

УДК 551.513.11

Научная статья

Климатическая изменчивость стратосферно-тропосферных взаимодействий, наблюдаемая в последние десятилетия

К. А. Диденко^{1,2}, Т. С. Ермакова^{1,2}, А. И. Погорельцев^{1,2}, Е. В. Ракушина¹

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79

² Санкт-Петербургский государственный университет, 198504, г. Санкт-Петербург, ул. Ульяновская, 1

E-mail: didenko.xeniya@yandex.ru

В данной работе показано, как изменялось взаимодействие между тропосферой и стратосферой в последние десятилетия. Также оценено влияние таких явлений, как квазидвухлетнее колебание (КДК) на данное взаимодействие. Для этого было проанализировано распространение планетарных волн в атмосфере с использованием трехмерных потоков волновой активности, показана временная изменчивость потоков и линейный тренд. Кроме того, была оценена реакция тропосферы над Сибирью и Восточной Азией на КДК.

Ключевые слова: тропосфера, стратосфера, планетарные волны, поток волновой активности, квази-двухлетнее колебание

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-159-170

Поступила в редакцию: 22.10.2021

В окончательном варианте: 25.11.2021

Для цитирования. Диденко К. А., Ермакова Т. С., Погорельцев А. И., Ракушина Е. В. Климатическая изменчивость стратосферно-тропосферных взаимодействий, наблюдаемая в последние десятилетия // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2021. Т. 37. № 4. С. 159-170. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-159-170

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Диденко К. А. и др., 2021

Введение

Вопросы о стратосферно-тропосферном взаимодействии и роли планетарных волн в данном взаимодействии уже давно занимают центральное место в работах по атмосферной динамике. Это обуславливается влиянием вариаций стратосферных параметров на погоду и климатические изменения, а также распределение озона и других химических веществ [1]-[2]. Генерируемые орографией и разницей нагрева между океанами и материками, планетарные волны распространяются в стратосферу и влияют на среднезональный поток и температуру средней атмосферы. В работе

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2020-0009.

[3] был проведен анализ климатической изменчивости среднезонального потока, температуры и стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1, СПВ2) от уровня тропосферы до нижней мезосферы. Такой анализ и дальнейшие исследования выполнялись с использованием данных современных ре-анализов, например MERRA-2 [4] и Jra-55 [5].

Преыдушие результаты показали увеличение внутрисезонной изменчивости среднего зонального ветра в течение последних десятилетий, и статистическая значимость этих изменений в более высоких и средних широтах в стратосфере достаточно высока. Увеличение межсезонной изменчивости температуры наблюдается на нижних уровнях стратосферы и в полосе широт 50–70° с.ш.

Изменения динамического режима стратосферы сопровождаются изменением амплитуд стационарных планетарных волн с разными зональными волновыми числами. Различные наборы данных показали уменьшение изменчивости амплитуды СПВ1 в высоких и средних широтах нижней стратосферы и обратные изменения в верхней стратосфере. Амплитуда СПВ2 ведет себя противоположным образом. Изменчивость амплитуд стационарных планетарных волн, в свою очередь, приводит к изменчивости стратосферно-тропосферного взаимодействия.

Метод анализа и данные

Для того, чтобы проанализировать распространение планетарных волн в атмосфере, их воздействие на зональную циркуляцию и дивергенцию потока в горизонтальной плоскости обычно рассматривают трехмерные потоки Элиассена-Палма и используют алгоритма Р.А. Пламба [6]. Алгоритм Р.А. Пламба позволяет оценить направление распространения волнового пакета на трехмерной плоскости, что очень успешно применяется в изучении вертикального перехода волн между стратосферой и тропосферой [7].

Трехмерный вектор потока волновой активности описывает распространение планетарных волн вдоль долготы (F_x), широты (F_y), высоты (F_z):

$$\vec{F}_s = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \frac{p}{p_0} \cos \varphi \begin{pmatrix} v'^2 - \frac{1}{2a\Omega \sin 2\varphi} \frac{\partial(v'\phi')}{\partial\lambda} \\ -u'v' + \frac{1}{2a\Omega \sin 2\varphi} \frac{\partial(u'\phi')}{\partial\lambda} \\ \frac{2\Omega \sin \varphi}{S} \left[v'T' - \frac{1}{2a\Omega \sin 2\varphi} \frac{\partial(T'\phi')}{\partial\lambda} \right] \end{pmatrix}$$

где p — давление; p_0 — давление, равное 1000 гПа; Ω — угловая скорость вращения Земли; λ — долгота; φ — широта; a — радиус Земли; S — параметр статической устойчивости; u' — возмущение зональной скорости (отклонение от среднего по долготе значения); v' — возмущение меридиональной скорости; T' — возмущение температуры; ϕ' — возмущение геопотенциала.

