

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-353-372>

УДК 551.510.532 551.510.534.3



Влияние квазидвухлетних осцилляций (КДО) на стратосферный полярный вихрь в Антарктике

И.П. Габис✉

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

✉gabis@aari.ru

ИПГ, 0000-0002-5566-0829

Аннотация. Квазидвухлетние осцилляции (КДО) экваториальной стратосферы являются существенной частью глобальной циркуляции атмосферы и оказывают значительное влияние на процессы в высоких широтах. Зависимость стратосферного полярного вихря, который является необходимым условием образования озоновой дыры в Антарктике, от фазы КДО общеизвестна как эффект Холтона–Тана. Согласно многочисленным исследованиям, в Южном полушарии эффект Холтона–Тана отмечается только весной, что обычно объясняется большей интенсивностью зимнего южного вихря по сравнению с вихрем Северного полушария. В данной работе предложен новый метод анализа наблюдений, учитывающий сезонные закономерности КДО. Проведенное исследование позволило выявить ранее неизвестные особенности межгодовых вариаций интенсивности вихря и озоновой дыры в Антарктике, обусловленные КДО модуляцией. Показано, что влияние КДО на вихрь наблюдается не только весной на стадии ослабления зимнего вихря, но и в период его максимума в июне–августе. При этом изменения скорости ветра в вихре во время его максимума зимой противоположны изменениям весной во время озоновой дыры. Результаты могут быть использованы при сравнении моделируемых эффектов КДО с наблюдениями и, следовательно, при проверке предполагаемых механизмов влияния КДО на высокоширотную атмосферу.

Ключевые слова: квазидвухлетние осцилляции (КДО), общее содержание озона, озоновая дыра, полярный вихрь, стратосфера, эффект Холтона–Тана

Для цитирования: Габис И.П. Влияние квазидвухлетних осцилляций (КДО) на стратосферный полярный вихрь в Антарктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024; 70(3): 353–372. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-353-372>

Поступила 03.08.2024

После переработки 04.09.2024

Принята 09.09.2024

Influence of quasi-biennial oscillations (QBO) on the stratospheric polar vortex in the Antarctic

Irina P. Gabis✉

*State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia*

✉gabis@aari.ru

IPG, 0000-0002-5566-0829

Abstract. For many years, the dominant opinion in the literature has been that the stratospheric polar vortex is weaker in the easterly phase of the QBO than in the westerly phase, which is known as the Holton–Tan effect. While for the Northern Hemisphere vortex this is true during winter, for the Southern Hemisphere vortex the dependence on the QBO is observed only in spring. This feature is usually explained by the greater intensity of the Southern Hemisphere vortex compared to the Northern Hemisphere vortex, and the QBO can modulate its strength only during the vortex breaking season in October–November. Usually, the vortex response to the QBO is determined based on the equatorial wind direction at a certain vertical level, and the conclusions depend strongly on the level at which the QBO phase is determined. However, it has long been shown that using the equatorial wind sign at one or even a combination of several levels is not quite correct because it does not take into account the time of descent of the QBO wind relative to the seasons of the year, and it is not known at what altitudes the QBO wind has the strongest influence on the extratropical stratosphere. Due to the variable period of the QBO cycles, the phase relationship between the seasonal cycle and the QBO cycle is constantly changing, resulting in many variants of the vertical structure of the wind QBO during the Antarctic winter vortex and ozone hole. However, the seasonal regularities of QBO used in this work lead to a strictly limited number of possible variants of coincidence of the phases of the QBO cycles with the seasons of the year, which allows us to reveal typical features of interannual variations of the polar vortex and ozone hole in the Antarctic that are due to the QBO. The analysis of observational data indicates unexpected peculiarities of the QBO modulation of the stratospheric polar vortex in the Antarctic. The QBO effect in the vortex intensity is observed not only in spring during the weakening phase of the winter vortex, but also during the vortex maximum in June–August. At the same time, changes in the wind speed of the vortex during its maximum in winter are opposite to those in the spring during the ozone hole period. If the winter vortex is more intense (weak), then during the ozone hole period the vortex is weaker (more intense) than the average level.

Keywords: Holton–Tan effect, ozone hole, polar vortex, quasi-biennial oscillation (QBO), stratosphere, total ozone

For citation: Gabis I.P. Influence of quasi-biennial oscillations (QBO) on the stratospheric polar vortex in the Antarctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(3):353–372. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-353-372>

Received 03.08.2024

Revised 04.09.2024

Accepted 09.09.2024

Введение

По данным наблюдений, общее содержание озона (ОСО) в настоящее время остается ниже среднего значения 1964–1980 гг. на ~2 % для области от 60° ю. ш. до 60° с. ш., при этом в средних широтах на 4–5 % и в тропиках (20° ю. ш. — 20° с. ш.) на 1% [1]. Наиболее ярким проявлением истощения озонового слоя в атмосфере Земли является озоновая дыра в Антарктике [2], которая образуется каждую весну в высоких широтах Южного полушария в результате комплекса фотохимических и динамических процессов. Прогноз сроков восстановления стратосферного озона, в том числе антарктического озона [3], в настоящее время является предметом интенсивных исследований, так как озоновый слой защищает жизнь на поверхности Земли от воздействия опасного солнечного ультрафиолетового излучения. Однако определение обращения долгосрочного тренда количества озона со спада на рост (вследствие уменьшения в атмосфере озоноразрушающих веществ) затруднено из-за интенсивных межгодовых колебаний, обусловленных естественными причинами.

В качестве одной из основных причин межгодовых флуктуаций ОСО в Антарктике, как правило, рассматривают влияние квазидвухлетних осцилляций (КДО) зонального ветра экваториальной стратосферы, которые являются существенной частью глобальной циркуляции атмосферы [4]. Безусловно, существуют и другие факторы (ENSO, вулканическая активность, волновые возмущения из тропосферы), но эти факторы, в свою очередь, могут быть подвержены влиянию КДО. Впервые

связь между ОСО в озоновой дыре и фазой цикла КДО была отмечена в середине 1980-х гг. [5]. Было сделано предположение, что более интенсивное уменьшение антарктического озона наблюдается при западной фазе КДО. Однако, как показали многочисленные последующие исследования, влияние КДО не столь однозначно [6–9].

Важным условием образования озоновой дыры являются сезонные изменения циркуляции в антарктической стратосфере, а именно формирование зимнего полярного (циркумполярного) вихря [1]. В результате охлаждения высокоширотной стратосферы в течение полярной ночи на $\sim 60^\circ$ ю. ш. формируется интенсивный западный зональный поток, который ограничивает область антарктического стратосферного вихря и препятствует обмену между полярным и среднеширотным воздухом. С окончанием полярной ночи в сентябре в области вихря на частицах полярных стратосферных облаков происходит разрушение молекул озона в результате фотохимического воздействия солнечного излучения и образование озоновой дыры. При этом понижение ОСО зависит не только от количества озоноразрушающих веществ, но и от интенсивности вихря. На конечный уровень ОСО, очевидно, влияет продолжительность разрушения озона и изоляции полярной области от притока обогащенного озоном воздуха средних широт. Следовательно, характеристики стратосферного вихря являются критически важными для оценки межгодовых флуктуаций ОСО в Антарктике.

Поэтому значительные усилия были предприняты для исследования причин межгодовых флуктуаций интенсивности вихря. По-видимому, впервые доказательства влияния КДО на циркуляцию стратосферы были представлены еще до «открытия» озоновой дыры в работе [10]. Анализ наблюдений показал, что при западной фазе КДО стратосферный зимний вихрь интенсивнее и температура в полярной шапке ниже, что способствует более сильному понижению ОСО, чем во время восточной фазы. Эта закономерность общеизвестна как *эффект* или связь Холтона–Тана. В той же работе была предложена гипотеза о причине влияния КДО на высокоширотную стратосферу — *механизм* Холтона–Тана, согласно которому от фазы КДО зависит широтное положение линии нулевого ветра, определяющее распространение планетарных волн внетропической стратосферы. Однако многочисленные последующие модельные исследования не дали удовлетворительных подтверждений справедливости механизма Холтона–Тана [11], и было предложено несколько альтернативных (вероятно, взаимодополняющих) механизмов [12–16]. В частности, было показано, что КДО может модулировать вихрь Южного полушария путем влияния создаваемой КДО меридиональной циркуляции на генерацию и распространение планетарных волн [15].

Таким образом, вопрос о механизме влияния КДО на процессы в высоких широтах и, в частности, на ОСО в полярных областях до настоящего времени остается открытым. Нерешенной проблемой является то, что связь с КДО зависит от высотного уровня, по направлению ветра на котором определяют тип фазы цикла КДО (восточная *E* или западная *W*). Поскольку чередование ветра КДО происходит в результате поочередного спуска западного и восточного режимов ветра [4], то зональная циркуляция в подавляющем большинстве случаев имеет противоположное направление на разных высотах. На каких высотах ветер КДО оказывает наиболее сильное влияние на внетропическую стратосферу, остается неясным [11, 12]. Также априори неизвестно, в какой момент времени влияние КДО наиболее значимо. Интервал от формирования полярного вихря (июнь–июль) до его распада (ноябрь–декабрь)

равен примерно четверти периода цикла КДО. Естественно, что высотная структура экваториальной зональной циркуляции за это время существенно изменяется. Кроме того, изменение периода КДО от одного цикла к другому и, значит, многочисленность вариантов фазового соотношения между сезонным циклом, доминирующим в высоких широтах, и квазидвухлетним циклом экваториальной стратосферы, представляет серьезную проблему при сравнении модельных расчетов с наблюдениями и, следовательно, при проверке теоретических предположений о механизме КДО влияния [12, 17, 18].

