

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-8-27>

УДК 551.555+551.587

## **Некоторые особенности циркуляции в свободной атмосфере Южного полушария, влияющие на полеты воздушных судов**

***А.Р. Иванова***

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия  
ivanova@mecom.ru*

Представлен краткий обзор особенностей циркуляции в тропосфере и нижней стратосфере Южного полушария. Рассмотрены сезонные и многолетние изменения в положении и интенсивности струйных течений. Описаны особенности поведения и структуры тропопаузы, в том числе в период полярной ночи. Показано влияние глобального потепления и изменения содержания стратосферного озона на изменение циркуляции в Южном полушарии.

*Ключевые слова:* индексы циркуляции, Южное полушарие, тропопауза, струйные течения, озон

## **Some features of the Southern Hemisphere circulation in the free atmosphere affecting aircraft flights**

***A.R. Ivanova***

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
ivanova@mecom.ru*

A brief overview of the circulation features in the troposphere and lower stratosphere of the Southern Hemisphere is presented. Seasonal and long-term changes in the position and intensity of jet streams are considered. Features of the behavior and structure of the tropopause are described, including the polar night time. The impact of global warming and changes in stratospheric ozone on the circulation variations in the Southern Hemisphere is discussed.

*Keywords:* circulation indices, Southern hemisphere, tropopause, jet streams, ozone

### **Введение**

В связи с блокировкой поступления в нашу страну информации Всемирной системы зональных прогнозов (ВСЗП) возникла необходимость ее импортозамещения продукцией на основе отечественных глобальных моделей численного прогноза погоды (ЧПП). До недавнего времени ФГБУ «Гидрометцентр России» выпускал резервную информацию с использованием российской модели ЧПП для метеообеспечения дальних перелетов исключительно по территории Северного полушария. Прекращение информирования российских авиакомпаний глобальными

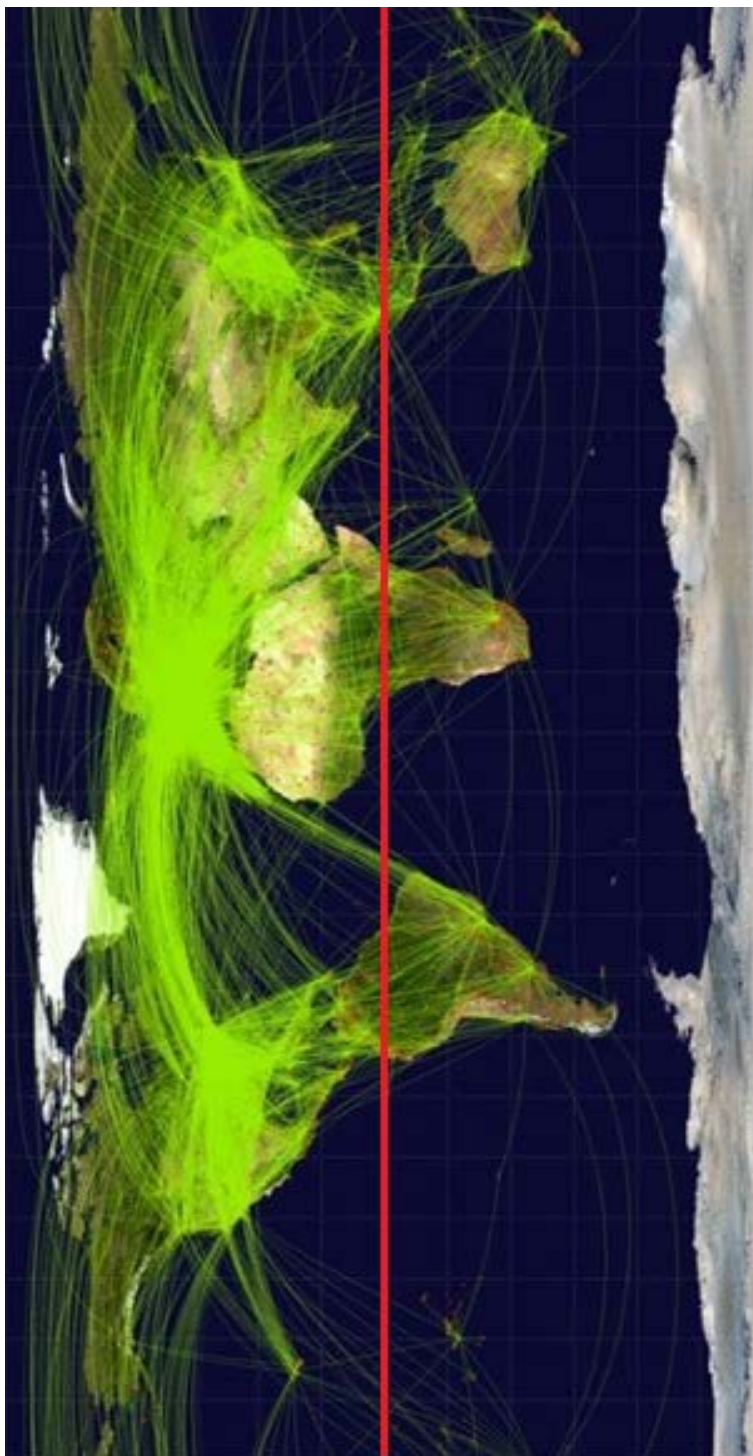
прогнозами со стороны центров ВСЗП – Лондон и Вашингтон – обусловило насущную потребность внимательного изучения процессов в тропосфере и стратосфере Южного полушария для выпуска по этой территории прогностических карт особых явлений для авиации. Хотя в Южном полушарии живет всего 10 % населения Земли и, ожидаемо, интенсивность воздушного движения здесь гораздо ниже, чем в Северном полушарии (рисунок), тем не менее, глобальные прогнозы предполагают полное освещение информацией всего земного шара.

