Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 399–402.

УДК 551.5
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-399
ORCID: 0009-0007-9883-5004

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ПАТТЕРНЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ В ТРОПОСФЕРЕ И СТРАТОСФЕРЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ АРКТИЧЕСКОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРАЗИИ

Е.Н. Юргина[1,2], О.С. Зоркальцева[1], О.Ю. Антохина[1, 3], П.Н. Антохин[3]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия
[2]Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
[3]Институт оптики атмосферы им. В.И. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

SPATIAL PATTERNS OF TEMPERATURE ANOMALIES IN THE TROPOSPHERE AND STRATOSPHERE UNDER THE INFLUENCE OF ARCTIC WARMING IN EURASIA

Elena N. Yurgina[1,2], Olga S. Zorkaltseva[1], O.Yu. Antokhina[1, 3], P.N. Antokhin[3]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
[2]Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
[3]V.I. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

Аннотация. На фоне неравномерного повышения температуры воздуха и более быстрого потепления в Арктике происходит перестройка атмосферных процессов, затрагивающая не только приземный слой, но и вышележащие слои вплоть до стратосферы. Для анализа изменений атмосферной циркуляции в условиях потепления Арктики были рассчитаны индексы TAXE и построены карты распределения температурных аномалий на четырёх изобарических уровнях. Выявлено, что положительная фаза TAXE оказывает наибольший стратосферный отклик, приводящий к ослаблению стратосферного вихря и более длительным и устойчивым влиянием на стратосферу.

Ключевые слова: Усиление Арктики, Теплая Арктика – Холодная Евразия (TAXE), Внезапные Стратосферные Потепления (ВСП), глобальное потепление.

Abstract. Against the background of uneven air temperature rise and faster warming in the Arctic, atmospheric processes are undergoing a restructuring that affects not only the surface layer but also the upper layers up to the stratosphere. To analyze changes in atmospheric circulation under the conditions of Arctic amplification, the WACE indices were calculated and maps of temperature anomalies were constructed at four isobaric levels. It was revealed that the positive phase of WACE produces the greatest stratospheric response, leading to a weakening of the stratospheric polar vortex and a longer and more sustained influence on the atmosphere.

Keywords: Arctic amplification, Warm Arctic – Cold Eurasia (WACE), Sudden Stratospheric Warming (SSW), global warming.

ВВЕДЕНИЕ

В атмосферных процессах последних десятилетий наблюдается арктическое усиление (Arctic Amplification, AA) — потепление полярного региона, опережающее по темпам потепление всей планеты в целом [Семенов В.А., 2021; IPCC Special Report, 2019; Зоркальцева О.С. и др., 2026]. Это явление служит причиной для ослабления западного переноса воздушных масс и формирования крупномасштабных атмосферных блокирований, в частности Уральского блокинга [Luo D., 2016]. Потеря площади морского льда в Баренцевом и Карском морях вследствие потепления также способствует ослаблению струйного течения над Евразией, что создает благоприятные условия для длительного существования блокинга. Его существование создает дипольную аномалию приземных температур, известную как «Тёплая Арктика – Холодная Евразия» (TAXE; Warm Arctic – Cold Eurasia, WACE) [Tang Q., 2013, Kretschmer, M., 2018].

Уральский блокинг и аномалии приземных температур не изолированы в тропосфере, они вызывают возмущения, распространяющиеся в стратосферу. В последние десятилетия наблюдается увеличение частоты более частых слабых состояний стратосферного полярного вихря [Kretschmer, M., 2018]. Тропосферные блокирования над Уралом служат предшественником ослабления стратосферного вихря с временным лагом в 20–45 дней [Köhler et al., 2023]. В то же время над Чукотским морем и Аляской формируются области аномально низкого давления [Mariaccia et al., 2024]. Такое распределение давления способствует усилению волны с зональным числом 1 и генерации аномального потока планетарных волн, направленного в стратосферу [Köhler et al., 2023; Mariaccia et al., 2024]. Аномальный поток волновой активности, распространяющийся от поверхности в стратосферу в ноябре–декабре, приводит к ослаблению западного переноса и, как следствие, к ослаблению стратосферного полярного вихря (СПВ) [Peings, 2019; Song et al., 2023]. При ослаблении СПВ наиболее вероятно возникновение внезапных стратосферных потеплений (ВСП), которые, как известно, влияют в дальнейшем на погодные аномалии в тропосфере [Hitchcock & Simpson, 2014; Davini et al., 2014]. Стратосфера и тропосфера в зимний период являются единой связанной системой, в которой нисходящее влияние стратосферы может, как следовать за изменениями в TAXE, так и, влиять на них [Wu et al., 2018]. Таким образом, в рамках единой связанной системы стратосфера – тропосфера можно ожидать, что воздействие TAXE на стратосферу наиболее выражено в начале зимы, тогда