Целью работы является исследование влияния КДО на вариации интенсивности стратосферного полярного вихря в Антарктике с помощью метода, основанного на учете сезонных закономерностей КДО. При этом значительно уменьшается число возможных вариантов совпадения фаз циклов КДО с сезонами, что позволяет определять типичные особенности межгодовых вариаций вихря, обусловленные КДО.

Использованные данные

Традиционно в исследованиях КДО используются данные о среднемесячной скорости зонального ветра, полученные на основе радиозондовых измерений на экваториальных станциях (доступны для 1953–2021 гг. на сайте <https://www.geo.fu-berlin.de/en/met/ag/strat/produkte/qbo/index.html>, обновляются по текущее время на сайте <https://www.atmohub.kit.edu/english/807.php>). Далее в тексте они обозначены как «данные FUB». Анализ сезонных закономерностей ветра КДО основан на ежедневных данных радиозондов за примерно 40-летний период 1977–2016 гг. из объединенного глобального архива Integrated Global Radiosonde Archive (далее — «данные IGRA») (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>). Для характеристики интенсивности полярного вихря в Антарктике использованы спутниковые данные Goddard Space Flight Center (GSFC) NASA (http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/wind_2024_MERRA2_SH.html, доступ 15.06.2024) с 1979 по 2024 г. о скорости зонального ветра на 60° ю. ш. Для анализа изменений ОСО использованы спутниковые Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) и Ozone Monitoring Instrument (OMI) данные за период с 1979 по 2023 г. и Merged Ozone Data (MOD) за период 1978–2021 гг. (https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/ozone_maps/ftpoms/omi/data/zonal_means/ozone/; https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/merged/index.html, доступ 15.06.2024).

Квазидвухлетние осцилляции (КДО) ветра, озона и циркуляции

Влияние фазы КДО на полярный вихрь Южного полушария

КДО ветра наблюдается в экваториальной стратосфере на уровнях от ~100 гПа (~16 км) до ~3 гПа (~40 км). Скорость ветра максимальна над экватором и уменьшается с ростом широты с полушириной распределения примерно $\pm 12^\circ$. Механизм генерации КДО подробно описан в обзорах [4, 11, 19]. Чередование направления зонального ветра является следствием поочередного спуска западного (*W*-фаза КДО) и восточного ветра (*E*-фаза КДО). Фазы КДО на разных уровнях начинаются в разное время, и начало и продолжительность каждой фазы зависит от выбора уровня. При этом период КДО (как интервал между датами идентичного изменения направления ветра на определенном уровне), при среднем значении около 28 месяцев, изменяется от цикла к циклу и имеет разную продолжительность на разных уровнях.

При исследовании влияния КДО на различные процессы для определения типа фазы цикла КДО в каждом частном случае выбирают тот уровень в диапазоне от 70 до 10 гПа, для которого результат анализа явлений в сравнении с КДО оптимален [4]. Например, показано, что КДО модуляция ветра в средних и высоких широтах (эффект Холтона–Тана) в Северном полушарии проявляется лучше всего при определении фазы КДО по экваториальному ветру вблизи 40 гПа, в то время как в Южном полушарии эффект более четко виден при использовании ветра на уровне ~ 25 гПа [20].

На рис. 1а показаны, в качестве примера, изменения скорости зонального ветра на экваторе U_{EQ} в 2020–2023 гг. по данным FUB — вычисленная средняя вариация для 25 гПа с удаленным годовым ходом. Символами W и E отмечены месяцы, в которые фаза КДО была, соответственно, западной и восточной на уровне 25 гПа. На рис. 1б в верхней части показаны изменения в течение года скорости зонального ветра U на 60° ю. ш. на уровне 10 гПа для всех лет с 1979 по 2023 г. (серые кривые) и среднегодовая вариация за этот период (красная кривая), а внизу показаны отклонения ΔU от годовой вариации (синие кривые). Максимальные межгодовые флуктуации ΔU наблюдаются в июне–ноябре. Для определения влияния КДО среднемесячные значения ΔU усреднялись отдельно для западной и восточной фаз КДО для каждого календарного месяца в течение 1979–2023 гг. Из представленных на рис. 1в средних вариаций видно, что в декабре и январе–июле кривые для обеих фаз КДО практически не отличаются, в августе–сентябре при W -фазе ΔU незначительно ниже (то есть вихрь слабее), чем при E -фазе, а в октябре–ноябре, наблюдается отчетливое различие ΔU . При этом ΔU выше при W -фазе (то есть вихрь интенсивнее), чем при E -фазе. Разность ΔU между фазами КДО в октябре и ноябре составляет примерно 4 и 8 м/с (статистическая значимость $\sim 70\%$ и $\sim 98\%$ соответственно).

Полученные изменения ΔU согласуются с анализом [20, Figs. 3–4], согласно которому максимальное различие между фазами КДО в высокоширотной стратосфере Южного полушария наблюдалось в ноябре, то есть во время финального потепления и разрушения зимнего вихря. В период максимальной скорости вихря (до ~ 100 м/с в июле–августе) эффекта КДО не наблюдалось. Заметим, что в ноябре скорость вихря существенно уменьшается и ветер изменяет направление с западного ($U > 0$) на восточное ($U < 0$) (рис. 1б, вверху). На рис. 1г показаны изменения ΔU только для ноября в течение полного интервала с 1979 по 2023 г. Видно, что в некоторые годы интенсивный вихрь наблюдался при E -фазе (например, в 2021 и 2023 гг.) и, наоборот, слабый вихрь наблюдался при W -фазе (в 2013 и 2016 гг.).

На рис. 1д и 1е представлены, соответственно, для E - и W -фаз, определенных по направлению ветра на уровне 25 гПа, вертикальные профили скорости ветра U_{EQ} (с удаленным годовым ходом) для всех ноябрей в 1979–2023 гг., которые были учтены при определении вариаций на рис. 1в, — 20 случаев для E -фазы и 21 случай для W -фазы. Прежде всего видно, что в подавляющем большинстве случаев направление ветра в верхней и нижней частях слоя от 70 до 10 гПа противоположно, то есть если внизу восточный ($U_{EQ} < 0$) ветер, то вверху западный ($U_{EQ} > 0$) ветер и наоборот. Однако для каждой фазы профили демонстрируют только два или три варианта вертикальной структуры.

Для E -фазы (рис. 1д) синим цветом выделена группа профилей с западным ветром в нижних слоях и восточным в верхних (граница между противоположно направленными ветрами в разные годы в диапазоне 30–50 гПа). Красным цветом

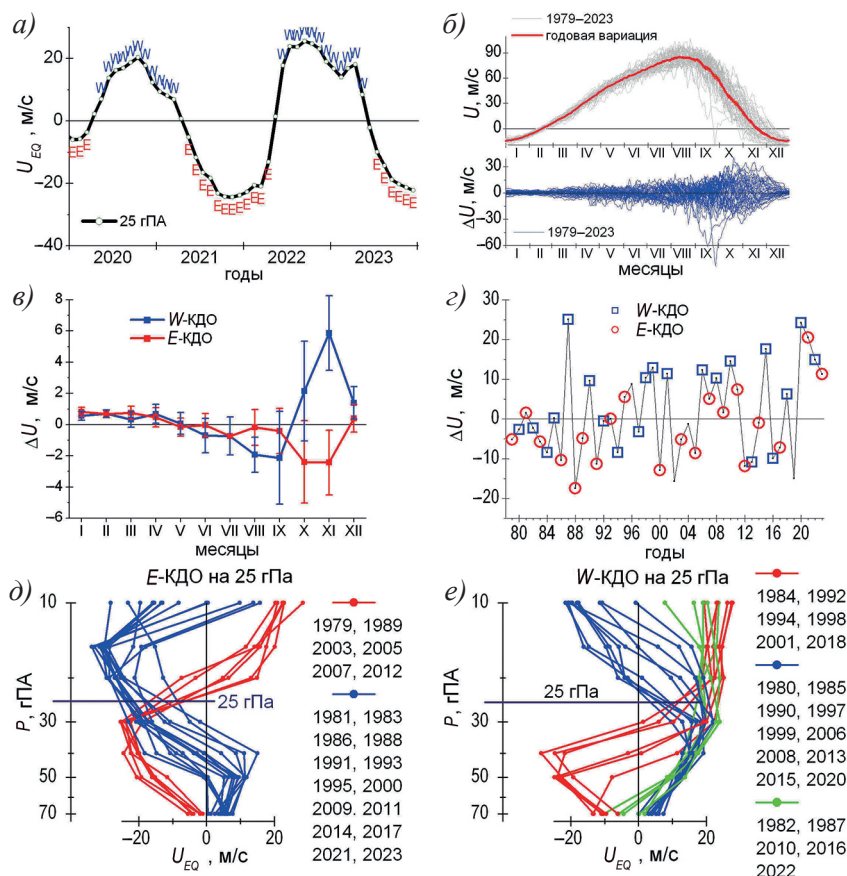


Рис. 1. Изменения скорости полярного вихря в Антарктике в зависимости от фазы КДО.

