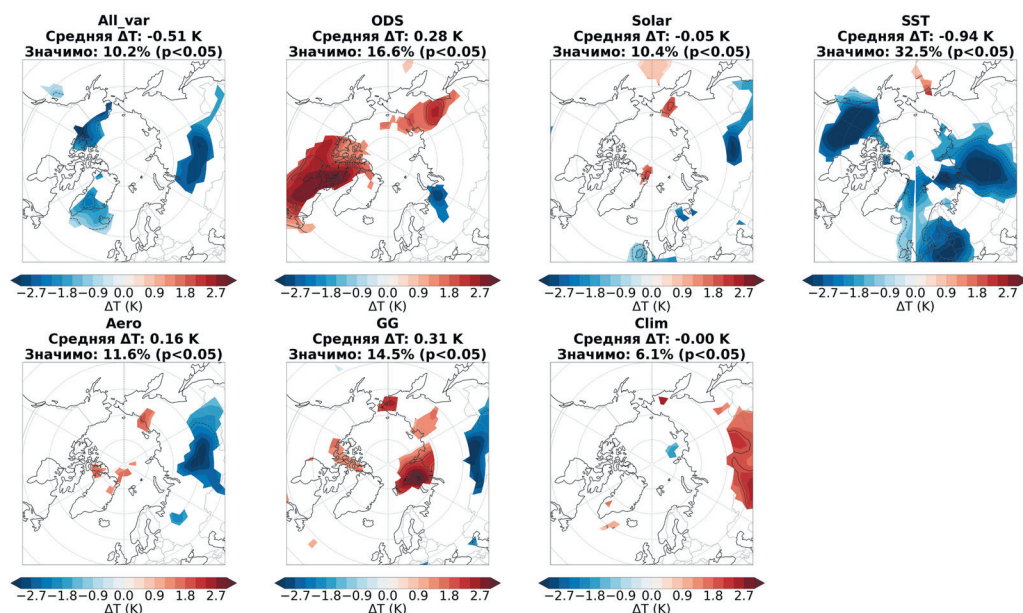


Рис. 3. Композитные карты разности приземной температуры (уровень 1000 гПа) между периодами с сильным и слабым стратосферным полярным вихрем при синхронном отклике (январь-март).

Показана разность $\Delta T = T_{\text{(сильный вихрь)}} - T_{\text{(слабый вихрь)}}$ для семи климатических сценариев.

Синие оттенки соответствуют охлаждению при сильном вихре, красные — потеплению.

Над каждой панелью указано среднее значение ΔT по Северному полушарию (30° — 90° с.ш.).

Чёрные изолинии показывают контуры аномалий с шагом 1 К.

Цветом отражены только значимые изменения ($p < 0,05$).

Fig. 3. Composite maps of near-surface air temperature differences (1000 hPa) between periods with a strong and a weak stratospheric polar vortex for the synchronous response (January-March).

The difference $\Delta T = T_{\text{(strong vortex)}} - T_{\text{(weak vortex)}}$ is shown for seven climate scenarios. Blue shading indicates cooling during a strong vortex, while red shading indicates warming. Above each panel,

the hemispheric-mean ΔT over the Northern Hemisphere (30° — 90° N) is indicated. Black contour lines show anomaly contours with a 1 K interval. Only significant changes ($p < 0,05$) are shown in color.

Сценарий SST демонстрирует максимальную площадь значимого отклика среди всех сценариев (32,2 %) с формированием когерентной области интенсивного охлаждения, распространяющейся от Северной Атлантики до Баренцева моря (до -2 К). Сценарий All_var показывает умеренную площадь значимости (16,4 %) с фрагментированными областями охлаждения над Северной Атлантикой и Скандинавией (до $-1,5$ К). Сценарий Solar, несмотря на визуально выраженные аномалии на картах, характеризуется низкой статистической значимостью (10,4 %), что указывает на высокую межгодовую изменчивость солнечного влияния на стратосферно-тропосферную связь.

Доминирование сценария SST по площади статистически значимого отклика указывает на критическую роль океанических процессов в формировании устойчивых региональных температурных аномалий. Аномалии температуры поверхности океана формируют распространение атлантических циклонов и создают устойчивые градиенты на границе океан-атмосфера, что обеспечивает пространственную когерентность и статистическую надёжность температурного отклика на субсезонных временных масштабах.