Параметр статической устойчивости рассчитывается следующим образом:

$$S = \frac{\partial \hat{T}}{\partial z} + \frac{k\hat{T}}{H}$$

где \hat{T} — температура, осредненная по территории Северного полушария от 20° с.ш.; k — коэффициент теплопроводности; H — масштаб высоты.

Среднемесячные данные японского ре-анализа Jra-55 для периода лет с 1958 по 2017 использовались для расчета трехмерных потоков волновой активности, характеризующих вертикальное распространение стационарных планетных волн. Усредненные значения вертикальной компоненты потока за все годы наблюдений для декабря, января, февраля и марта в северном полушарии на 20 км представлены на рис.1.

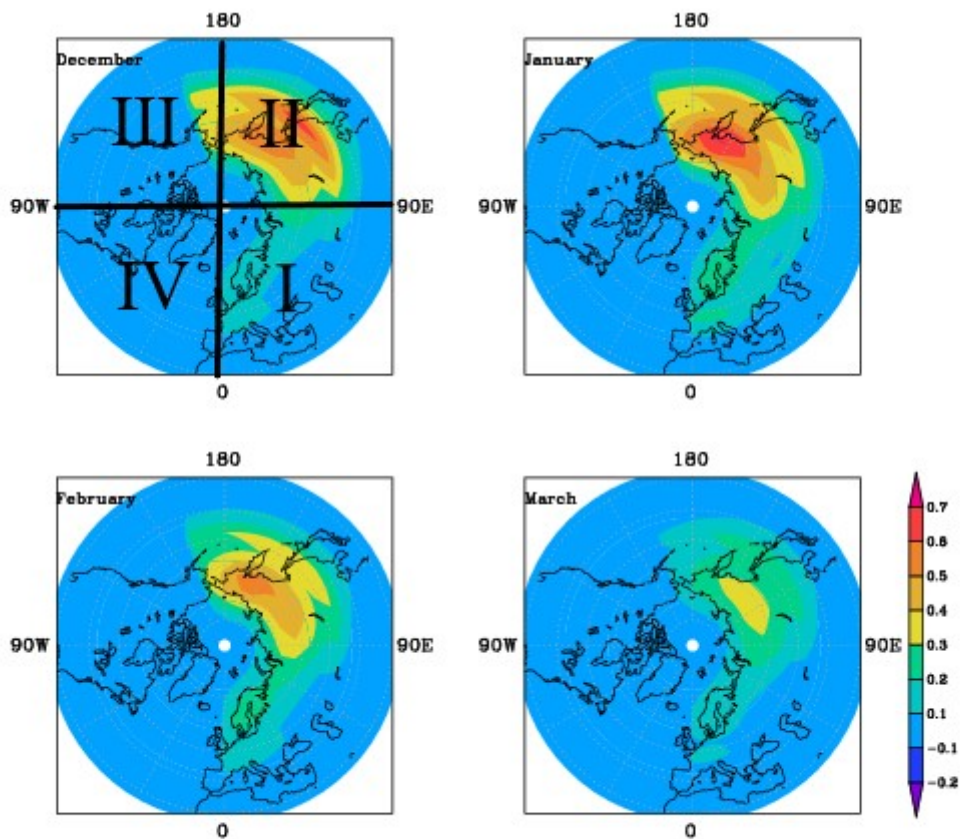


Рис. 1. Вертикальная составляющая трехмерного потока волновой активности, усредненная за 60 лет (1958-2017), 20 км и пример разбиения на сектора для построения линейного тренда (верхняя левая панель)

Результаты показывают зону распространения восходящего потока волновой активности над Дальним Востоком России и отсутствие заметной зоны распространения нисходящего потока. Более того, в первые зимние месяцы наблюдается серьезное увеличение вертикальных потоков Элиассена-Палма из тропосферы в стратосферу с максимумом в январе.

Полученное усреднение позволило определить области разбиения на сектора для дальнейшего исследования изменчивости потока во времени и построения линейного тренда. В первый сектор попадает Европа, север Африки и европейская часть России, ближний и центральный восток. Во второй – дальний восток России, восточная и юго-восточная Азия. В третий – западная Канада и США, в четвертый – восточная Канада, США и атлантический океан – рис.1 (верхняя левая панель).