Разработка задач постпроцессинга для прогноза особых для авиации явлений в Южном полушарии может иметь свою специфику, поскольку существуют значительные отличия в атмосферной циркуляции двух полушарий, обусловленные следующими объективными факторами.

По сравнению с Северным полушарием, в Южном полушарии меньше суши и больше воды. Южная часть Тихого океана, Южная Атлантика, Индийский океан и различные моря, такие как Тасманово море между Австралией и Новой Зеландией и море Уэдделла у берегов Антарктиды, покрывают около 80,9 % территории Южного полушария. Площадь суши составляет только 19,1 %. Для сравнения, в Северном полушарии суша занимает около 39,3 % от общей площади [<http://geo.historic.ru/gazetteer/st002.shtml>]. Этот факт свидетельствует о том, что влияние подстилающей поверхности на циркуляцию атмосферы будет проявляться в Южном полушарии иначе, чем в Северном. Из-за более однородной подстилающей поверхности в Южном полушарии зональная циркуляция (западный перенос) более устойчива, чем в Северном.

Другим отличительным фактором Южного полушария является наличие Антарктического ледового щита, который оказывает значительное влияние на формирование атмосферной циркуляции. Стоит отметить, что в последние годы в связи с развитием туризма возросла активность воздушного движения к берегам ледяного континента (в основном за счет рейсов из Австралии и ЮАР). На Антарктиде и прилегающих островах расположены около 40 аэродромов и взлетно-посадочных полос, часть из которых законсервирована. В настоящее время в качестве действующих можно назвать новый российский аэродром «Зенит» на станции Прогресс, взлетно-посадочные полосы российской станции Новолазаревская [1], а также аэродромы, принадлежащие Чили на о. Ватерлоо (имени Тениенте Родолфо Марша Мартина, SCRM), Австралии (Уилксон, YWKS) и США (Амудсен-Скотт, NZSP; Мак-Мердо, NZPG) [[avia.pro/blog/aeroporty-antarctidy](http://avia.pro/blog/aeroporty-antarctidy)].

Стоит упомянуть, что из-за более развитой сети наземных наблюдений в Северном полушарии, а также из-за того, что здесь проживает 90 % населения земного шара, традиционно качеству прогнозов именно на этой территории уделялось больше внимания при описании процессов в глобальных моделях ЧПП. Порой для экономии вычислительных ресурсов эти модели производят вычисления в Южном полушарии на более грубой сетке [43, <https://meteoinfo.ru/mrf-system-about>].



**Рисунок.** Карта воздушного движения (информация с портала [<https://www.northpointaviation.com/>]). Линия экватора обозначена красным цветом.

**Figure.** Air traffic map (from portal [<https://www.northpointaviation.com/>]). Equator line is denoted in red.

Рассмотрим некоторые объекты, характеризующие особенности циркуляции в атмосфере Южного полушария, которые будут оказывать влияние на полеты воздушных судов по маршруту. В данной работе в качестве таких объектов анализируются струйные течения (СТ) и тропопауза, информация о которых представляется на картах особых явлений («significant weather») для авиации [8]. В районе тропопаузы – области верхней тропосферы и нижней стратосферы – расположены эшелоны дальнемагистральных воздушных судов. Информация о струйных течениях имеет важное аэронавигационное значение с точки зрения как эффективности и экономичности полетов (использование попутного потока), так и их безопасности (наличие зон турбулентности в ясном небе).

### Историческая справка

Понимание характера атмосферных движений в Южном полушарии невозможно без регулярного зондирования атмосферы в этом регионе. Подобные исследования состояния атмосферы над Антарктидой (высотные наблюдения) проводились еще в начале 40-х годов прошлого века. Экспедиция Антарктической службы США с 26 апреля 1940 г. по 15 января 1941 г. осуществила запуск 230 шаров-пилотов и 190 радиозондов со станции Little America, расположенной в 800 км от Южного полюса. По материалам этой экспедиции впервые было заявлено об «исчезновении» тропопаузы в полярную ночь [20].