a — изменения экваториального ветра U_{EQ} на уровне 25 гПа в 2020–2023 гг. по данным FUB, символы *W* и *E* отмечают месяцы с западной и восточной фазой КДО соответственно; *б* — вверху — изменения в течение года скорости зонального ветра U на 60° ю. ш. на уровне 10 гПа для всех лет в 1979–2023 гг. (серые кривые) и среднегодовая вариация (красная кривая), внизу — отклонения ΔU от среднегодовой вариации (синие кривые); *в* — изменения ΔU на 60° ю. ш. на 10 гПа в течение года для *W*- и *E*-фаз КДО; *г* — изменения ΔU для ноября в течение интервала с 1979 по 2023 г.; *д* — вертикальные профили скорости U_{EQ} для всех ноябрей в 1979–2023 гг., которые были учтены при определении вариаций на рис. 1в, для *E*-КДО; *е* — то же что на рис. 1д, но для *W*-КДО

Fig. 1. Changes in the speed of the polar vortex in Antarctica depending on the QBO phase.

a — changes of the equatorial wind U_{EQ} at 25 hPa (de-seasonalized) in 2020–2023 from FUB data, the symbols *W* and *E* mark months with the westerly and easterly phase of the QBO, respectively; *б* — at the top — changes during the year of the zonal wind speed U at 60° S at 10 hPa for all years in 1979–2023 (gray curves) and a mean annual variation (red curve), below — deviations ΔU from the annual variation (blue curves); *в* — changes of ΔU at 60° S at 10 hPa during the year for the *W* and *E* phases of the QBO, the difference in ΔU between the QBO phases in November is ~ 8 m/s; *г* — ΔU changes for November during the interval from 1979 to 2023, in some years, an intense vortex was observed during *E*-QBO, and a weak vortex was observed during *W*-QBO; *д* — vertical profiles of the equatorial wind speed U_{EQ} for all Novembers in 1979–2023, which were taken into account in determining the variations in Fig. 1в, for *E*-QBO; *е* — the same as in Fig. 1д, but for *W*-QBO, it can be seen that for each phase of the QBO, the profiles show only two or three variants of the vertical structure, which are shown in different colors. Note that each group demonstrates not successive stages of the wind change during the evolution of a particular QBO cycle, but only one month — November — from different QBO cycles

выделена группа профилей с восточным ветром в нижних слоях и западным в верхних (граница в диапазоне 18–23 гПа). При этом во всех случаях на рис. 1д на 25 гПа ветер восточный. На рис. 1е для W-фазы красным цветом показаны профили с западным ветром в верхнем слое и восточным в нижнем (как и на рис. 1д), но нижняя граница западного ветра расположена ниже уровня 25 гПа (в разные годы в диапазоне 30–45 гПа). Синим цветом выделены профили с западным ветром внизу, а восточным вверху; при этом нижняя граница восточного ветра расположена выше уровня ~22 гПа. Зеленым цветом выделена группа профилей, в которых практически во всем диапазоне ветер западный. Во всех случаях на рис. 1е на 25 гПа ветер западный.

Подчеркнем, что каждая группа демонстрирует не последовательные стадии процесса изменения ветра в ходе эволюции конкретного цикла КДО, а один только месяц — ноябрь — из разных циклов КДО. При этом нет какой-то определенной закономерности чередования однотипных профилей в течение времени (в разные годы).

Представленный выше анализ является демонстрацией традиционно используемого метода определения фазы КДО по направлению ветра на одном уровне (или комбинации нескольких уровней в определенном диапазоне) при изучении влияния КДО на различные процессы. Однако, как отмечалось во Введении, хотя определенные уровни КДО часто используются для максимизации отклика на КДО в данных наблюдений, до настоящего времени нет единого мнения о том, при какой вертикальной структуре ветра наблюдается наиболее сильное влияние КДО на внетропическую стратосферу [12]. Из представленных на рис. 1 результатов также видно, что случаи с одной и той же фазой КДО, определенной для фиксированного уровня, включают события с разной высотной структурой ветра, что, по-видимому, означает, что при вычислении среднего отклика на КДО смешиваются не идентичные варианты. Однако всего два-три варианта однотипных профилей в один и тот же календарный месяц года (рис. 1д и 1е) свидетельствуют о наличии сезонных закономерностей в эволюции КДО, которые будут рассмотрены в следующем разделе и которые позволяют определить типичные особенности вариаций полярного вихря и озоновой дыры в Антарктике, обусловленные КДО.

Сезонная зависимость КДО

Несмотря на то, что сезонная модуляция или синхронизация КДО известна уже ~40 лет и многократно подтверждалась (см. ссылки в обзоре [4]), до настоящего времени в литературе доминирует мнение, что период цикла КДО не связан с годовым циклом и имеет место лишь частичная синхронизация моментов изменения фаз КДО или скорости спуска ветровых режимов КДО с сезонами года [19]. Отсюда следует вывод о том, что фазы цикла КДО систематически смещаются на несколько месяцев для последовательных циклов относительно сезонов года (и интервал смещения изменяется от цикла к циклу), что значительно усложняет выявление связи КДО с изменениями вихря и озоновой дыры. Поскольку даже средний период КДО не равен точно двум годам и фазовое соотношение между годовым циклом в 12 месяцев, доминирующим в высоких широтах, и квазидвухлетним циклом экваториальной стратосферы постоянно изменяется, то требуется несколько циклов КДО в течение нескольких лет, чтобы завершить цикл низкочастотной модуляции годового цикла циклом КДО [12, 17, 18].

Анализ вертикальных профилей скорости экваториального ветра по данным FUB [21, 22] показал, что во время спуска восточного ветра КДО всегда наблюдаются уменьшения скорости спуска в слое 20–40 гПа, названные стадией стагнации [21],

которые четко связаны с сезонами года. Если определять период цикла КДО (для чего в настоящее время не существует общепринятого метода) как интервал между началами последовательных стадий стагнации, то оказывается, что период изменяется дискретно и может быть равен только 24 или 30 месяцам между соответствующими солнцестояниями [23, 24].

Факт наличия стадий стагнации согласуется с давно известными «замедлениями» (stallings), которые отмечались в ходе спуска восточного ветра, хотя без связи с определенными сезонами, и использовались для объяснения различий в периоде между разными циклами. Однако считалось, что эти приостановки спуска наблюдаются только в некоторых циклах и при их отсутствии период цикла близок к 2 годам (24 месяцам), в то время как при длительных торможениях период составляет ~3 года [19]. Согласно результатам [21–24] торможения спуска восточного ветра наблюдаются в каждом цикле, но в 24-месячных циклах их длительность равна всего 1 сезону (3 месяцам), и поэтому они практически не заметны на высотно-временных разрезах скорости, хотя отчетливо определяются по вертикальным профилям.

На рис. 2а представлены вертикальные профили скорости по данным FUB для всех 11 случаев (за период 1953–2024 гг.) 3-месячной стадии стагнации в течение спуска восточного ветра; профили для января, февраля и марта выделены синим, зеленым и красным цветом соответственно. Границу раздела противоположно направленных воздушных течений называют зоной сдвига (от англ. shear) скорости. По общепринятой терминологии нижняя граница спускающегося западного ветра (направленного с запада на восток) называется зоной западного сдвига (или *W*-сдвига), а нижняя граница восточного ветра (с востока на запад) — зоной восточного сдвига (или *E*-сдвига). Во всех случаях восточный сдвиг на рис. 2а наблюдается на уровне в диапазоне 20–40 гПа, и в каждом случае этот уровень практически не изменяется в течение по крайней мере трех месяцев. Такие периоды торможения (стадии стагнации) разделяют периоды интенсивного спуска восточного сдвига в слое выше и в слое ниже 20–40 гПа (подробно показано в [24], Fig. 1 и в [21], рис. 1). Однако в разных циклах КДО уровень, на котором наблюдается стадия стагнации, разный. Поэтому при определении периода цикла КДО как интервала между идентичными изменениями фазы на фиксированном уровне сезонные закономерности проявляются лишь как «модуляция» или «тенденция», и период изменяется от 17 до 38 месяцев со средним значением в диапазоне от 27 до 30 месяцев в зависимости от анализируемого временного интервала [4].

На рис. 2б показаны вертикальные профили скорости для всех 11 циклов (серые линии) 24-месячного периода (при определении периода как интервала между началами последовательных стадий стагнации). Профили для разных циклов сгруппированы по календарным месяцам года так, что периоды стадий стагнации (выделены желтым цветом) разных циклов совмещены. Показаны также 6 месяцев до начала стадии стагнации (верхний ряд рис. 2б, июль–декабрь), соответствующие спуску восточного ветра до уровня стагнации. Для каждого месяца также показан средний профиль (синие линии с указанием среднеквадратичной ошибки на всех уровнях). Из рис. 2б следует, что, несмотря на различия в амплитуде скорости (иногда существенные), каждая очередная стадия стагнации начинается в январе, то есть вблизи солнцестояния (те же профили, что и на рис. 2а), так что эволюция КДО упорядочивается относительно сезонов года.