Континентальная Евразия демонстрирует высокую межсценарную изменчивость с фрагментированной структурой статистически значимых аномалий. Аномальное поведение сценариев ODS и GG показывает статистически значимое потепление при сильном полярном вихре вместо ожидаемого охлаждения. Сценарий ODS демонстрирует локализованные области интенсивного потепления над Восточной Европой и Западной Сибирью (до $+2,5$ К), при этом площадь статистически значимого отклика составляет 16,1 %. Сценарий GG показывает сходный паттерн с площадью значимости 14,5 % и интенсивными положительными аномалиями над Восточной Сибирью (до $+2$ К).

Это аномальное поведение указывает на качественную модификацию механизмов стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия под влиянием антропогенных факторов. Антропогенное истощение озонового слоя (ODS) и рост концентрации парниковых газов (GG) не только охлаждают стратосферу (см. табл. 2), но и изменяют радиационный баланс и характер распространения планетарных волн, что приводит к инверсии знака регионального температурного отклика по сравнению с естественными сценариями. Сценарии *Solar* (10,4 % значимости) и *Aero* (13,6 %) демонстрируют фрагментированную структуру с чередованием областей потепления и охлаждения вдоль Евразийского континента, что отражает мозаичный характер влияния этих факторов на стратосферную динамику.

Североамериканский континент и северная часть Тихого океана характеризуются минимальной площадью статистически значимого отклика среди всех рассматриваемых регионов. В большинстве сценариев над Северной Америкой наблюдаются фрагментированные области слабых аномалий ($\pm 0,5$ — $1,0$ К), не достигающие статистической значимости. Это может отражать конкурирующее влияние локальных факторов — орографии Скалистых гор и океанических аномалий, связанных с ENSO и междекадной изменчивостью Тихого океана, что подавляет формирование устойчивого регионального отклика на стратосферное

воздействие. Систематически меньшая площадь значимых аномалий в Тихоокеанско-Североамериканском секторе по сравнению с Атлантическим подтверждает доминирующую роль Североатлантического колебания как основного механизма трансляции стратосферных аномалий в тропосферу.

Центральная Арктика (полюс и прилегающие акватории Северного Ледовитого океана) характеризуется высокой зональной неоднородностью с фрагментированной структурой статистически значимых аномалий. Сценарии All_var и SST демонстрируют отдельные области значимого потепления в арктических секторах при сильном вихре, что может отражать усиление адвекции тепла из средних широт при положительной фазе кольцевой моды. Однако общая площадь значимых аномалий в Арктике остаётся ограниченной, что указывает на высокую межгодовую изменчивость арктического отклика и его зависимость от конкретной конфигурации стационарных планетарных волн.

Количественная оценка межсценарной согласованности выявляет, что только 20—30 % территории Северного полушария демонстрирует согласованный по знаку отклик в большинстве (≥ 5) сценариев. Наибольшая согласованность наблюдается в Североатлантическом секторе, где 5 сценариев (All_var, Solar, SST, Aero, Clim) показывают области охлаждения при сильном вихре, тогда как ODS и GG демонстрируют аномальное потепление. Над континентальной Евразией согласованность минимальна: присутствуют как сценарии с доминированием значимого охлаждения (All_var, SST), так и сценарии с преобладанием потепления (ODS, GG). Это отражает высокую чувствительность континентальных регионов к различным климатическим факторам.

Выявленная региональная специфика и высокая межсценарная изменчивость статистически значимого отклика подчёркивают, что влияние стратосферного полярного вихря на приземный климат не является глобально-однородным процессом, а определяется сложным взаимодействием стратосферного воздействия с региональными особенностями циркуляции и особенностями климатических факторов. Различия в площади статистически значимых аномалий между сценариями отражают роль конкретных климатических драйверов в модуляции стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия: океанические процессы (SST) обеспечивают максимальную площадь устойчивого отклика (32,2 %), тогда как комбинация долгосрочных трендов (Clim) не создаёт условий для формирования систематической связи (6,1 %). Антропогенные факторы (ODS и GG) не просто модифицируют амплитуду отклика, но качественно изменяют его знак в континентальных регионах, что важно для понимания эволюции стратосферно-тропосферного взаимодействия в условиях антропогенного изменения климата.

Следует заметить, что стратосферно-тропосферное динамическое взаимодействие определяется не только изменчивостью полярной стратосферы, но и состоянием тропосферы: при некоторых изменениях вихря (в том числе сильных) высокая изменчивость тропосферы не позволяет выделить влияние стратосферы, а при более слабых — позволяет. Кроме того, существенное влияние на тропосферу могут оказать и динамические процессы протяженностью меньше месяца,

изучение которых в продолжение данного исследования будет проводиться на основе композитов с меньшими временными периодами.

Заключение

В проведённом исследовании количественно оценен относительный вклад различных климатических факторов в формирование влияния стратосферного полярного вихря на приземную температуру Северного полушария на основе композитного анализа семи сценариев расчетов с использованием модели SOCOLv3 за период с 1980 г. по 2020 г.