Однако активное изучение атмосферной циркуляции Южного полушария было начато чуть позднее, в конце 1950-х годов, когда сбор глобальных данных во время Международного геофизического года (1957–1958 гг.) позволил ликвидировать некоторые пробелы в знаниях об атмосферных процессах в южных широтах. Помимо радиозондирования, атмосфера изучалась с помощью самолетов-лабораторий: например, советская летающая метеорологическая обсерватория «Антарктида» функционировала с 1958 по 1962 год [12]. Регулярные сведения о погоде поступали также с бортов военно-транспортной авиации США при полетах от г. Крайстчерч (Новая Зеландия) до антарктической станции США Мак-Мёрдо [2]. Наступившая впоследствии эра метеорологических спутников и появление моделей численного прогноза погоды расширили границы представления об особенностях циркуляции атмосферы в Южном полушарии и о процессах обмена между двумя полушариями. В 1972 г. Американское метеорологическое общество выпустило в серии «Метеорологические монографии» книгу «Метеорология Южного полушария», русский перевод которой увидел свет в 1976 г. [9]. В данной монографии ветер над Южным полушарием анализировался только в рамках геострофического соотношения по данным о давлении, поскольку далеко не все существовавшие на тот момент станции радиозондирования проводили наблюдения за ветром. Полученные материалы позволили установить наличие в верхней

тропосфере единой мощной зональной струи с осью на высоте 250 гПа, смещающейся от января к июлю с  $50^\circ$  до  $30^\circ$  ю. ш.

Отметим, что, несмотря на дальнейшее развитие систем наблюдений, геострофический подход к исследованию циркуляции оказался применимым и в 21 веке. Так, в работе [23] по материалам реанализа геопотенциальной высоты в период 1958–2002 гг. была обнаружена способность к раздвоению высотной струи в Южном полушарии и ее разделению на субтропическое и полярное струйные течения.

В настоящее время основным источником информации о состоянии атмосферы над Южным полушарием служат наблюдения с геостационарных и полярно-орбитальных спутников. Кроме этого, дважды в сутки поступает информация со станций глобальной аэрологической сети. Их количество в Южном полушарии превышает сотню, 11 из них расположены на территории Антарктиды [<https://oscar.wmo.int/surface/#/>].

### **Индексы, определяющие циркуляцию атмосферы в Южном полушарии**

Для анализа особенностей циркуляции атмосферы исследователи используют некоторые глобальные или региональные индексы. В Южном полушарии это прежде всего индекс Южного колебания и индекс Антарктического колебания.

*Индекс южного колебания (Southern Oscillation Index, SOI)* – это стандартизированный индекс, который представляет собой осредненную за пять месяцев разность нормированных аномалий давления на станциях Таити и Дарвин (Австралия) [5]. В целом, сглаженные временные ряды *SOI* очень хорошо соответствуют изменениям температуры океана в восточной тропической части Тихого океана. Отрицательная фаза *SOI* представляет давление воздуха ниже нормы на Таити и давление воздуха выше нормы в Дарвине. В отрицательную фазу *SOI* отмечено усиление западного переноса в субтропическом поясе Южного полушария в период австралийской зимы [13]. Длительные периоды отрицательных (положительных) значений *SOI* совпадают с аномально теплыми (холодными) водами океана в восточной тропической части Тихого океана, типичными для эпизодов Эль-Ниньо (Ла-Нинья) [<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi/>].

Цикл *Эль-Ниньо-Южного колебания (ENSO)* может оказывать заметное влияние на состояние стратосферы. В работе [5] демонстрировался отклик в стратосфере Южного полушария на аномалии, связанные с *ENSO*. Реакция была обнаружена в высоких широтах Южного полушария в августе. Оказалось, что более холодная австралийская весна в антарктической стратосфере в целом связана с теплой фазой *ENSO* и наоборот. Было установлено, что стратосферная циркуляция действует как промежуточное звено во взаимосвязи изменчивости *ENSO* с изменениями тропосферной циркуляции в период австралийских весны и лета. Связь

динамики стратосферного полярного вихря над Антарктидой с *ENSO* подтверждена также в [18, 54].

*Индекс Антарктического колебания (AntArctic Oscillation, AAO)* – первый главный компонент поля геопотенциала поверхности 850 гПа в Южном полушарии. Антарктическое колебание по своей природе не относится к «глобальным» модам атмосферной циркуляции, а является составной частью более сложных глобальных структур в общей циркуляции атмосферы [5]. *AAO* представляет собой зонально-симметричную моду изменчивости геопотенциала в Южном полушарии с областями противоположных знаков над Антарктикой и зональной полосой с центром вблизи 45° ю. ш. Положительная фаза *AAO* характеризуется понижением геопотенциальной поверхности над Антарктидой и ее подъемом над средними широтами полушария [62]. Индекс *AAO* является мерой интенсивности стратосферного полярного вихря, колебания которой могут повлиять на циркуляцию в тропосфере (возникновение погодных аномалий в полярных и субполярных широтах).