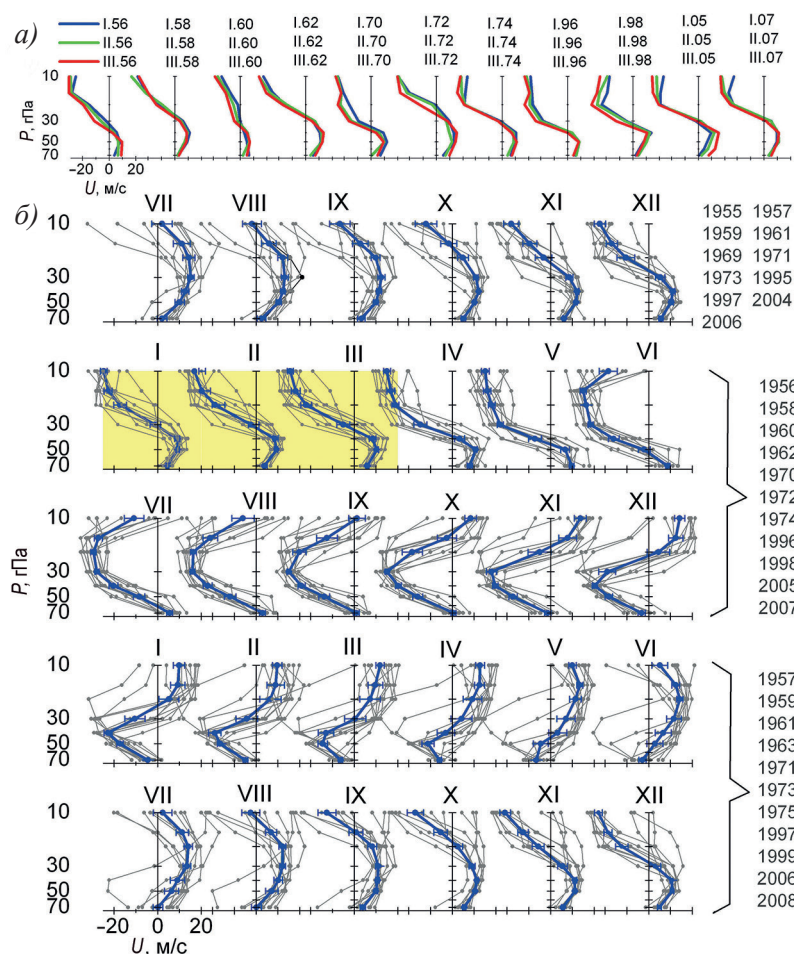


Рис. 2. Вертикальные профили скорости ветра по данным FUB для 24-месячных циклов КДО (1953–2024).

a — профили в период стадии стагнации спуска восточного ветра с января по март в разных циклах КДО; *б* — профили для всех месяцев в течение цикла КДО для 11 циклов 24-месячного периода (серые линии). Профили для разных циклов сгруппированы по календарным месяцам года так, что стадии стагнации (выделены желтым цветом) разных циклов совмещены. Синие линии для каждого месяца (с указанием среднеквадратичной ошибки на всех уровнях) представляют средний по всем циклам профиль

Fig. 2. Vertical wind velocity profiles from FUB data for 11 QBO cycles in 1953–2024 of the 24-month period.

a — profiles during the stagnation stage January to March of the easterly descent in different QBO cycles. The easterly shear in all the cases is observed at a level of about 20–40 hPa, and in each case this level is essentially unchanged for at least three months. However, the level at which the stagnation stage is observed varies from one QBO cycle to another. Thus, in defining the period by wind at a fixed level, the seasonal patterns appear only as a “modulation”; *б* — velocity profiles for all months in the QBO cycle for 11 cycles of the 24-month period (gray lines).

Profiles for different cycles are grouped by calendar months of the year so that the periods of stagnation stages (highlighted in yellow) of different cycles are combined. The top row shows the 6 months July–December corresponding to the descent of the easterly wind to the stagnation level. For each month, the average profile is also shown (blue lines indicating the mean squared error at all levels). Despite the differences in the shear level and velocity amplitude, each successive stagnation stage begins near the solstice in January (the same profiles as in Fig. 2a), so that the evolution of the QBO is ordered with respect to the seasons of the year

Из рис. 2б также видно, что весь спуск восточного ветра от уровня 10 гПа (июль в верхнем ряду) до уровня 70 гПа (декабрь, третий сверху ряд) продолжается 6 сезонов. При этом сезоны определяются как 3-месячные интервалы январь–март, апрель–июнь, июль–сентябрь и октябрь–декабрь. Еще через 2 сезона (в июле, нижний ряд) начинается очередной спуск восточного ветра от уровня 10 гПа. Следовательно, полный цикл обращения ветра продолжается 8 сезонов при любом способе определения периода — как интервала между началами последовательных стадий стагнации или как интервала между началами спуска восточного ветра на уровне 10 гПа. Но анализ профилей по среднемесячным данным FUB (обычно используемым в исследованиях КДО ветра) не позволяет выделить сезонные особенности КДО на более высоких (выше ~20 гПа) и более низких (ниже ~50 гПа) уровнях. Следовательно, на практике для определения границ циклов и, соответственно, периодов циклов следует использовать стадии стагнации, начало которых фиксируется по среднемесячным данным FUB по отчетливому уменьшению скорости спуска на некотором уровне в диапазоне 20–40 гПа (см. рис. 2а). Аналогичный анализ КДО циклов 30-месячного периода (не показан на рисунке) демонстрирует те же сезонные закономерности, но с более продолжительным, в течение 8 сезонов, спуском восточного ветра.

Анализ профилей, построенных с использованием ежедневных данных IGRA, показал, что быстрый и медленный спуск *E*-сдвига чередуется на протяжении всего спуска восточного ветра от ~10 гПа до ~70 гПа — спуск резко замедляется (ускоряется) вблизи солнцестояний (равноденствий) [25]. Кроме того, каждый восточный сдвиг всегда появляется на ~10 гПа вблизи солнцестояний (в июне или декабре), спускается в течение 6 или 8 сезонов, и спуск завершается на уровне ~70 гПа также вблизи солнцестояний. Новый (очередной) восточный сдвиг на ~10 гПа всегда появляется через два сезона после того, как предыдущий восточный сдвиг достигает ~70 гПа (см. [26], Fig. 6). Следовательно, интервал между последовательными началами восточного сдвига на ~10 гПа равен 8 или 10 сезонам (24 или 30 месяцам).

Вариант 6-сезонного спуска и, следовательно, 8-сезонного интервала между началами восточного сдвига на уровне ~10 гПа соответствует циклам КДО 24-месячного периода, показанным на рис. 2б. (Заметим, что интервал 8 сезонов между началами восточного сдвига на ~10 гПа от июля в верхнем ряду до июля в нижнем ряду прослеживается по средним (синим) профилям.) Более продолжительный спуск восточного сдвига от уровня ~10 гПа до уровня ~70 гПа, в течение 8 сезонов, соответствует интервалу 10 сезонов между началами восточного сдвига на уровне ~10 гПа, то есть удлинению периода цикла КДО на полгода до 30 месяцев. Подчеркнем также, что в данной работе не рассматриваются аномальные циклы КДО, такие как два 36-месячных цикла в 1964–1969 гг. и циклы, связанные с аномалиями КДО в 2015–2016 гг. и в 2019–2020 гг. [11, 19].

КДО циркуляции и КДО озона

КДО ветра связаны с соответствующими вариациями температуры и озона. Вследствие условия термического баланса температурные возмущения, обусловленные изменениями ветра, создают вторичную меридиональную циркуляцию [4, 11]. В экваториальной ветви этой циркуляции происходит подъем воздушных масс вблизи восточного сдвига скорости ветра и спуск воздушных масс вблизи западного сдвига скорости ветра. В силу условия непрерывности массы это приводит к горизонтальному оттоку от экватора вблизи уровня максимума скорости восточного ветра

и к горизонтальному притоку к экватору вблизи уровня максимума западного ветра, а в субтропических ветвях КДО-циркуляции возникают, соответственно, нисходящие и восходящие движения. Вследствие высотной зависимости фотохимического времени жизни озона и увеличения концентрации озона с высотой в стратосфере вертикальные движения воздуха влияют на общее содержание озона. Относительные восходящие (нисходящие) движения воздуха уменьшают (увеличивают) количество озона, формируя меньшее (большее) ОСО в тропиках во время спуска восточной (западной) зоны сдвига ветра КДО. При этом в субтропиках КДО-циркуляция создает вариации ОСО противоположного знака, причем в зимнем полушарии более интенсивные, чем в летнем, из-за зависимости циркуляции от сезона [4].