Для примера, на рис.2 показаны усредненные значения вертикальной компоненты потока за 10 лет для декабря, января, февраля и марта в северном полушарии на 20 км.

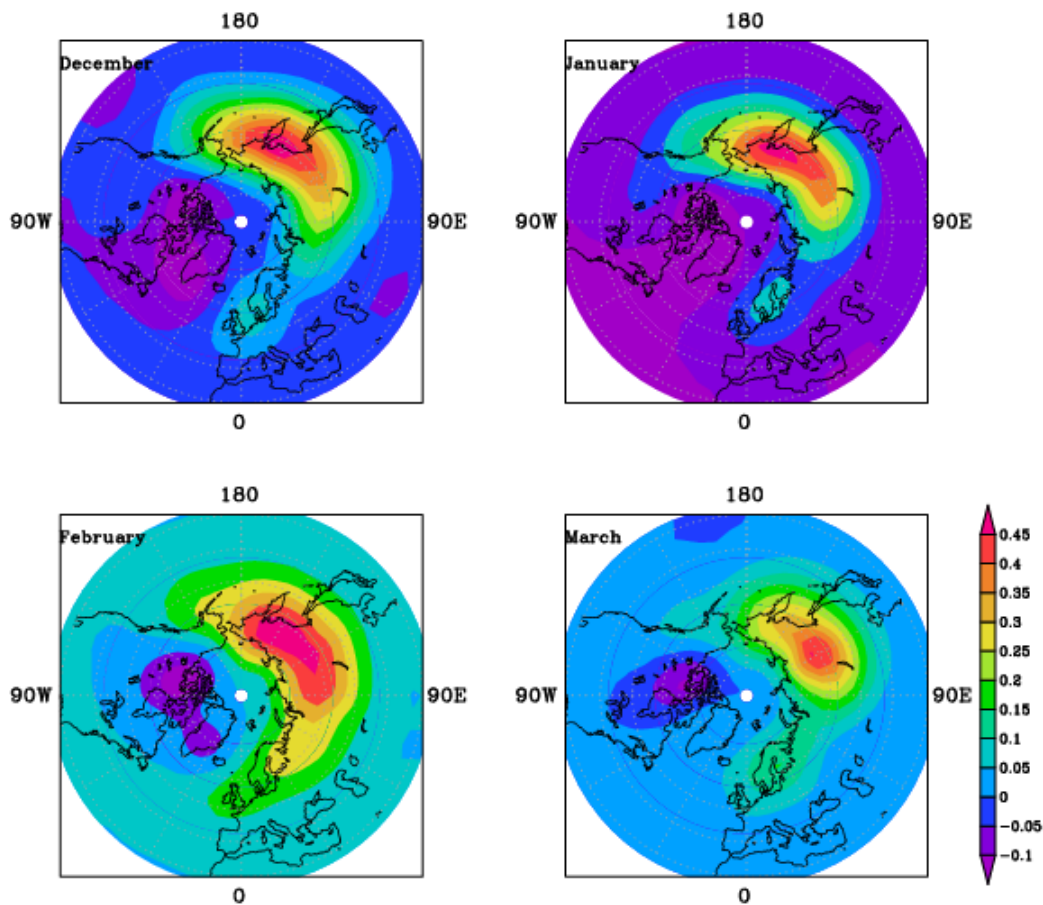


Рис. 2. Вертикальная составляющая трехмерного потока волновой активности, усредненная за 10 лет (2008-2017), 20 км

Можно заметить, что нисходящие потоки из стратосферы в тропосферу наблюдаются над Гренландией и севером Канады, но порядок величин мал в сравнении с восходящими потоками.

Временная изменчивость потоков волновой активности

На рис. 3-6 в приложении представлена временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности для всех секторов, а также линейный тренд для декабря, января, февраля и марта.

На данных рисунках особое внимание нужно уделить второму и четвертому сектору, где наблюдаются максимальные значения восходящего и нисходящего потоков волновой активности, соответственно. Результаты для декабря (рис. 3) показывают незначительное увеличение восходящего потока в первом секторе, и его уменьшение во втором. Третий и четвертый сектор интереса не представляют.