Другое название Антарктического колебания – *Южная кольцевая мода (Southern Annular Mode, SAM)*. В [55] *SAM* определена как ведущая эмпирическая ортогональная функция зонально-осредненной кинетической энергии, которая характеризуется смещениями по широте внутритропической струи и связана с большими вариациями в вихревых потоках импульса. Эта кольцевая мода имеет бароклинную природу и связана с изменениями в широтном положении источника бароклинических вихрей [32]. Южная кольцевая мода, согласно [23], выступает в качестве главного модулятора широты и интенсивности струи полярного фронта, при этом ее влияние на субтропическое СТ крайне незначительно. В положительной фазе *SAM* наблюдается сдвиг к полюсу и усиление полярной струи. В холодный сезон отмечается асимметрия *SAM*, связанная с интенсификацией полярного струйного течения [44]. Исследования *SAM* для второй половины прошлого века показали, что ее изменения были обусловлены нелинейной комбинацией естественного и антропогенного вынуждения, причем последнее было наиболее выражено в летний сезон [36].

Аналогом *SAM* является бароклиническая кольцевая мода (*Baroclinic annular mode, BAM*). Индекс *BAM* определяется как ведущий основной компонент вихревой кинетической энергии в Южном полушарии, рассчитанный для всех уровней от 1000 до 200 гПа и всех широт в полосе 20–70° ю. ш. *BAM* связан с изменениями амплитуд вихрей, но не с зональным средним потоком [37, 55]. Периодичность, связанная с *BAM*, потенциально важна для понимания внутрисезонной изменчивости климата полушария.

На изменчивость стратосферного полярного вихря в Южном полушарии может оказывать влияние фаза квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере [4, 42]. При западной фазе стратосферный зимний вихрь интенсивнее и температура в полярной области ниже, чем во время восточной фазы [4].

В задачах климатического моделирования [17] в качестве индексов циркуляции могут использоваться осевая широта и скорость западного переноса, а также *индекс ASL (Amudsen Sea Low)* – постоянно существующая область низкого давления над морем Амудсена у западного побережья Антарктиды, демонстрирующая сезонную миграцию между морем Росса (~150° з. д.) в июне и морем Беллинсгаузена (~110° з. д.) в январе.

### Струйные течения Южного полушария

Как указывалось выше, первые исследования высотного поля ветра выявили наличие единой мощной струи в верхней тропосфере Южного полушария [9]. Позднее было обнаружено ее разделение на два ярко выраженных струйных течения – полярное (или, по другой терминологии, субполярное), которое прослеживается практически во всей тропосфере со средним положением оси вблизи 50° ю. ш., и субтропическое – верхнетропосферное, расположенное в среднем над 30° ю. ш. Согласно спутниковой информации [35], в период с мая по декабрь верхнетропосферные СТ сливаются с нижнестратосферными, связанные с самой нижней частью стратосферного полярного вихря ЮП («subvortex»).

По данным реанализа NCEP/NCAR, за период 1958–2002 гг. была отмечена ярко выраженная сезонность в поведении СТ: в теплый сезон наблюдалась только одна струя с осью вблизи 40° ю. ш., тогда как осень и зима характеризовались отчетливо выраженным её разделением на сильное доминирующее субтропическое течение около 30° ю. ш. и полярное фронтальное течение, постепенно смещающееся к полюсу и достигающее 60° ю. ш. к концу холодного сезона [23]. Усиление субтропической струи в период австралийской зимы (июнь-август) и ее ослабление летом (декабрь-февраль) обсуждалось в работе [57]. Как было отмечено в [40], формирование субтропической струи в Южном полушарии связано с активностью Азиатского летнего муссона. Было также установлено, что на скорость субтропической струи наиболее заметно влияет Эль-Ниньо-Южное колебание. Над Тихим океаном в период Эль-Ниньо в теплый сезон скорость СТ примерно на 50 % больше, чем в период Ла-Нинья [23].

В течение второй половины прошлого века была обнаружена тенденция к замедлению субтропической струи [23]. Оценка снижения пиковой активности субтропического СТ была выполнена в работе [27], оно составило 17 %.

В отличие от субтропического СТ, для полярной струи было отмечено усиление интенсивности в период с 1958 по 2002 г. [23]. Полярное (или субполярное) СТ является постоянным и полукруглополярным потоком, распространяющимся по высоте на всю тропосферу и сопровождающимся отчетливой бароклинной зоной у поверхности земли. Выполненный в [40] анализ циклонических траекторий вихрей и верхнетропосферной циркуляции позволил установить связь между вихревым переносом и активностью СТ. Оказалось, что в отсутствие интенсивной субтропической струи

тихоокеанские циклонические траектории летом и осенью Южного полушария являются частью четко определенных циркумполярных циклонических траекторий вдоль полярного СТ. Зимой и весной, напротив, область активного вихревого переноса на верхних уровнях разделяется на главную ветвь вдоль субтропического СТ и вторичную ветвь вдоль полярной струи. В нижней тропосфере вихревой перенос формируется только вдоль обострившейся бароклинной зоны под полярным СТ.

В будущем из-за таяния антарктического морского льда предполагается сдвиг струйных течений и связанных с ними циклонических траекторий к полюсу [61]. Это же подтверждают другие работы, рассматривающие сценарии глобального потепления [34, 46]. В [34] утверждалось, что крупномасштабный прямой отклик на климатические изменения в принципе не изменит интенсивность и форму струи, а лишь сдвинет ее на  $21^\circ$  широты в направлении полюса. Отметим, что площадь антарктических льдов как неоспоримого фактора формирования циркуляции в Южном полушарии испытывает колебания с тенденцией к сокращению. В 2023 г. был зафиксирован минимум площади антарктического морского льда по данным спутниковых снимков [22], а анализ рядов наземных наблюдений в Антарктиде позволил сделать вывод о постепенном увеличении количества месяцев в году с «положительной динамикой температуры» [10].