Таким образом, КДО ветра приводит к КДО-циркуляции, которая ответственна за КДО в ОСО. Изучение изменчивости экваториального ОСО выявило четко выраженные максимумы ОСО, которые наблюдаются вблизи солнцестояний и повторяются каждые 2 или 2,5 года. Анализ вариаций ОСО в связи с изменениями ветра в ходе эволюции цикла КДО показал, что время максимумов ОСО отчетливо связано с окончанием спуска западного сдвига на ~ 70 гПа и с одновременно происходящим появлением восточного сдвига на ~ 10 гПа [27]. То есть в период спуска западного ветра нисходящие движения воздуха в экваториальной ветви КДО-циркуляции увеличивают количество озона, и наблюдается рост ОСО в тропиках. Как только на уровне ~ 10 гПа появляется восточный ветер, из-за восходящих движений воздуха начинается уменьшение ОСО. «Граница» между ростом и спадом ОСО соответствует максимуму ОСО.

Как отмечалось во Введении, в теоретических исследованиях показана возможность КДО модуляции стратосферного зимнего полярного вихря посредством влияния меридиональной циркуляции, генерируемой КДО, на распространение планетарных волн. В связи с этим при изучении механизма влияния КДО на высокоширотные явления особое значение приобретают сезонные закономерности КДО-циркуляции, которые следуют из четкой связи вариаций ОСО с КДО ветра и четкой зависимости КДО ветра от сезонов года.

Поскольку максимумы ОСО (совпадающие с началом восточного сдвига ~ 10 гПа) всегда наблюдаются вблизи декабрьского или июньского солнцестояния и временной интервал между последовательными максимумами всегда составляет 2 или 2,5 года (8 или 10 сезонов соответственно), то возможны только четыре комбинации сезона и КДО. Однако, согласно результатам анализа КДО за примерно 70-летний период наблюдений (1953–2024 гг.), все спуски восточного сдвига, начавшиеся на уровне ~ 10 гПа в декабре, продолжались до уровня ~ 70 гПа в течение 8 сезонов до соответствующего декабря. Поэтому (по неизвестной пока причине) не бывает 6-сезонного спуска с декабря до июня и, соответственно, 8-сезонного интервала между началами восточного сдвига на ~ 10 гПа от декабря до декабря. Следовательно, существует только три возможных варианта связи ветра КДО с сезонами года и, соответственно, три группы временных интервалов идентичного соотношения сезонов и фаз цикла КДО. Подчеркнем также, что поскольку сезонные закономерности КДО и ОСО связаны с солнцестояниями или равноденствиями по ежедневным данным [25, 27], то сезоны года определяются как 3-месячные интервалы декабрь–февраль, март–май, июнь–август и сентябрь–ноябрь (в отличие от определения сезонов в разделе «Сезонная зависимость КДО» при использовании среднемесячных данных).

I группа. Спуск восточного ветра (сдвига) от уровня ~10 гПа до уровня ~70 гПа в течение 6 сезонов с июня по декабрь; далее еще 2 сезона до начала на ~10 гПа очередного восточного сдвига в солнцестояние в июне (см. рис. 2). То есть всего 8 сезонов, или 2 года, между началами восточного сдвига на ~10 гПа *от июня до июня*.

II группа. Более продолжительный спуск восточного сдвига от ~10 гПа до ~70 гПа, в течение 8 сезонов с июня по июнь, соответствует интервалу 10 сезонов, или 2,5 года (*с июня до декабря*), между началами восточного сдвига на уровне ~10 гПа.

Таблица

Временные интервалы идентичного соотношения сезонов и фаз цикла КДО

Table

Time intervals of identical relationships between seasons and phases of the QBO cycle

№ п/п	I группа 8 сезонов (2 года): июнь–июнь	II группа 10 сезонов (2,5 года): июнь–декабрь	III группа 10 сезонов (2,5 года): декабрь–июнь
1			Декабрь 1952 — июнь 1955
2	Июнь 1955 — июнь 1957		
3	Июнь 1957 — июнь 1959		
4	Июнь 1959 — июнь 1961		
5	Июнь 1961 — июнь 1963		
6, 7	Два аномальных цикла КДО 36-месячного сценария (июнь 1963 — июнь 1969)		
8	Июнь 1969 — июнь 1971		
9	Июнь 1971 — июнь 1973		
10	Июнь 1973 — июнь 1975		
11		Июнь 1975 — декабрь 1977	
12			Декабрь 1977 — июнь 1980
13		Июнь 1980 — декабрь 1982	
14			Декабрь 1982 — июнь 1985
15		Июнь 1985 — декабрь 1987	
16			Декабрь 1987 — июнь 1990
17		Июнь 1990 — декабрь 1992	
18			Декабрь 1992 — июнь 1995
19	Июнь 1995 — июнь 1997		
20	Июнь 1997 — июнь 1999		
21		Июнь 1999 — декабрь 2001	
22			Декабрь 2001 — июнь 2004
23	Июнь 2004 — июнь 2006		
24	Июнь 2006 — июнь 2008		
25		Июнь 2008 — декабрь 2010	
26			Декабрь 2010 — июнь 2013
27		Июнь 2013 — декабрь 2015	
		*Аномалия КДО в 2015 (ноябрь) — 2016 (июнь) гг.	
28			Декабрь 2016 — Июнь 2019
		*Аномалия КДО в 2019 (сентябрь) — 2020 (август) гг.	
29		Июнь 2020 — декабрь 2022	
30			Декабрь 2022 — июнь 2025

Примечание. *— аномалии КДО ветра в 2015–2016 гг. и 2019–2020 гг. привели к сдвигу фазы, и КДО ветра вернулись к своей стандартной эволюции примерно через год после каждой аномалии.
Note. * – Anomalies of wind QBO in 2015–2016 and 2019–2020 led to a phase shift, and the wind QBO returned to their standard evolution approximately a year after each anomaly.

III группа. После предыдущего (II группа) случая наблюдается спуск восточного сдвига от ~ 10 гПа до ~ 70 гПа в течение 8 сезонов с декабря до декабря. До очередного восточного сдвига через 2 сезона в солнцестояние интервал равен 10 сезонам (2,5 года с декабря до июня).

В таблице перечислены временные интервалы для описанных трех групп, определенные по данным для КДО за период с 1953 по 2024 г. Из таблицы видно, что за событием из II группы всегда следует событие из III группы, в то время как за событием из I или III групп может следовать событие как из I, так и из II группы. На рис. 3 показан пример вертикальных профилей скорости ветра КДО и изменений экваториального ΔOCO (отклонения от среднегодовой вариации для 5° ю. ш. — 5° с. ш.) для трех возможных вариантов идентичного соотношения сезонов и фаз цикла КДО.

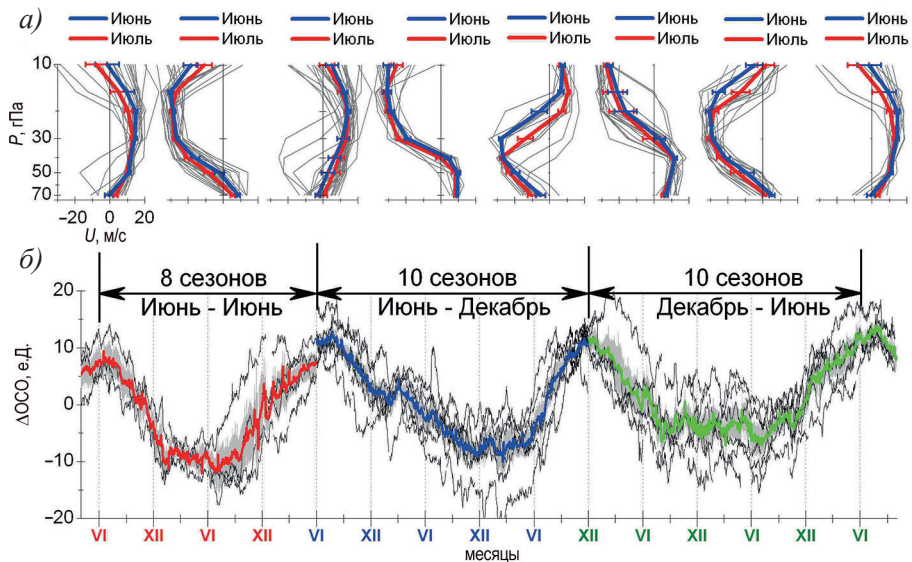


Рис. 3. Вертикальные профили скорости ветра КДО и изменения экваториального ΔOCO (отклонения от среднегодовой вариации для 5° ю. ш. — 5° с. ш.) для трех групп из таблицы:

a — профили скорости ветра для последовательности — I, затем II и далее III группа для всех июней и июлей за период 1953–2024 гг. (серые кривые) и соответствующие средние профили для июня (синие) и для июля (красные); *б* — вариации ΔOCO для той же последовательности групп — для всех случаев (тонкие черные кривые) и средние вариации (красная, синяя и зеленая кривые для I, II и III групп соответственно) по данным за период 1978–2015 гг. Серые полосы указывают стандартную ошибку среднего. Моменты максимумов ΔOCO соответствуют окончанию спуска *W*-сдвига на ~ 70 гПа и одновременному началу спуска последующего *E*-сдвига на ~ 10 гПа