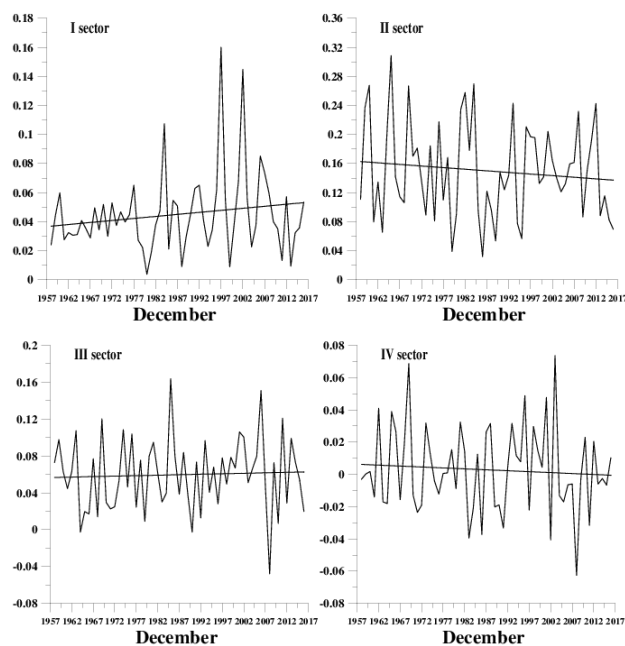


Рис. 3. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности для декабря на уровне 20 км, усредненная в полосе широт 42.5-77.5° с.ш.

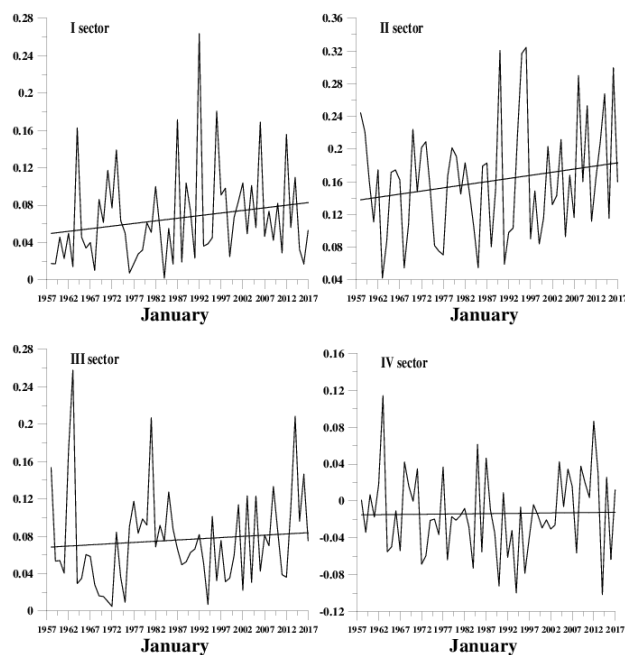


Рис. 4. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности для января на уровне 20 км, усредненная в полосе широт 42.5-77.5° с.ш.

В январе – рис.4 во втором секторе наблюдается максимальное увеличение восходящего потока волновой активности, при чем наибольшее за все месяцы. Также наблюдается увеличение в первом секторе. Остальные сектора, как и в декабре не представляют интереса.

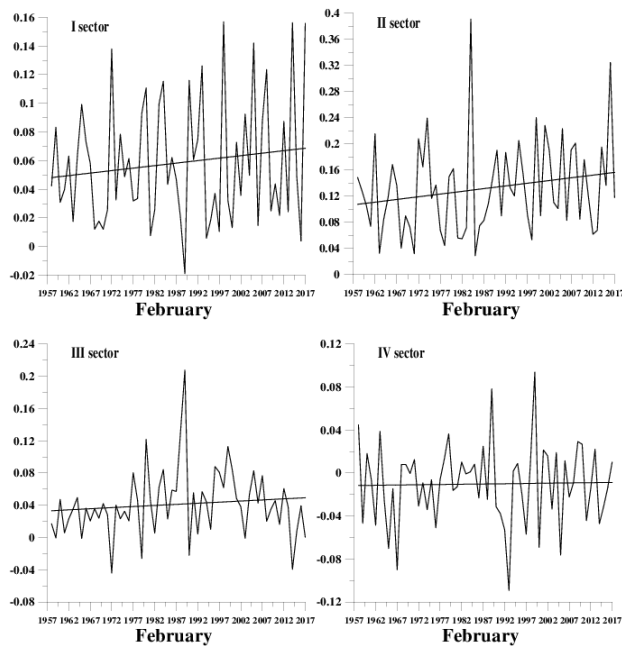


Рис. 5. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности для февраля на уровне 20 км, усредненная в полосе широт 42.5-77.5° с.ш.