Однако глобальное потепление, отразившееся на нагревании тропосферы, считается не единственной причиной изменения положения СТ в Южном полушарии. Другим фактором в работе [28] называются процессы в стратосфере, а именно истощение озонового слоя. Это же подтверждает и более поздняя работа [25], в которой авторы полагают, что сдвиги в положении струйных течений обусловлены изменениями температурного градиента верхней тропосферы и нижней стратосферы.

Изучение динамики струйных течений [29] позволило установить, что субтропический фронт и соответствующее ему СТ в период с 1979 по 2010 г. сместились к полюсу в Южном полушарии на  $6,5 \pm 0,2^\circ$  широты. Эта величина значительно превысила соответствующее значение для Северного полушария ( $3,7 \pm 0,3^\circ$ ). При оценке факторов такого смещения (изменения температуры поверхности суши и океана в тропическом поясе, прямое радиационное воздействие парниковых газов в тропосфере, изменения температуры нижней тропической стратосферы, квазидвухлетняя осцилляция и вулканические извержения) доминирующая роль была отдана парниковым газам. Отмечалось, что значительные изменения положения струйных течений влекут за собой заметные широтные сдвиги в глобальной циркуляции, распределении температуры и осадков [38].

Недавние исследования трендов тропосферной циркуляции по данным ERA-5 (1979–2022 гг.) обнаружили увеличение скорости западного переноса во внетропической части летом и осенью Южного полушария, при этом сдвиг к полюсу был отчетливо заметен только летом, с декабря по февраль [48]. Для полярного СТ было отмечено его усиление в тихоокеанском секторе. Для субтропического СТ отмечался наибольший

сдвиг его оси к экватору в южноамериканском секторе. При этом было зафиксировано ослабление части субтропической струи, простирающейся от востока Индийского океана через Австралию до восточной части Тихого океана. Однако, по данным [53], над регионом, охватывающим восточное побережье Австралии и акваторию Тасманова моря, в апреле-мае происходила интенсификация субтропического СТ.

### Тропауза в Южном полушарии

Тропауза является областью раздела между тропосферой и стратосферой. В тропиках по обе стороны экватора высота ее максимальна (~18 км) и примерно соответствует высоте изэнтропической поверхности 380 К [7], к полюсам происходит ее понижение, в зонах высотных атмосферных фронтов и струйных течений – разрывы или складкообразование (в зависимости от способа представления). В [35] отмечено, что летом в Южном полушарии разрывы тропопаузы с образованием вторичной тропопаузы сопровождают субтропическое СТ вниз по течению от региона Австралийского муссона. При этом в высоких широтах Южного полушария множественные тропопаузы почти повсеместны в июне-июле и связаны с уникальной термической структурой тропосферы в период полярной зимы.

Отождествление тропопаузы с какой-либо поверхностью не вполне физически корректно [7]. Более точно переход между тропосферой и стратосферой следовало бы характеризовать слоем определенной толщины, как, например, в известной концепции UTLS (upper troposphere-lowermost stratosphere). Однако требования со стороны авиационных пользователей к получению информации именно о высоте тропопаузы и температуре на этом уровне [8] по-прежнему заставляют разработчиков модельного постпроцессинга искать подобие некой поверхности, отделяющей тропосферный воздух от стратосферного. При этом такие особенности, как двойные и тройные тропопаузы, возникающие в зонах атмосферных фронтов, потребителя не интересуют. По этой причине исследования тропопаузы для ее последующего прогнозирования проводятся на базе не только определения [59], основанного на вертикальном градиенте температуры, но и различных иных предположений. К ним относят концепции динамической тропопаузы, озонопаузы [6], поверхности определенных значений градиента потенциальной температуры [56] и пр.

Корректное определение среднего положения тропопаузы в Южном полушарии, за исключением центральной части антарктического континента в период полярной ночи, полностью соответствует фундаментальной причине ее существования – это уровень минимальной температуры, находящийся между двумя источниками тепла (выделением тепла, связанным с экзотермическими реакциями в озоновом слое и длинноволновым излучением поверхности планеты). Однако ледовое покрытие

антарктического материка в условиях полярной ночи может привести к нарушению подобия радиационного равновесия на высотах. В таком случае, согласно классическому определению (через величину градиента температуры), тропопауза вполне может быть идентифицирована на поверхности льда, что соответствует формальному отсутствию слоя тропосферы над Антарктидой. Еще в 1942 г. в Бюллетене Американского метеорологического сообщества была опубликована статья Арнольда Кёрта «Исчезновение тропопаузы антарктической зимой» [20].