Fig. 3. Vertical profiles of the wind speed of the QBO and changes in the equatorial ΔTOZ (deviations from the annual variation of total ozone for 5°S — 5°N) for three groups from the Table:

a — wind speed profiles for the sequence of groups — I, then II, and then III for all Junes and Julys for the period 1953–2024 (gray curves) and the respective average profiles for June (blue) and July (red); *б* — ΔTOZ (deseasonalized total ozone) variations for the same sequence of groups — for all cases (thin black curves) and average variations (red, blue and green curves for groups I, II and III, respectively) according to data for the period 1978–2015. The gray bars indicate standard error of the mean. The moments of ΔTOZ maxima correspond to the end of the descent of the *W*-shear at ~ 70 hPa and the simultaneous beginning of the descent of the subsequent *E*-shear at ~ 10 hPa

Пример на рис. 3 соответствует последовательности — I, затем II и далее III группа. Такая последовательность наблюдалась, например, с июня 1997 г. по июнь 2004 г. или с июня 2006 г. по июнь 2013 г. (см. таблицу). На рис. 3а показаны профили скорости ветра для всех июней и июлей за период 1953–2024 гг. (серые кривые) и соответствующие средние профили для июня (синие) и для июля (красные). Интервал июнь–июль соответствует солнцестоянию, совпадающему с зимним сезоном в Южном полушарии, то есть это период максимальной интенсивности циркуляции КДО именно в Южном полушарии. На рис. 3б представлены вариации $\Delta\text{ОСО}$ для той же последовательности групп — для всех случаев (тонкие черные кривые) и средние вариации (красная, синяя и зеленая кривые для I, II и III групп соответственно) по данным за период 1978–2015 гг. [27]. Сравнение изменений $\Delta\text{ОСО}$ с изменениями профилей подтверждает тесную связь между вариациями КДО ветра и озона, а следовательно, и циркуляцией, генерируемой КДО. При спуске восточного (западного) ветра наблюдается уменьшение (рост) $\Delta\text{ОСО}$, и время максимумов $\Delta\text{ОСО}$ совпадает с началом спуска восточного ветра на ~ 10 гПа.

Таким образом, анализ изменений характеристик антарктического вихря и озоновой дыры с использованием временных интервалов из таблицы позволит определить типичные особенности их межгодовых вариаций, обусловленные КДО. В следующем разделе представлен анализ влияния КДО на интенсивность антарктического стратосферного полярного вихря.

Межгодовые вариации антарктического полярного вихря

На рис. 4 представлены для той же последовательности групп, что и на рис. 3, изменения ветра КДО, озона на экваторе и в средних широтах и скорости зонального ветра в области максимума вихря на 60° ю. ш. Рис. 4а показывает средние профили скорости ветра КДО для июня и июля (черные кривые, те же, что и показанные на рис. 3а синим и красным цветом), то есть для периода максимальной интенсивности зимнего вихря в Южном полушарии. Кроме того, показаны профили для сентября, октября и ноября (красный, зеленый и синий цвет соответственно), то есть для периода озоновой дыры в Антарктике. На рис. 4б черная тонкая кривая демонстрирует отклонения от среднегодовой вариации $\Delta\text{ОСО}$ экваториального озона (5° ю. ш. — 5° с. ш., те же, что и показанные на рис. 3б), и красная, синяя и зеленая кривые показывают последовательно для трех групп $\Delta\text{ОСО}$ для широтного пояса $45\text{--}55^\circ$ ю. ш. [28]. Вариации экваториального и среднеширотного озона приведены на одном графике для облегчения сравнения. Видно, что, во-первых, максимумы (минимумы) $\Delta\text{ОСО}$ на широте $45\text{--}55^\circ$ ю. ш. соответствуют минимумам (максимумам) $\Delta\text{ОСО}$ на экваторе, что подтверждает их зависимость от КДО-циркуляции (направление движения в экваториальной и среднеширотной ветвях КДО-циркуляции противоположно, см. раздел «КДО циркуляции и КДО озона»). Во-вторых, интенсивность вариаций $\Delta\text{ОСО}$ на экваторе и на широте $45\text{--}55^\circ$ ю. ш. сравнима. Следовательно, влияние КДО на ОСО распространяется по крайней мере почти до границы полярного вихря.

Рис. 4в представляет отклонения от годовой вариации ΔU скорости зонального ветра на 60° ю. ш. на уровнях 10 и 30 гПа (изменения ΔU на 50 гПа не приведены, так как незначительно отличаются от изменений на 30 гПа). На рисунках 4б и 4в числами от 1 до 8 отмечены месяцы июнь–июль (в желтых овалах) и сентябрь–ноябрь (в голубых квадратах), которые соответствуют интервалам максимальной интенсивности

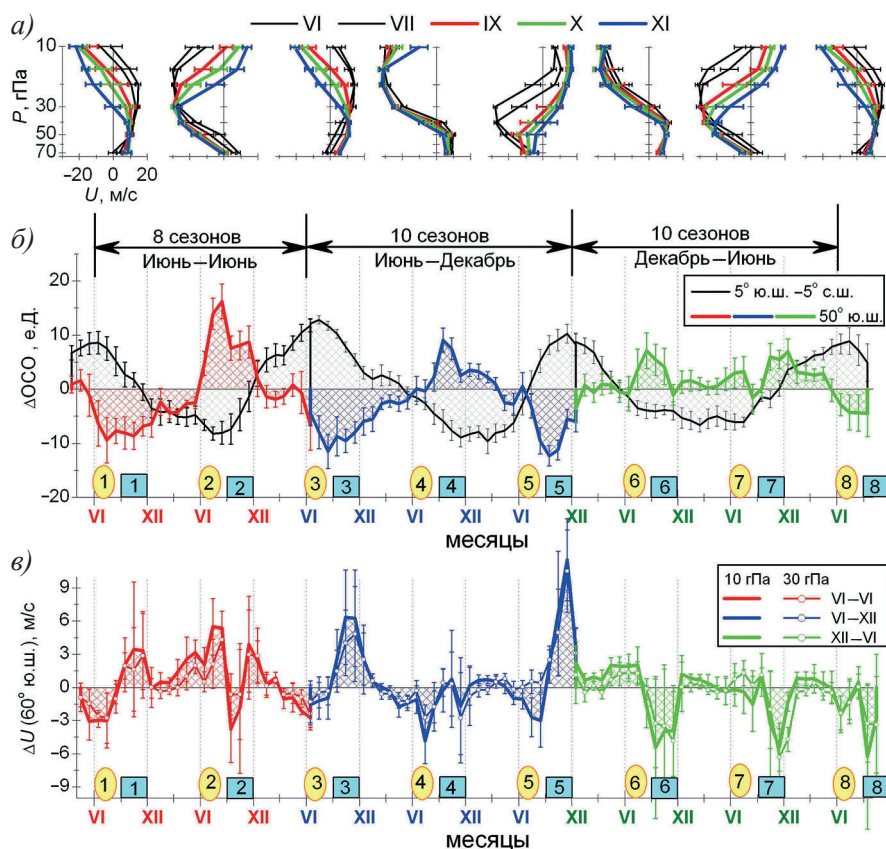


Рис. 4. Изменения ветра КДО, озона на экваторе и в средних широтах и скорости зонального ветра на 60° ю. ш. для той же последовательности групп, что и на рис. 3:

a — средние профили скорости ветра КДО для июня и июля (черные кривые, те же, что и на рис. 3*a*) и для сентября, октября и ноября (красный, зеленый и синий соответственно); *б* — отклонения от среднегодовой вариации ΔOCO экваториального озона (черная тонкая кривая, та же, что и на рис. 3*б*) и ΔOCO для широтного пояса 45–55° ю. ш.: красная, синяя и зеленая кривые последовательно для трех групп. Максимумы (минимумы) ΔOCO на 45–55° ю. ш. соответствуют минимумам (максимумам) ΔOCO на экваторе, что подтверждает их зависимость от КДО-циркуляции; *в* — отклонения от годовой вариации Δ*U* скорости зонального ветра на 60° ю. ш. на уровнях 10 и 30 гПа.

На рисунках 4*б* и 4*в* числами от 1 до 8 отмечены месяцы июнь–июль (в желтых овалах) и сентябрь–ноябрь (в голубых квадратах), которые соответствуют интервалам максимальной интенсивности вихря и озоновой дыры

Fig. 4. Changes in the wind QBO, ozone at the equator and in mid-latitudes, and zonal wind speed at 60°S for the same sequence of groups as in Fig. 3:

a — average QBO wind speed profiles for June and July (black curves, the same as in Fig. 3*a*) and for September, October and November (red, green and blue, respectively); *б* — deviations from the average annual variation of total ozone ΔTOZ at the equator (black thin curve, the same as in Fig. 3*б*), and ΔTOZ for the latitude belt 45–55° S: red, blue and green curves sequentially for three groups. Maxima (minima) ΔTOZ at 45–55° S correspond to the minima (maxima) of ΔTOZ at the equator, which confirms their dependence on the QBO circulation; *в* — deviations from the annual variation Δ*U* of the zonal wind speed at 60°S at levels 10 and 30 hPa.