как нисходящее влияние ослабленного стратосферного вихря на приземные температуры и погодные аномалии приобретают большее значение во второй половине зимы [Wu et al., 2018; Zhang et al., 2023].

В настоящее время не существует консенсуса относительно влияния TAXE на динамику стратосферы. Основная причина его отсутствия – т.н. модельная зависимость, когда разные климатические модели показывают разнонаправленные результаты [Mudhar et al., 2024; Mudhar et al., 2025]. При этом влияние TAXE на стратосферу может быть асимметричным, т.е. положительная и отрицательная фазы TAXE могут приводить к разным циркуляционным паттернам и различным откликам стратосферы [Wang et al., 2022; Sun et al., 2022]. Кроме того, в некоторых работах отмечается, что наблюдаемые явления могут быть следствием естественной изменчивости атмосферы, которая нередко маскирует искомый климатический сигнал [Sun et al., 2022].

Таким образом, в связи с неопределённостью в отношении силы и направленности связей между TAXE и стратосферной динамикой настоящее исследование приобретает актуальность, поскольку направлено на уточнение механизмов взаимодействия тропосферы и стратосферы и может внести вклад в разрешение существующих противоречий.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для количественной оценки режима TAXE был рассчитан индекс с помощью разложения полей приземной температуры воздуха по данным реанализа ERA5 на эмпирические ортогональные функции для каждого месяца в период 1979–2025 гг. На основе положительных и отрицательных значений индекса были выделены годы, соответствующие фазам TAXE (теплая Арктика – холодная Евразия) и противоположной фазы XATE (холодная Арктика – тёплая Евразия). Для каждой фазы были построены композитные карты аномалий температуры и геопотенциала на изобарических уровнях 1000, 500, 100 и 10 гПа. Оценена статистическая значимость аномалий ($p < 0.05$).

Анализ проводился как для синхронных полей (TAXE октябрь – атмосфера в октябре), так и со сдвигом на один месяц (TAXE октябрь – атмосфера в ноябре). В работе были рассмотрены аномалии в октябре и ноябре, так как именно в начале зимнего сезона наиболее вероятно проследить тропосферный сигнал в стратосфере.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для положительной фазы TAXE композитные карты в октябре и ноябре отчётливо воспроизводят дипольный паттерн на 1000 гПа, наблюдаются положительные аномалии температуры над Арктикой и отрицательные – над континентальной Евразией (рис.1, 2, + WACE). Для отрицательной фазы (XATE) паттерн меняет знак, однако его пространственная когерентность ниже (рис.1, 2, – WACE). При сдвиге на один месяц положительная фаза TAXE сохраняет свою структуру (рис.1, 2, + WACE, lag mon), тогда как для XATE диполь на уровне 1000 гПа становится статистически незначимым (рис.1, 2, – WACE, lag mon).