Отметим, что в другие периоды тропопауза в ее классическом смысле [59] может быть определена и над Антарктидой. Автор [47], выполнивший анализ данных 190 зондирований на станции Литтл Америка (78° с. ш., 162° з. д.) с апреля 1940 по январь 1941 г., посчитал тропопаузу как уровень радиационного равновесия и обнаружил наибольшее охлаждение атмосферы, соответствующее положению тропопаузы, на высотах между 8 и 10 км. В начале зимы Южного полушария этот уровень мог опускаться ниже 7 км.

На сегодняшний день для однозначного определения тропопаузы (с целью исключения проблемы «множественности») чаще всего используют «динамическую» концепцию, отождествляя границу между тропосферой и стратосферой изоповерхностью некоей пороговой величины вертикальной составляющей потенциального вихря Эртеля, чьи значения в стратосфере на порядок превышают тропосферные [6]:

$$q = -g(\xi + f) \partial \theta / \partial p.$$

Здесь  $g$  – ускорение свободного падения;  $\xi$  – относительная завихренность;  $f$  – параметр Кориолиса;  $\theta$  – потенциальная температура;  $p$  – давление. Единицей измерения считается  $1 \text{rvu} = 10^{-6} \text{ К кг}^{-1} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ .

Следует отметить, что значения  $q$  в Южном полушарии отрицательны (в отличие от Северного) из-за того, что параметр Кориолиса здесь меньше нуля. Отметим, что в Северном полушарии динамическая тропопауза, соответствующая той, что устанавливается в [59], чаще всего аппроксимируется изэртелическими поверхностями в диапазоне 3–4  $\text{rvu}$ . Однако большинство работ по исследованию тропопаузы в Южном полушарии отождествляют ее поверхностью -2  $\text{rvu}$  [16, 33, 39, 41, 52, 56].

Большой интерес исследователи проявляют к нарушению зональной циркуляции, проявляющемуся в процессах блокирования, обусловленных обрушением волн Россби (ОВР) вблизи тропопаузы. В [16] рассматривалось обрушение волн Россби на поверхности -2  $\text{rvu}$ . Было установлено, что чаще всего блокирование волн происходит в средних широтах Южного полушария, наблюдается преимущественно зимой в восточной части Тихого океана и может охватывать всю тропосферу. Сравнительно редкие летние эпизоды блокирования ограничены в основном западной частью Тихого океана. При этом ОВР как зимой, так и летом проявляется чаще в годы Эль-Ниньо, нежели в годы Ла-Нинья.

Исследование морфологии эпизодов волнового обрушения относительно положения полярной струи обнаружило, что в целом на полярной стороне струи происходит обрушение по циклоническому типу [52]. Смешанный тип наблюдается в средних широтах над районом Новой Зеландии (запад Тихого океана, экваториальный фланг полярного СТ). В средних широтах восточной части Тихого океана, где СТ слабы, наблюдаются эпизоды обрушения волн по антициклоническому типу.

В [41] установлено, что в целом в Южном полушарии ОВР на тропопаузе выше изэнтропы 320 К чаще всего происходит по антициклоническому типу. Существуют заметные различия в сезонных изменениях ОВР: зимой повторяемость таких эпизодов минимальна вблизи изэнтропической поверхности 350 К, летом – на поверхности 330 К. Эти сезонные вариации обусловлены изменениями в расположении тропосферных струй и динамической тропопаузы. Зимой положение субтропической струи совпадает с положением тропопаузы на изэнтропической поверхности 350 К над Австралией и в Южной части Тихого океана, что приводит к сезонному минимуму ОВР на этих высотах. Летом на высоте изэнтропы 330 К над Южной Атлантикой и югом Индийского океана совпадают полярное СТ и тропопауза, что приводит к подавлению процессов ОВР в этом регионе.

Проведенный в [15] анализ главных компонентов для внутрисезонной изменчивости внетропической зонально-осредненной тропопаузы Южного полушария показал, что эта изменчивость в основном определяется волнообразной деформацией тропопаузы, а не изменениями ее высоты. Подобные деформации вызваны аномальным обрушением волн на уровне тропопаузы в уже существующем аномальном стратосферном полярном вихре. Интенсивный полярный вихрь связан с подъемом тропопаузы, слабый – с ее опусканием. При этом обрушение волн в средних широтах формирует дипольное изменение тропопаузы. Эти две вынуждающие силы действуют на разных масштабах и могут быть разделены путем частотной фильтрации.

По данным климатического моделирования [45] установлено, что причиной ослабления полярного вихря (а следовательно, понижения тропопаузы) может быть генерация стационарных вертикально распространяющихся волн в условиях низкой сплоченности антарктического морского льда.

Деформация тропопаузы у берегов Антарктиды, проявляющаяся в виде складкообразования (фолдинг), обсуждается в работе [33]. Известно, что часто опускание тропопаузы происходит на обращенной к полюсу стороне струйного течения. Однако авторами было установлено, что зимой Южного полушария наличие СТ не может полностью объяснить подобную деформацию тропопаузы вдоль побережья Восточной Антарктиды. Дополнительным фактором, по мнению авторов, является сужение (contradiction) меридионального размера вихрей синоптического масштаба,

которое обусловлено крутым рельефом Антарктического плато и радиационным выхолаживанием.