In Figures 4*б* and 4*в*, numbers from 1 to 8 indicate the months June–July (in yellow ovals) and September–November (in blue squares), which correspond to the intervals of maximum intensity of the vortex and the ozone hole

вихря и озоновой дыры. Подчеркнем, что данное чередование вихрей и озоновых дыр от 1 до 8 наблюдается именно в представленном варианте последовательности групп — I, затем II и далее III. При анализе фактических данных следует учитывать, что возможны другие варианты (см. таблицу). Рассмотрим по рис. 4 соответствие между вариациями КДО ветра, ОСО и скорости вихря для событий от 1 до 8.

События (вихрь и озоновая дыра) 1, 2 и 3 наблюдаются в период быстрого, 6-сезонного, спуска восточного ветра КДО (I группа). При этом максимумы (минимум) $\Delta\text{ОСО}$ на экваторе связаны с началом *E*-спуска (*W*-спуска) на 10 гПа в июне–июле, то есть в период максимальной интенсивности КДО-циркуляции в Южном полушарии. Это объясняет наиболее интенсивные вариации $\Delta\text{ОСО}$ на $45\text{--}55^\circ$ ю. ш. (красная кривая на рис. 4б) по сравнению с вариациями для II и III групп (синяя и зеленая кривые, рис. 4б), в которых некоторые экваториальные экстремумы наблюдаются в декабре и, следовательно, совпадают с минимальным влиянием КДО-циркуляции в Южном полушарии.

Для события 8 изменения профилей ветра (рис. 4а) подобны изменениям для событий 1 и 3, однако экваториальный максимум $\Delta\text{ОСО}$ слабее, и поэтому слабее среднеширотный минимум $\Delta\text{ОСО}$. Причина, по-видимому, заключается в том, что на изменения озона оказывают влияние также вариации предыдущего года, которые существенно различаются — событию 3 предшествовал интенсивный максимум события 2, а событию 8 предшествовали слабые вариации около нуля события 7 (рис. 4б). Аналогично сравнение событий 2 и 7 — подобная картина в профилях ветра, соответствующая минимуму озона на экваторе и максимуму на $45\text{--}55^\circ$ ю. ш. Однако событию 2 предшествовал интенсивный минимум события 1, а событию 7 предшествовал максимум события 6, поэтому изменения озона различаются, несмотря на почти одинаковые изменения профилей КДО ветра.

События 4 и 6 наблюдаются в период медленного спуска восточного ветра в нижней стратосфере, а событие 5 в период быстрого спуска западного ветра (рис. 4а). Соответственно, в июне, то есть зимой Южного полушария, на экваторе наблюдается фаза спада $\Delta\text{ОСО}$ в период событий 4 и 6 и фаза роста в период события 5. Вариация на $45\text{--}55^\circ$ ю. ш. в июне–июле близка к нулевой, но позже, в августе–сентябре отмечается слабый максимум (для 4 и 6) или минимум (для 5) $\Delta\text{ОСО}$, связанный с влиянием КДО-циркуляции весной, то есть на фазе затухания ее ячейки в Южном полушарии.

Неожиданный результат получен для скорости зонального ветра на 60° ю. ш., которая характеризует интенсивность вихря (рис. 4в). Прежде всего, видно, что в вариациях ΔU эффект наблюдается в июне–августе, то есть в период максимума вихря, а не только в октябре–ноябре во время фазы ослабления зимнего вихря. ΔU изменяется в пределах от отрицательных значений ~ 5 м/с (вихрь слабее среднего уровня, события 1, 3, 4, 5, 8) до положительных значений около 6 м/с (вихрь интенсивнее среднего уровня, события 2, 6).

Следующая необычная особенность — практически во всех событиях изменения скорости ΔU в период максимума зимнего вихря противоположны изменениям весной в сентябре–ноябре в период озоновой дыры. Если зимой $\Delta U < 0$, то весной $\Delta U > 0$. Наиболее отчетливо это видно в событиях 1, 3, 5 — рост ΔU от июня к сентябрю на 3–5 м/с (статистическая значимость от $\sim 80\%$ до 99%). И наоборот, если зимний вихрь интенсивный $\Delta U > 0$, то в период озоновой дыры вихрь слабее среднего уровня $\Delta U < 0$, события 2 и 6 — уменьшение ΔU от июня к сентябрю на 6–7 м/с на 10 гПа (статистическая значимость $\sim 70\text{--}80\%$). Невысокая статистическая значимость

для некоторых событий объясняется, во-первых, малым количеством случаев, учитываемых при определении средних вариаций (см. таблицу), а во-вторых, достаточно резкими (в течение 2–3 месяцев) максимумами/минимумами в индивидуальных случаях, так что при смещении экстремумов на 1–2 месяца амплитуда средней вариации и ее статистическая значимость уменьшаются.

Сравнение ΔU и $\Delta \text{ОСО}$ (рис. 4*в* и 4*б*) показывает, что знак ΔU (положительная или отрицательная вариация) в июне–августе совпадает со знаком $\Delta \text{ОСО}$ на 45–55° ю. ш. для событий 1, 2, 3, 7 и 8. Эти экстремумы $\Delta \text{ОСО}$ соответствуют экваториальным экстремумам зимой Южного полушария, которые совпадают с началом спуска восточного или западного ветра КДО на 10 гПа (см. рис. 4*а*). Знак ΔU в событиях 4, 5 и 6 не совпадает с изменением среднеширотных экстремумов $\Delta \text{ОСО}$, так как соответствующие экваториальные экстремумы наблюдаются зимой Северного полушария (см. выше).

Также совместный анализ вариаций ΔU и профилей ветра КДО (рис. 4*в* и 4*а*) показывает, что менее интенсивный вихрь $\Delta U < 0$ наблюдается в событиях 1, 3 и менее отчетливо в событии 8 и совпадает с западным ветром в слое примерно от 60 до 15 гПа. Интенсивный $\Delta U > 0$ вихрь наблюдается в событии 2 и менее отчетливо в событии 7 и совпадает с восточным ветром в том же слое. Следовательно, интенсивность антарктического вихря в зимний период не согласуется с общеизвестным эффектом Холтона–Тана. Заметим, что в работе [10] эффект Холтона–Тана был показан для зимнего полярного вихря Северного полушария, в то время как для Южного полушария анализ данных наблюдений проводился только для весеннего (сентябрь–ноябрь) и летнего (декабрь–февраль) сезонов.

Что касается поведения ветра КДО в период озоновой дыры, то почти для всех событий (кроме 4 и 6) в сентябре–ноябре наблюдается быстрое изменение вертикальной структуры ветра КДО. При этом на верхних уровнях (для которых обнаружен эффект Холтона–Тана в Южном полушарии в [20]) фаза КДО изменяется на противоположную по сравнению с фазой КДО в июне–июле. Поскольку знак интенсивности вихря ΔU также изменяется на противоположный, то зависимость интенсивности вихря от фазы КДО вновь противоречит эффекту Холтона–Тана. Исключения представляют события 5 и 6, с интенсивным и слабым вихрем при западной и восточной фазе КДО соответственно.

Заключение

Примерно в течение 40 лет в литературе доминирует мнение, что стратосферный полярный вихрь при восточной фазе КДО слабее, чем при западной фазе, что известно как эффект или связь Холтона–Тана. При этом если для вихря Северного полушария это справедливо в течение зимы, то для вихря Южного полушария связь с КДО наблюдается только весной. Обычно данную особенность объясняют тем, что полярный вихрь в Южном полушарии гораздо интенсивнее и устойчивее, чем его аналог в Северном полушарии. Поэтому в зимний период планетарные волны существенно не нарушают южный высокоширотный вихрь и, как следствие, КДО не влияет на его силу. Однако в сезон разрушения вихря в октябре–ноябре, во время весеннего потепления, когда вихрь ослаблен, КДО может модулировать волновой режим и силу вихря.

Как правило, реакцию вихря на фазу КДО определяют на основе знака скорости U_{EQ} на определенном вертикальном уровне, и далее отклик определяется как разность средних значений некоторого параметра вихря для разных фаз КДО. При этом

выводы о связи с интенсивностью вихря зависят от высотного уровня, по которому определяют тип фазы КДО. Однако давно было показано, что использование знака экваториального ветра на одном уровне или даже комбинации нескольких уровней не является полностью надежным, поскольку не учитывает время спуска ветра КДО относительно сезонов года [18]. Кроме того, неизвестно, на каких высотах ветер КДО оказывает наиболее сильное влияние на внетропическую стратосферу [11, 12]. Вследствие того, что период КДО не постоянен и не является кратным годовому периоду, фазовое соотношение между сезонным циклом и КДО циклом все время изменяется [12, 17, 18], что приводит к множеству вариантов вертикальной структуры КДО ветра в период антарктического зимнего вихря и озоновой дыры.