Основным результатом работы является количественная оценка площади статистически значимого температурного отклика ($p < 0,05$) на экстремальные состояния полярного вихря, которая варьирует от 6,1 % до 32,2 % территории Северного полушария в зависимости от климатического фактора. Это указывает на локализованный характер стратосферно-тропосферного взаимодействия и роль различных климатических факторов в его формировании. Межсценарное согласие в идентификации экстремальных зим составляет 40 % для сильного вихря и 50 % для слабого вихря, что демонстрирует существенную зависимость характера стратосферной циркуляции от рассматриваемого климатического воздействия.

Сравнительный анализ выявил доминирующую роль океанических процессов в формировании устойчивых температурных аномалий. Сценарий SST демонстрирует максимальную площадь статистически значимого отклика (32,2 %) с формированием согласующихся областей интенсивного охлаждения в Североатлантическом секторе (до -2 К при сильном вихре). Это связано с тем, что аномалии температуры поверхности океана модулируют траектории атлантических циклонов и создают устойчивые градиенты на границе океан-атмосфера, обеспечивая пространственную когерентность и статистическую надёжность отклика. Напротив, сценарий Clim, учитывающий комбинацию долгосрочных океанических трендов и роста концентрации парниковых газов, показывает минимальную площадь значимого отклика (6,1 %), что указывает на отсутствие систематической связи при изолированном учёте этих факторов.

Для сценариев с влиянием только антропогенных факторов (ODS и GG) результаты расчетов показали систематическое потепление континентальных регионов при сильном вихре. Это указывает на то, что антропогенное озоновое истощение и рост концентрации парниковых газов не просто модифицируют амплитуду, но качественно изменяют структуру и региональные проявления стратосферно-тропосферного взаимодействия, что согласуется с недавними модельными исследованиями [4, 12]. Инверсия знака регионального отклика в этих сценариях может быть связана с модификацией радиационного баланса стратосферы и изменением характера распространения планетарных волн.

Пространственный анализ выявил выраженную региональную особенность температурного отклика. Наибольшая межсценарная согласованность наблюдается в Североатлантическом секторе, где пять из семи сценариев демонстрируют охлаждение при сильном вихре, формируя картину, характерную для влияния

Североатлантического колебания, с амплитудой локальных статистически значимых аномалий до ± 2 — 3 К. Над континентальной Евразией межсценарная согласованность минимальна: наблюдаются как сценарии с преобладанием охлаждения (All_var, SST), так и сценарии с доминированием потепления (ODS, GG), что отражает сложное взаимодействие стратосферного воздействия с региональными факторами (орография, контрасты суша-океан, стационарные волны). Североамериканский и Тихоокеанский секторы характеризуются минимальной площадью статистически значимых аномалий, что подтверждает доминирующую роль Атлантического сектора в механизмах стратосферно-тропосферного взаимодействия.

Практическая значимость результатов определяется выявленными закономерностями факторной модуляции стратосферно-тропосферного взаимодействия. Установлено, что различные климатические факторы не только количественно, но и качественно изменяют характер связи между стратосферным полярным вихрем и приземной температурой. Результаты подтверждают необходимость комплексного учёта множественных климатических факторов при анализе стратосферно-тропосферных взаимодействий и демонстрируют важность включения стратосферных процессов в прогностические модели субсезонного масштаба. Выявленная региональная специфика отклика и критическая роль океанических процессов могут быть использованы для калибровки региональных климатических моделей и улучшения качества субсезонных прогнозов температуры, особенно в Североатлантическом секторе.