В [26] по данным ERA-Interim было установлено, что часто на уровне тропопаузы вблизи полюса наблюдаются некоторые когерентные структуры, которые могут быть идентифицированы по локальному минимуму потенциальной температуры и локальному максимуму потенциальной завихренности. Это так называемые «troropause polar vortices» (TPV), полярные вихри на тропопаузе, являющиеся предшественниками приземных циклонов – поставщиков основного количества осадков над антарктическим ледовым щитом. На траектории этих вихрей существенно влияет рельеф Антарктиды. Расчеты по данным ERA-Interim показали, что существуют три района высокой плотности таких структур: непосредственно к востоку от Трансантарктического горного хребта над шельфовым ледником моря Росса, в районе Земли Коутса и хребта Шеклтона и в районе Земли Мак-Робертсона. Было выдвинуто предположение, что потенциальные аномалии завихренности возникают подобно вихревому следу, когда западные ветры над Антарктидой приближаются к вытянутому трансантарктическому хребту. В [58] указывается на связь TPV с переносом влаги из субтропических широт в системах влажных несущих полос («atmospheric river»).

В последние десятилетия было зафиксировано устойчивое повышение высоты тропопаузы в глобальном масштабе [19]. Для Южного полушария была произведена оценка тренда положения тропопаузы по градиенту озона (озонопаузы) и вертикальному градиенту температуры [49]. Оказалось, что в период 1998–2008 гг. в тропической зоне Южного полушария (0–15° ю. ш.) высота тропопаузы уменьшилась. В субтропической зоне (15–25° ю. ш.) результаты оказались неоднозначными – озонопауза продемонстрировала повышение, а классическая «термическая» тропопауза – понижение.

По данным реанализа NCEP/NCAR в [50] установлено, что в Южном полушарии колебания высоты тропопаузы были обусловлены не только аномалиями температуры в нижней стратосфере, но главным образом вихревым переносом тепла к полюсу, связанным с вихрями синоптического масштаба, и неадиабатическим нагревом. Как указывалось в [28], из-за однородности Южного полушария поток тепла, связанный с бароклинными вихрями, практически не меняется в течение года, поскольку здесь сохраняется направление меридионального градиента приземной температуры во все сезоны. Вторичный максимум направленного к полюсу вихревого потока тепла имеет место над тропопаузой Южного полушария и связан с бароклинными волнами, не способными распространиться высоко в стратосферу, амплитуды которых быстро разрушаются в нижней стратосфере.

### Некоторые аспекты связи циркуляции в Южном полушарии с динамикой стратосферного озона

Открытие в 80-х годах прошлого века резкого уменьшения концентрации озона над Антарктидой, названного «озоновой дырой», было зафиксировано в первую очередь по данным наземной аппаратуры (фильтровых озонметров). К началу 1990-х гг. общее содержание озона по данным измерений на российских антарктических станциях Мирный и Восток составляло всего 70–75 % от значений в период 1975–1980 гг. [11]. С начала 2000-х гг. наблюдается тенденция возвращения величин общего содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествовавшего появлению «озоновой дыры».

Как оказалось, открытие «озоновой дыры» позволило, кроме проблем, связанных с губительным воздействием ультрафиолетовой радиации, выявить довольно неожиданный эффект. Он был обнаружен в начале 2000-х гг. и состоял во влиянии резкого сокращения общего содержания озона на циркуляцию во всей толще тропосферы Южного полушария вплоть до подстилающей поверхности [31]. В [24] указывалось, что истощение озонового слоя было основной причиной смещения к полюсу тропосферного струйного течения в средних широтах летом Южного полушария и положительного индекса южной кольцевой моды в конце 20 века. Уменьшение содержания озона в 1960–1990-х годах привело к значительному охлаждению стратосферы из-за меньшего количества тепла, выделяемого в озоновом слое при экзотермических реакциях. Это повлекло за собой охлаждение полярной стратосферы примерно на 7 °С, что способствовало увеличению меридионального градиента температуры между Антарктикой и средними широтами Южного полушария. В результате произошло усиление западного стратосферного струйного течения и сдвиг в сторону полюса тропосферного СТ [29]. Это утверждение не всегда поддерживается исследователями, отдающими приоритет атмосферной динамике над атмосферной химией [3].

После 2001 года на фоне восстановления озонового слоя наблюдаемые величины трендов температуры в стратосфере оказались примерно на 50–75 % меньше, чем в эпоху истощения озонового слоя [14, 60]. Ожидается [24], что в течение последующих 50 лет восстановление озона практически нивелирует этот тренд. В [51] приводятся результаты экспериментов с ансамблем химико-климатических моделей, которые утверждают, что на этом фоне прогнозируемое повышение внетропической тропопаузы Южного полушария к концу 21 века существенно замедлится.

Хотя эффекты, связанные с «озоновой дырой», в основном наблюдаются весной Южного полушария, в [30] было установлено, что аномалии стратосферного озона, наблюдаемые поздней осенью (в мае), также вызывают радиационное охлаждение, распространяющееся на верхнюю тропосферу, и способствуют изменениям в тропосферной циркуляции.