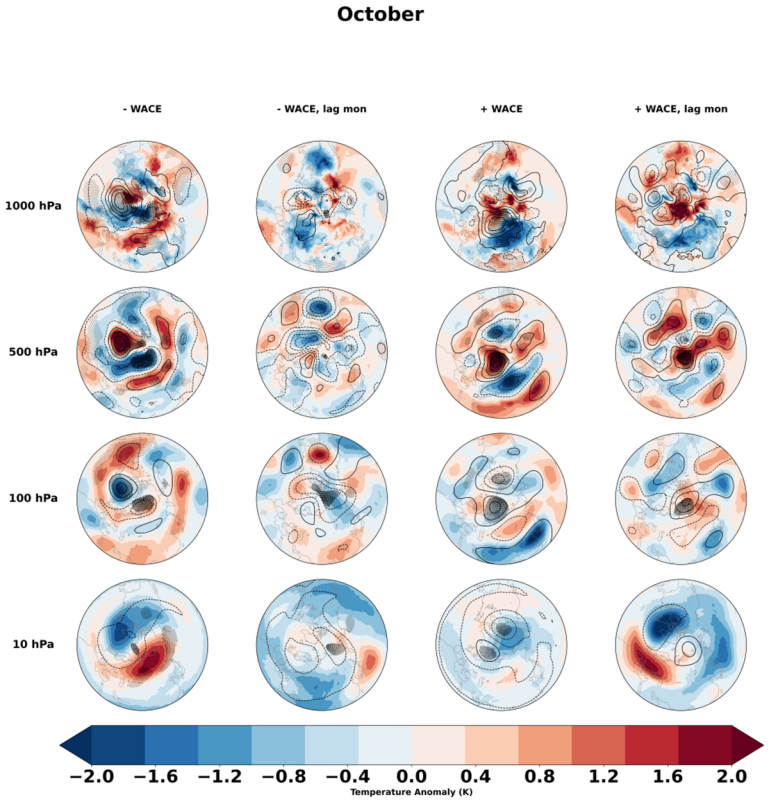

Рис. 1. Композитные распределения аномалий температуры (заливка) и высоты геопотенциала (изолинии), во время положительной фазы TAXE (+ WACE) и отрицательной фазы XATE (CAWE) в октябре и со сдвигом в один месяц (lag mon)

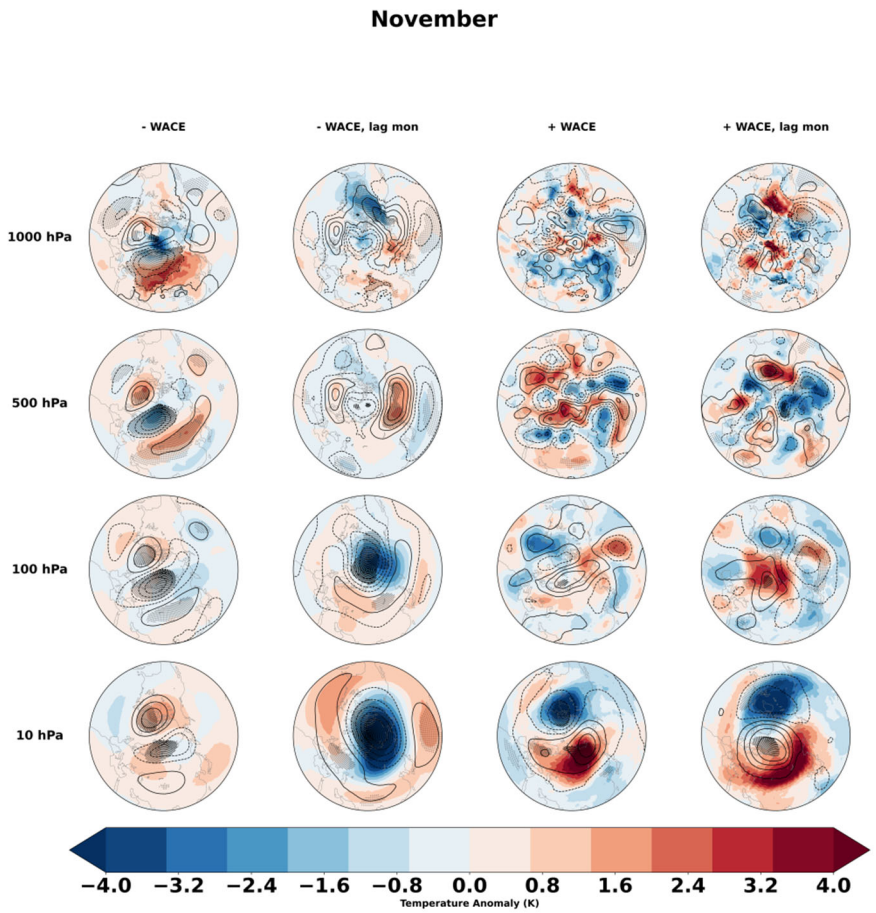

Рис. 2. Композитные распределения аномалий температуры (заливка) и высоты геопотенциала (изолинии), во время положительной фазы TAXE (+ WACE) и отрицательной фазы XATE (CAWE) в ноябре и со сдвигом в один месяц (lag mon)