References

1. Baldwin M. P., Ayarzagüena B., Birner T. et al. Sudden stratospheric warmings. *Reviews of Geophysics*. 2021;59(1):e2020RG000708. doi: 10.1029/2020RG000708.
2. Domeisen D. I. V., Butler A. H. Stratospheric drivers of extreme events at the Earth's surface. *Communications Earth & Environment*. 2020;1(1). doi: 10.1038/s43247-020-00060-z.
3. Tian W., Huang J., Zhang J. et al. Role of stratospheric processes in climate change: Advances and challenges. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2023; 40(8):1379—1400. doi: 10.1007/s00376-023-2341-1.
4. Kim S.-J., Choi H. Polar vortex weakening and its impact on surface temperature in recent decades. *Polar Research*. 2024; 43. doi: 10.33265/polar.v43.9723.
5. Kidston J., Scaife A. A., Hardiman S. C. et al. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature Geoscience*. 2015; 8(6):433—440. doi: 10.1038/ngeo2424.
6. Baldwin M. P., Dunkerton T. J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*. 2001; 294(5542):581—584. doi: 10.1126/science.1063315.
7. Stenke A., Schraner M., Rozanov E. et al. The SOCOL version 3.0 chemistry–climate model: description, evaluation, and implications from an advanced transport algorithm. *Geoscientific Model Development*. 2013; 6(5):1407—1427. doi: 10.5194/gmd-6-1407-2013.
8. Usacheva M., Rozanov E., Zubov V. et al. Temperature and ozone response to different forcing in the lower troposphere and stratosphere. *Atmosphere*. 2024; 15(11):1289. doi: 10.3390/atmos15111289.
9. Matthes K., Funke B., Szlag M. E. et al. Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geoscientific Model Development*. 2017; 10(6):2247—2302. doi: 10.5194/gmd-10-2247-2017.
10. Fahey D., Newman P. A., Pyle J. A., et al. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*. Global Ozone Research and Monitoring Project — Report No. 58. Geneva: World Meteorological Organization, 2018: 588 p.
11. MetOffice Data. Available at: <https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst/data/download.html> (accessed on: 10.09.2025).

12. Ermakova T., Koval A., Didenko K. et al. Analyzing stratospheric polar vortex strength and persistence under different QBO and ENSO phases: Insights from the model study. *Atmosphere*. 2025; 16(12):1371. doi: 10.3390/atmos16121371
13. Didenko K. A., Koval A., Ermakova T., et al. Natural Tropical Oscillations phase impact on stationary and westward travelling planetary waves. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2025;25(20):13799—13813. doi: 10.5194/acp-25-13799-2025.
14. Baldwin M. P., Birner T., Ayarzagüena B. Tropospheric amplification of stratosphere–troposphere coupling. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2024; 150(765):5188—5205. doi: 10.1002/qj.4864.
15. Baldwin M. P., Thompson D. W. J. A critical comparison of stratosphere–troposphere coupling indices. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2009;135(644):1661—1672. doi: 10.1002/qj.479.
16. Huang J., Hitchcock P. Defining Arctic stratospheric polar vortex intensification events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2023; 128(22):e2023JD039373. doi: 10.1029/2023JD039373.
17. Kumar A., Karami K., Jacobi C. A 45-year climatological study of Arctic stratospheric polar vortex dynamics and morphology using ERA5 data (1979—2023). *Climate Dynamics*. 2025; 63(10):403. doi: 10.1007/s00382-025-07889-0.
18. Lawrence Z. D., Perlwitz J., Butler A. H., et al. The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic Oscillation and ozone loss. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020; 125(22):e2020JD033271. doi: 10.1029/2020JD033271.

Информация об авторах

Ткаченко Маргарита Александровна, инженер-исследователь лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, инженер-исследователь. Инженер лаборатория моделирования средней и верхней атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет. tkachenko_m@spbu.ru.

Окуличева Арина Андреевна, инженер лаборатории моделирования средней и верхней атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, инженер. arina-okulichева@mail.ru.

Симакина Татьяна Евгеньевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы, Российский государственный гидрометеорологический университет, tatiana.simakina@gmail.com.

Зубов Владимир Аркадьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, v.a.zubov@spbu.ru.

Розанов Евгений Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории исследований озонового слоя и верхней атмосферы, Санкт-Петербургский государственный университет, eugene.rozanov@rmodwrc.ch.

Смышляев Сергей Павлович, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, профессор, smyshl@rshu.ru.

Information about authors

Margarita A. Tkachenko, Research engineer, Lab. For Ozone Layer and Upper Atmosphere Research, St. Petersburg State University; Engineer, Lab. Of Middle and Upper Atmosphere Modeling, Russian State Hydrometeorological University.

Arina A. Okulichева, Engineer, Lab. of Middle and Upper Atmosphere Modeling, Russian State Hydrometeorological University.

Tatiana E. Simakina, PhD (Phys.-Math.), Associate professor, Dept. of Experimental Atmospheric Physics, Russian State Hydrometeorological University.

Vladimir A. Zubov, PhD (Phys.-Math.), Research fellow, Lab. for Ozone Layer and Upper Atmosphere Research, St. Petersburg State University.

Evgeny V. Rozanov, PhD (Phys.-Math.), Senior researcher, Lab. for Ozone Layer and Upper Atmosphere Research, St. Petersburg State University.

Sergey P. Smyshlyaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.) Professor, Dept. of Meteorological Forecasting, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 28.01.2026

Принята в печать 27.02.2026

The article was received on 28.01.2026

The article was accepted on 27.02.2026