Результаты на рис.5 для февраля показывают похожую картину. Как и в январе, в первом и втором секторе наблюдается рост волновой активности, а в первом секторе сильная временная изменчивость. В январе и феврале в четвертом секторе наблюдается наибольшее количество лет с нисходящей волновой активностью.

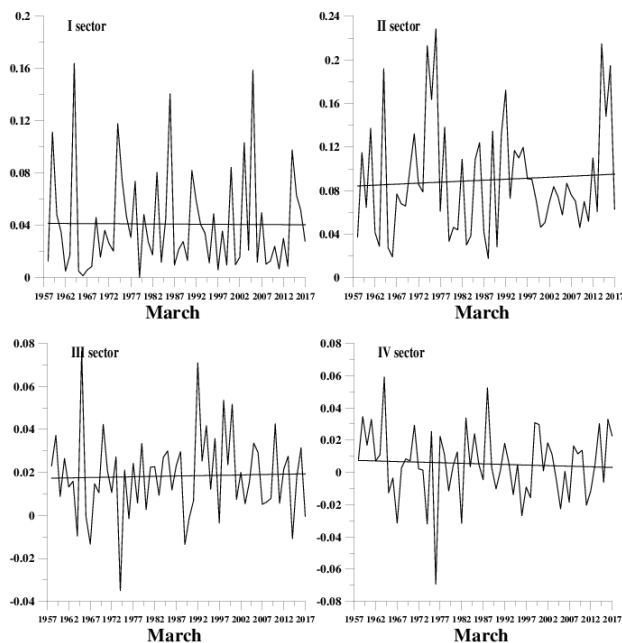


Рис. 6. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности для марта на уровне 20 км, усредненная в полосе широт 42.5-77.5° с.ш.

Результаты для марта – рис.6 показывают отсутствие сильной временной изменчивости. Небольшое увеличение восходящего потока волновой активности наблюдается во втором секторе.

Возможными причинами сильной временной изменчивости являются различные тропические осцилляции, такие как квазидвухлетнее колебание и/или Южное колебание Эль-Ниньо.

Влияние КДК на стратосферно-тропосферную связь

Чтобы показать связь стратосферы и тропосферы и оценить влияние квазидвухлетнего колебания, были построены распределения волновой активности на 4 и 30 км для января, для второго сектора. Годы с восточной и западной фазами КДК были выбраны на основе метода разложения метеорологических полей на эмпирические ортогональные функции ЭОФ, представленного в работе [8]. Метод разложения заключается в том, что процесс эволюции КДК разделяется на 8 фаз, но затем, для повышения статистической значимости при выборе лет, в качестве основных (западной и восточной) фаз КДК было предложено объединить 2 и 3 фазы КДК в западную, когда зональный поток в основном положительный, 6 и 7 фазы рассматривать как восточную фазу. Соответственно, годы с западной фазой КДК – 1983, 1985, 1993, 1995, 1997, 1999, 2002, 2004, 2008, 2013; а с восточной – 1987, 1989, 1996, 1998, 2000, 2003, 2005, 2007, 2010, 2012.

Результаты расчета отклика тропосферы на уровне 4 км представлены на рис. 7, 9, 11 и стратосферы на уровне 30 км на рис. 8, 10, 12. На рисунках вертикальная составляющая потока волновой активности показана цветом, а ее распределение в горизонтальном направлении стрелками.