В средней и верхней тропосфере (500 и 100 гПа) чётко выражен волновой пакет (с зональными числами 2–3), проявляющийся в виде знакопеременных аномалий температуры и геопотенциала. Пространственная структура волн для фаз TAXE и XATE оказывается противоположной по знаку. При TAXE наблюдаются положительные аномалии над Арктикой и отрицательные над Евразией и Северной Америкой как в октябре, так и в ноябре, при XATE знаки аномалий меняются на противоположные. Эта противофаза сохраняется и при сдвиге на месяц.

Для фазы XATE в октябре (без сдвига) формируется область положительных аномалий температуры/геопотенциала над севером Евразии и Тихим океаном, а над Америкой – отрицательные аномалии. Однако при сдвиге на месяц (т.е. стратосфера в ноябре при сильном XATE в октябре) эти аномалии становятся статистически незначимыми. Это согласуется с тем, что сам приземный паттерн XATE через месяц уже не выделяется. Для ноября XATE при сдвиге на месяц (декабрьская стратосфера) наблюдается усиление стратосферного полярного вихря (СПВ), выраженное в положительных аномалиях геопотенциала над Арктикой.

Для фазы TAXE в октябре синхронный анализ не выявляет значимых стратосферных аномалий, однако при сдвиге на месяц (ноябрьская стратосфера при сильном TAXE в октябре) появляется очаг положительных аномалий над Европой и отрицательных над Америкой – структура, аналогичная наблюдаемой при XATE, но с другим знаком. Наиболее устойчивая стратосферная сигнатура обнаружена для ноябрьской фазы TAXE, как без сдвига, так и со сдвигом (декабрь) сохраняется характерный паттерн – положительные аномалии температуры и отрицательные аномалии геопотенциала над Евразией (т.е. выше температура и ниже давление) и противоположные знаки над Америкой. Эта структура напоминает подготовительную фазу внезапных стратосферных потеплений (ВСП), когда усиление волновой активности из тропосферы приводит к ослаблению и смещению полярного вихря.

ВЫВОДЫ

В работе выполнена количественная оценка пространственных паттернов температурных и барических аномалий в тропосфере и стратосфере под влиянием арктического потепления на основе ЭОФ-индексов TAXE/XATE и композитного анализа со сдвигом по времени.

Установлено, что устойчивое и статистически значимое воздействие на стратосферу оказывает положительная фаза TAXE, тогда как отрицательная фаза XATE характеризуется слабым и быстро затухающим сигналом. Наиболее

выраженный стратосферный отклик обнаружен для ноября, при ТАХЕ в средней и верхней тропосфере формируется волновой пакет с зональными числами 2–3, который, распространяясь в стратосферу, создаёт структуру, типичную для подготовительной фазы внезапных стратосферных потеплений (положительные аномалии температуры и отрицательные аномалии геопотенциала над Евразией), что приводит к ослаблению стратосферного полярного вихря. Напротив, при фазе ХАТЕ наблюдается усиление вихря. Эффект обладает временным лагом, а именно октябрьский ТАХЕ проявляется в стратосфере только в ноябре, а ноябрьский — в декабре, что согласуется с литературными данными о лаге 20–45 дней. Таким образом, настоящее исследование подтверждает наличие связи ТАХЕ с динамикой стратосферы и предлагает набор эмпирически обоснованных тестов для валидации и улучшения климатических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю., Юргина Е.Н. Внутрисезонные изменения и пространственные паттерны влияния арктического потепления на циркуляционные и температурные аномалии в Евразии // Проблемы Арктики и Антарктики. 2026. Т. 72, № 1. С. 35–45. DOI: 10.30758/0555-2648-2026-72-1-35-5

Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 1. С. 21–33.

Davini P., Cagnazzo C., Anstey J.A. A blocking view of the stratosphere-troposphere coupling // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2014. V. 119, No. 19. P. 11100–11115. DOI: 10.1002/2014JD021742

Hitchcock P., Simpson I.R. The Downward Influence of Stratospheric Sudden Warmings // Journal of the Atmospheric Sciences. 2014. V. 71, No. 10. P. 3856–3876. DOI: 10.1175/JAS-D-14-0012.1

IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate / Pörtner H.O., Roberts D.C., Masson-Delmotte V., Zhai P., Tignor M., Poloczanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Nicolai M., Okem A., Petzold J., Rama B., Weyer N.M. (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2019. 755 p.