Однако учет сезонных закономерностей КДО ветра и экваториального озона, использованный в данной работе, показал, что число возможных вариантов совпадения фаз циклов КДО с сезонами года строго ограничено. Это позволяет определить типичные особенности межгодовых вариаций характеристик полярного вихря и озоновой дыры в Антарктике, обусловленные КДО. Анализ экспериментальных данных методом наложенных эпох с использованием временных интервалов между ключевыми датами, которые соответствуют максимумам экваториального ΔOSO или в равной степени началам спуска восточного сдвига ветра КДО на 10 гПа, выявил следующие закономерности:

1. Вариации ΔOSO на широтах $45\text{--}55^\circ$ ю. ш., то есть в окрестности границы южного вихря, согласованы с вариациями ΔOSO на экваторе, что подтверждает их зависимость от КДО-циркуляции. Сравнимая интенсивность вариаций ΔOSO на экваторе и на $45\text{--}55^\circ$ ю. ш. свидетельствует о том, что влияние КДО на OSO распространяется по крайней мере до границы полярного вихря.

2. В вариациях интенсивность вихря ΔU (скорости зонального ветра на 60° ю. ш.) эффект КДО наблюдается не только в октябре–ноябре во время фазы ослабления зимнего вихря, но и в период максимума вихря в июне–августе. Амплитуда вариаций достигает примерно ± 5 м/с. При этом изменения скорости ΔU в период максимума зимнего вихря противоположны изменениям весной в период озоновой дыры. Если зимний вихрь интенсивный (слабый), то в период озоновой дыры вихрь слабее (интенсивнее) среднего уровня.

3. Знак ΔU (выше или ниже среднегодового уровня) в июне–августе совпадает со знаком ΔOSO на $45\text{--}55^\circ$ ю. ш. для событий, которые соответствуют экваториальным экстремумам ΔOSO зимой Южного полушария (совпадающим с началом спуска восточного или западного ветра КДО на 10 гПа).

4. Межгодовая изменчивость интенсивности полярного вихря и озоновой дыры в Антарктике, то есть чередование максимумов/минимумов, зависит от чередования циклов КДО разных сценариев.

В этой статье мы приводим полученные из анализа данных наблюдений доказательства об особенностях КДО модуляции интенсивности стратосферного полярного вихря в Антарктике. Эти результаты могут быть использованы при сравнении моделируемых эффектов КДО с наблюдениями и, следовательно, при проверке предполагаемых механизмов влияния КДО. Для объяснения полученных закономерностей и ответа на вопрос об их механизмах требуются изучение с помощью численных моделей и дополнительные исследования экспериментальных данных о различных характеристиках вихря и озоновой дыры.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 5.2 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. (регистрационный № АААА-А20-120041590008-0).

Благодарности. Автор благодарен рецензентам за полезные замечания.

Competing interests. There are no competing interests.

Funding. The research was carried out within project 5.2 of Roshydromet Plan of NITR for 2020–2024 (registration number АААА-А20-120041590008-0).

Acknowledgments. The author are grateful to the reviewers for helpful comments.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. World Meteorological Organization (WMO). Executive Summary. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278*. Geneva: WMO; 2022. 56 p. <https://ozone.unep.org/system/files/documents/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022-Executive-Summary.pdf>
2. Krummel P.B., Fraser P.J., Derek N. The 2022 Antarctic Ozone Hole Summary: Final Report, Report prepared for the Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. Australia: CSIRO; 2023. 30 p. <https://www.dcceew.gov.au/sites/default/files/documents/2022-aoh-final-report.pdf>
3. Solomon S., Ivy D.J., Kinnison D., Mills M.J., Neely R.R., Schmidt A. Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*. 2016;353(6296):269–274. <https://doi.org/10.1126/science.aac0061>
4. Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kinnersley J. S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M. The quasi-biennial oscillation. *Reviews of Geophysics*. 2001;39(2):179–229. <https://doi.org/10.1029/1999RG000073>
5. Bojkov R.D. The 1979–1985 ozone decline in Antarctic, as reflected in ground level observations. *Geophysical Research Letters*. 1986;13(12):1236–1239. <https://doi.org/10.1029/GL013i012p01236>
6. Garcia R., Solomon S. A possible relationship between interannual variability in Antarctic ozone and quasi-biennial oscillation. *Geophysical Research Letters*. 1987;14(8):848–851. <https://doi.org/10.1029/GL014i008p00848>
7. Lait L., Schoeberl M.R., Newman P.A. Quasi biennial modulation of the Antarctic ozone depletion. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1989;94(D9):11559–11571. <https://doi.org/10.1029/JD094iD09p11559>
8. Angell J.K. Reexamination of the relation between depth of the Antarctic ozone hole, and equatorial QBO and SST, 1962–1992. *Geophysical Research Letters*. 1993;20(15):1559–1562. <https://doi.org/10.1029/93GL01762>
9. Herman J.R., Newman P.A., Larko D. Meteor 3/TOMS observations of the 1994 ozone hole. *Geophysical Research Letters*. 1995;22(23):3227–3229. <https://doi.org/10.1029/95GL02850>
10. Holton J.R., Tan H.-C. The influence of the equatorial quasibiennial oscillation on the global circulation at 50 mb. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1980;37(10):2200–2208. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<2200:TIOTEQ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2200:TIOTEQ>2.0.CO;2)
11. Anstey J.A., Osprey S.M., Alexander J., Baldwin M.P., Butchart N., Gray L., Kawatani Y., Newman P.A., Richter J.H. Impacts, processes and projections of the quasi-biennial oscillation. *Nature Reviews and Earth Environment*. 2022;3:588–603. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00323-7>
12. Anstey J.A., Shepherd T.G. High-latitude influence of the quasi-biennial oscillation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2014;140(678):1–21. <https://doi.org/10.1002/qj.2132>
13. Garfinkel C.I., Shaw T.A., Hartmann D.L., Waugh D.W. Does the Holton-Tan mechanism explain how the quasi-biennial oscillation modulates the arctic polar vortex? *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2012;69(5):1713–1733. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-11-0209.1>

14. Gray L.J., Anstey J.A., Kawatani Y., Lu H., Osprey S., Schenzinger V. Surface impacts of the quasi-biennial oscillation. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2018;18(11):8227–8247. <https://doi.org/10.5194/acp-18-8227-2018>
15. Peca-Ortiz C., Manzini E., Giorgetta M.A. Tropical deep convection impact on southern winter stationary waves and its modulation by the quasi-biennial oscillation. *Journal of Climate*. 2019;32(21):7453–7467. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0763.1>
16. White I.P., Lu H., Mitchell N.J., Phillips T. Dynamical response to the QBO in the northern winter stratosphere: signatures in wave forcing and eddy fluxes of potential vorticity. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 2015;72(12):4487–4507. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0358.1>
17. Holton J.R. Influence of the annual cycle in meridional transport of the quasi-biennial oscillation in total ozone. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1989;46(10):1434–1439. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<1434:IOTACI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<1434:IOTACI>2.0.CO;2)
18. Gray L.J., Ruth S. The modeled latitudinal distribution of the ozone quasi-biennial oscillation using observed equatorial winds. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1993;50(8):1033–1046. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<1033:TMLDOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<1033:TMLDOT>2.0.CO;2)
19. Baldwin M.P., Birner T., Brasseur G., Burrows J., Butchart N., Garcia R., Geller M., Gray L., Hamilton K., Harnik N., Hegglin M.I., Langematz U., Robock A., Sato K., Scaife A. A. 100 years of progress in understanding the stratosphere and mesosphere. *Meteorological Monographs*. 2019;59(27):1–62. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHIS-D-19-0003.1>
20. Baldwin M.P., Dunkerton T.J. Quasi-biennial modulations of the Southern Hemisphere stratospheric polar vortex. *Geophysical Research Letters*. 1998;25(17):3343–3346. <https://doi.org/10.1029/98GL02445>
21. Габис И.П., Трошичев О.А. Квазидвухлетние осцилляции в экваториальной стратосфере: сезонные закономерности изменения ветра, дискретность периода цикла и прогноз его длительности. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2011;51(4):508–519.
Gabis I.P., Troshichev O.A. The quasi-biennial oscillations in the equatorial stratosphere: seasonal regularities in zonal wind changes, discrete QBO-cycle period and prediction of QBO-cycle duration. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011;51(4):501–512. <https://doi.org/10.1134/S0016793211040104>
22. Gabis I.P., Troshichev O.A. QBO cycle identified by changes in height profile of the zonal winds: new regularities. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. 2005;67(1–2):33–44. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.07.015>
23. Gabis I.P. Forecast of development of quasi-biennial oscillation in the equatorial stratospheric wind until April 2014. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. 2012;80:79–91. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.03.008>
24. Gabis I.P. The validity of long-term prediction of quasi-biennial oscillation (QBO) as a proof of the exact seasonal synchronization of the equatorial stratospheric QBO cycle. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. 2015;124:44–58. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.01.015>
25. Gabis I.P. Seasonal dependence of the quasi-biennial oscillation (QBO): New evidence from IGRA data. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. 2018;179:316–336. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.08.012>
26. Troshichev O.A., Gabis I.P., Krivolutsky A.A. Influence of cosmic weather on the Earth's atmosphere. *Arctic and Antarctic Research*. 2021;67(2):177–207. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-177-207>
27. Gabis I.P. Quasi-biennial oscillation of the equatorial total ozone: A seasonal dependence and forecast for 2019–2021. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. 2020;207(C):105353. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105353>
28. Gabis I.P. Quasi-biennial modulation of total ozone distribution from equator to polar regions based on observations. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. 2023;247:106076. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106076>