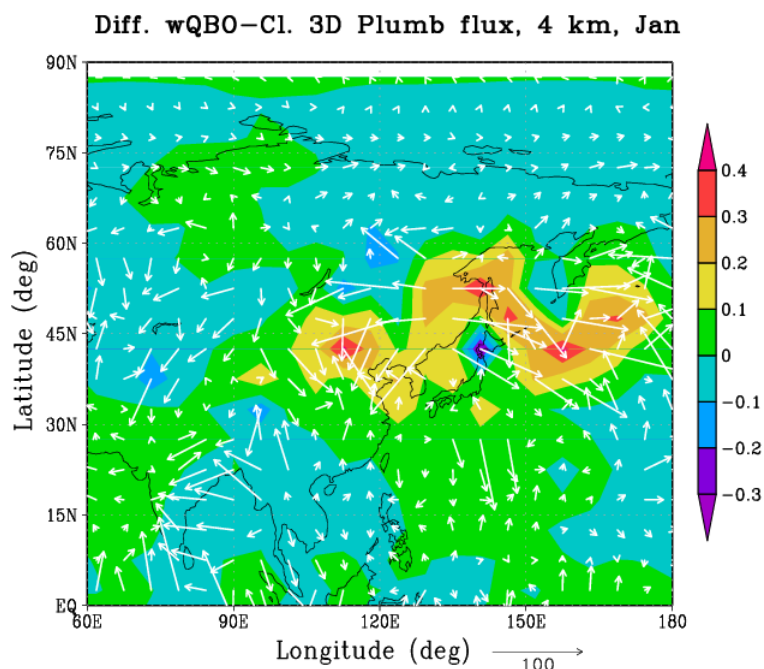


Рис. 7. Трехмерный поток волновой активности на 4 км в январе – разница между западной фазой КДК и климатическими значениями (усредненными за 1981-2020 годы)

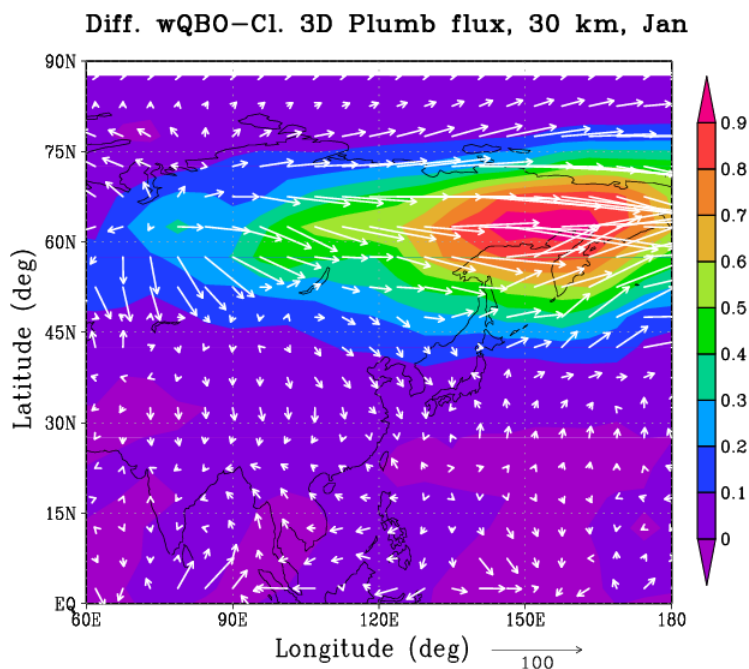


Рис. 8. Трехмерный поток волновой активности на 30 км в январе – разница между западной фазой КДК и климатическими значениями (усредненными за 1981-2020 годы)

Результаты на рис. 7 и 8 показывают, что при западной фазе КДК восходящий поток волновой активности значителен на уровне 30 км и сдвигается на восток. В свою очередь, при восточной фазе КДК поток волновой активности усиливается не так значительно в сравнении с климатическими значениями, по крайней мере во втором секторе – рис.9.

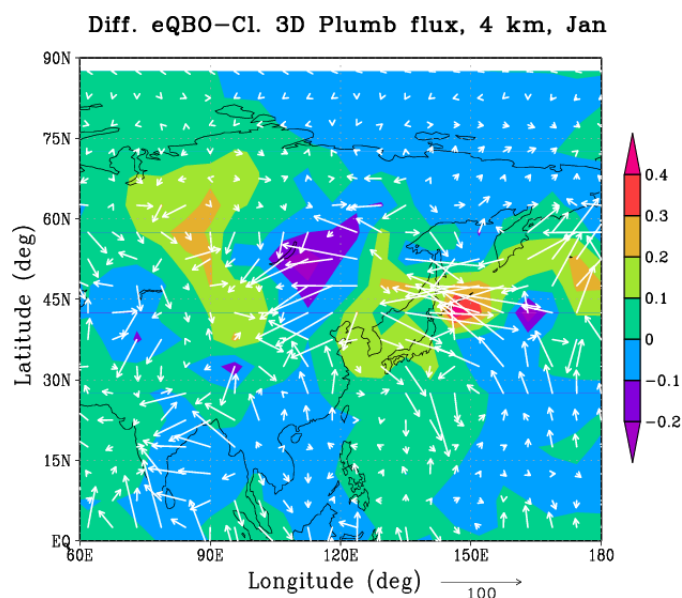


Рис. 9. Трехмерный поток волновой активности на 4 км в январе – разница между восточной фазой КДК и климатическими значениями (усредненными за 1981-2020 годы)