Köhler R.H., Jaiser R., Handorf D. How do different pathways connect the stratospheric polar vortex to its tropospheric precursors? // Weather and Climate Dynamics. 2023. V. 4. P. 1071–1086. DOI: 10.5194/wcd-4-1071-2023

Kretschmer M., Coumou D., Agel L., Barlow M., Tziperman E., Cohen J. More-Persistent Weak Stratospheric Polar Vortex States Linked to Cold Extremes // Bulletin of the American Meteorological Society. 2018. V. 99. P. 49–60. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0259.1

Luo D. Impact of Ural Blocking on Winter Warm Arctic–Cold Eurasian Anomalies. Part I: Blocking-Induced Amplification // Journal of Climate. 2016. V. 29, No. 11. P. 3925–3947. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0611.1

Mariaccia, A.; Keckhut, P.; Hauchecorne, A. Impact of Polar Vortex Modes on Winter Weather Patterns in the Northern Hemisphere // Atmosphere. 2024. V. 15. P. 1062. https://doi.org/10.3390/atmos15111388

Mori M., Watanabe M., Shiogama H., Inoue J., Kimoto M. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades // Nature Geoscience. 2014. V. 7, No. 12. P. 869–873. DOI: 10.1038/ngeo2277

Mudhar R., Seviour W.J.M., Screen J.A., Geen R., Lewis N.T., Thomson S.I. Exploring Mechanisms for Model-Dependency of the Stratospheric Response to Arctic Warming // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2024. V. 129, No. 10. e2023JD040416. DOI: 10.1029/2023JD040416

Mudhar R., Seviour W.J.M., Screen J.A., Thomson S.I., Turrell C. Diverse and Weak Simulated Stratospheric Responses to Future Arctic Sea-Ice Loss // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2025. V. 130, No. 20. e2025JD044403. DOI: 10.1029/2025JD044403

Peings Y. Ural blocking as a driver of early winter stratospheric warmings // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. P. 5360–5368. DOI: 10.1029/2019GL082097

Song Y., Yao Y., Luo D., Li Y. Loss of autumn Kara-East Siberian Sea ice intensifies winter Ural blocking and cold anomalies in high latitudes of Eurasia // Atmospheric Research. 2023. V. 295. 107038. DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107038

Sun L., Deser C., Simpson I.R., Sigmond M. Uncertainty in the winter tropospheric response to Arctic Sea ice loss: the role of stratospheric polar vortex internal variability // Journal of Climate. 2022. V. 35, No. 3. P. 1–28. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0543.1

Tang Q., Zhang X., Yang X., Francis J.A. Cold winter extremes in northern continents linked to arctic sea ice loss // Environmental Research Letters. 2013. V. 8. P. 1–6. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014036

Tyrlis E., Manzini E., Bader J., Ukita J., Nakamura H., Matei D. Ural Blocking Driving Extreme Arctic Sea Ice Loss, Cold Eurasia, and Stratospheric Vortex Weakening in Autumn and Early Winter 2016–2017 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2019. V. 124, No. 21. P. 11313–11329. DOI: 10.1029/2019JD031085

Wang T., et al. Roles of Atmospheric Variability and Arctic Sea Ice in the Asymmetric Arctic–Eurasia Temperature Connection on Subseasonal Time Scale // Journal of Climate. 2022. V. 35, No. 23. P. 1–28. DOI: 10.1175/JCLI-D-22-0315.1

Xu M., Tian W., Zhang J. et al. Important role of stratosphere-troposphere coupling in the Arctic mid-to-upper tropospheric warming in response to sea-ice loss // npj Climate and Atmospheric Science. 2023. V. 6. 9. DOI: 10.1038/s41612-023-00333-2

Zhang Y., Yin Z., Tian W., He S., Hsu P. Stratospheric precursor induces wintertime phase reversal of the “warm Arctic-cold Eurasia” pattern // Nature Communications. 2026. V. 17. 3284. DOI: 10.1038/s41467-026-70100-3