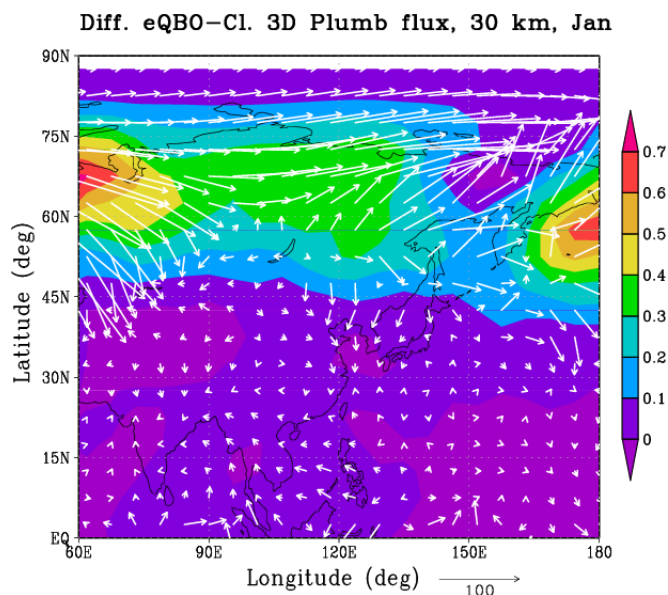


Рис. 10. Трехмерный поток волновой активности на 30 км в январе – разница между восточной фазой КДК и климатическими значениями (усредненными за 1981-2020 годы)

На уровне 30 км – рис. 10 заметна область восходящего потока практически в европейской части России, вероятно источники данного потока не попали в данный сектор.

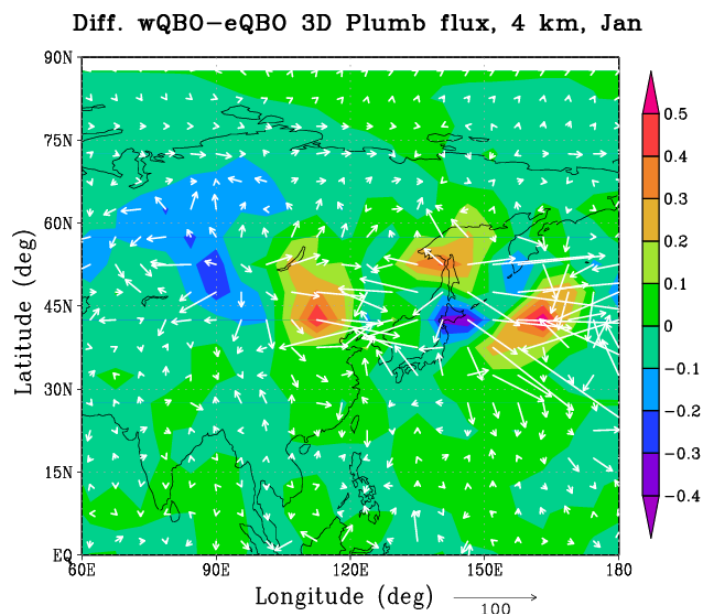


Рис. 11. Трехмерный поток волновой активности на 4 км – разница между значениями при западной и восточной фазах КДК

Это подтверждается последним рис. 12 на котором показана разница композитов.

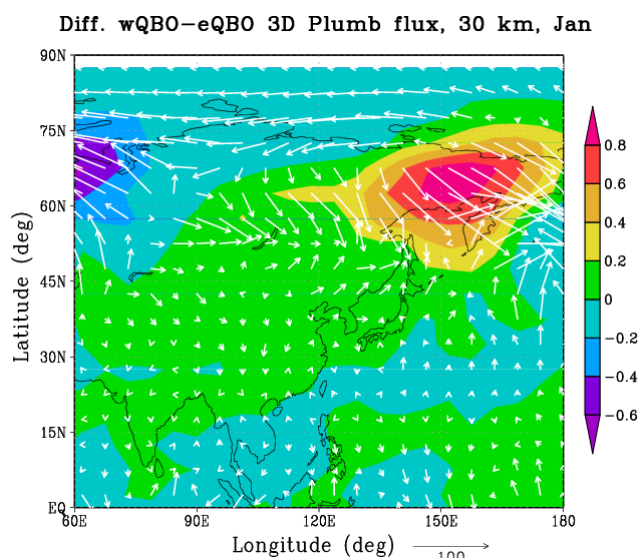


Рис. 12. Трехмерный поток волновой активности на 30 км – разница между значениями при западной и восточной фазах КДК

Заключение

Используя данные реанализов, был представлен анализ стратосферно-тропосферного взаимодействия. К основным выводам можно отнести увеличение восходящей из тропосферы в стратосферу волновой активности в последние годы. Зона максимума потока располагается над дальним востоком России, при чем в январе наблюдается максимальное увеличение от года к году. Климатические отклонения распределения волновой активности наблюдаются над югом Восточной Сибири на 4 км со смещением в район Дальнего Востока России на 30 км. Различные фазы КДК характеризуются региональным изменением потока волновой активности из тропосферы в стратосферу и его горизонтальным перераспределением в тропосфере, что может приводить к климатическим изменениям температуры и ветра над рассматриваемым.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литературы/References

1. Robock A. Stratospheric forcing needed for dynamical seasonal prediction // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 2001. Т. 82, С. 2189–2192.
2. 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. Т. 56, № 1, С. 95–109.
3. Rakushina E.V., Ermakova T.S., Pogoreltsev A.I. Changes in the zonal mean flow, temperature, and planetary waves observed in the Northern Hemisphere mid-winter months during the last decades // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2018. vol. 171, pp. 234–240.
4. Gelaro R., et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Clim.*, 2017. Т. 30, № 13, С. 5419–5454.

5. Kobayashi Sh., et al. The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics // *J. Meteorol. Soc. Japan*, 2015. Т. 93, № 1, С. 5–48.
6. Plumb R. A. On the Three-Dimensional Propagation of stationary waves // *J. Atmos. Sci.*, 1985. Т. 42, № 3, С. 217–229.
7. Гечайте И., Погорельцев А.И., Угрюмов А.И. Волновое взаимодействие стратосфера-тропосфера как предвестник аномальных похолоданий восточной части Балтийского региона // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*, 2016. Т. 43, С. 129–139. [Gechayte I., Pogorel'tsev A.I., Ugryumov A.I. Volnovoye vzaimodeystviye stratosfera-troposfera kak predvestnik anomal'nykh pokholodaniy vostochnoy chasti Baltiyskogo regiona // *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2016. vol. 43, pp. 129–139 (In Russian)].
8. Ракушина Е. В., Кандиева К. К., Анискина О. Г., Погорельцев А. И. Применение аппарата Естественных Ортогональных Функций для анализа крупномасштабных динамических процессов в средней атмосфере // *Труды ГГО*, 2018. № 591, С. 105–123. [Rakushina Ye. V., Kandiyeva K. K., Aniskina O. G., Pogorel'tsev A. I. Primeneniye apparata Yestestvennykh Ortogonal'nykh Funktsiy dlya analiza krupnomasshtabnykh dinamicheskikh protsessov v sredney atmosfere // *Trudy GGO*, 2018. no. 591, pp. 105–123 (In Russian)].

Climatic variability of the stratosphere-troposphere coupling during the last decades

K. A. Didenko^{1,2}, T. S. Ermakova^{1,2}, A. I. Pogoreltsev^{1,2}, E. V. Rakushina¹

¹ Russian State Hydrometeorological University, 192007, St Petersburg, Voronezhskaya st., 79;

² St Petersburg University, 198504, St Petersburg, Ulyanovskaya st., 1

E-mail: didenko.xeniya@yandex.ru

The study of the variability of stratosphere-troposphere coupling during the last decades is considered. The influence of such phenomena as quasi-biennial oscillation (QBO) on this interaction was also estimated. For this, the propagation of planetary waves in the atmosphere was analyzed using three-dimensional wave activity fluxes. The temporal variability of fluxes and a linear trend was shown. In addition, the response of the troposphere over Siberia and East Asia to the QBO was assessed.

Keywords: troposphere, stratosphere, planetary waves, wave activity flux, quasi-biennial oscillation.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-159-170

Original article submitted: 22.10.2021

Revision submitted: 25.11.2021

For citation. Didenko K. A., Ermakova T. S., Pogoreltsev A. I., Rakushina E. V. Climatic variability of the stratosphere-troposphere coupling during the last decades. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **37**: 4, 159-170. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-37-4-159-170

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Didenko K. A., et al., 2021

Funding. This research was carried out within the framework of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation task, project No. FSZU-2020-0009.