## Заключение

Проведенный анализ особенностей атмосферной циркуляции Южного полушария продемонстрировал некоторые ее отличия от хорошо изученных подобных черт в Северном полушарии. Это касается структуры и динамики струйных течений, а также особенностей формирования и деформации тропопаузы. Эту специфику следует принимать во внимание не только при разработке постпроцессинга на базе выходной продукции моделей ЧПП, но и при модификации и настройке самих глобальных моделей.

Прежде всего, здесь не следует производить «загрубление» шага сетки, так как вихреразрешающая способность модели оказывает влияние на интенсивность струйных течений, определяемую процессами энергообмена между вихрями и зональным потоком. Необходим точный учет льда в модели – как морского, так и континентального, ибо антарктический ледовый щит является одним из определяющих факторов циркуляции в Южном полушарии. Наконец, необходима качественная настройка радиационного блока модели, учитывающая не только поступление солнечной радиации, но и ее взаимодействие с озоновым слоем над Антарктидой, поскольку это будет определять как положение тропопаузы, так и интенсивность циркумполярного стратосферного вихря, регулирующего, в том числе, динамику тропосферных струйных течений.

## Список литературы

1. Александров Е.И., Прахов А.Н. Сравнительная оценка некоторых климатических характеристик станции Новолазаревская и аэродрома станции Новолазаревская // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. Том. 63, № 3 (113). С. 27-38
2. Васильев А.А. Особенности метеорологических условий полетов самолетов над Антарктикой // Труды Гидрометцентра СССР. 1979. Вып. 215. С. 137-143.
3. Васильев А.А., Вильфанд Р.М. Распределение общего содержания озона в конце полярной зимы – ключ к прогнозу экстремальных сезонов? // Метеорология и гидрология. 2010. № 5. С. 82-87.
4. Габис И.П. Влияние квазидвухлетних осцилляций (КДО) на стратосферный полярный вихрь в Антарктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Том. 70, № 3. С. 353-372. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-353-372>.
5. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В. Крупномасштабные колебания циркуляции атмосферы в Южном полушарии и их влияние на изменение климата некоторых регионов земного шара в XX веке // Метеорология и гидрология. 2007. № 7. С. 5-17.
6. Иванова А.Р. Тропопауза: многообразие определений и современные подходы к идентификации // Метеорология и гидрология. 2013. № 12. С. 23-36.
7. Иванова А.Р. Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // Метеорология и гидрология. 2016. №3. С. 22-45.
8. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации. Международная организация гражданской авиации, издание 20-е, июль 2018.
9. Метеорология Южного полушария / под ред. Ч.У. Ньютона. Ленинград: Гидрометеоздат, 1976. 260 с.
10. Саливончик С.В., Какарека С.В. Анализ трендов климатических показателей по данным наземных метеонаблюдений и реанализа на Земле Эндерби, Восточная Антарктика // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Том. 68, № 2. С. 142-159.

11. Сибир Е.Е., Радионов В.Ф. Вариации общего содержания озона на российских антарктических станциях. Результаты многолетних наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Том 64, №3 (117). С. 250-261.
12. Черников А.А. Развитие наблюдений и исследований по аэрологии // Очерки по истории гидрометеорологической службы. Том 3. Книга II. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. С. 177-191.
13. Aceituno P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part II: Upper-Air Circulation // J. Clim. 1989. Vol. 2. P. 341-355.
14. Banerjee A., Fyfe J.C., Polvani L.M., Waugh D., Chan K.-L. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol // Nature. 2020. Vol. 579. P. 544-561. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2120-4>.
15. Barroso J.A., Zurita-Gotor P. Intraseasonal variability of the zonal-mean extratropical tropopause: the role of changes of the polar vortex strength and upper-troposphere wave breaking // J. Atmos. Sci. 2016. Vol. 73. P.1383-1399.
16. Berrisford P., Hoskins B.J., Tyrplis E. Blocking and Rossby Wave Breaking on the Dynamical Tropopause in the Southern Hemisphere // J. Atmos. Sci. 2007. Vol. 64. P. 2881-2898.
17. Bracegirdle T.J., Holmes C.R., Hosking J.S., Marshall G.J., Osman M., Patterson M., Rackow T. Improvements in circumpolar Southern Hemisphere extratropical atmospheric circulation in CMIP6 compared to CMIP5 // Earth and Space Science. 2020. Vol. 7, no. 6. e2019EA001065. <https://doi.org/10.1029/2019EA001065>.
18. Byrne N.J., Shepherd T.G. Seasonal Persistence of Circulation Anomalies in the Southern Hemisphere Stratosphere and Its Implications for the Troposphere // J. Clim. 2018. Vol. 31. P. 3467-3483.
19. Compendium of Findings on the Effects of Climate Change on Weather Hazards and Analysis of the Impacts of Climate Change on Aviation Operations // AeM Series No. 9. WMO, 2025.
20. Court A. Tropopause disappearance during Antarctic winter // Bull. Amer. Met. Soc. 1942. Vol. 23. P. 220-238.
21. Cuff T.J., Cai M. Interaction between low- and high-transient eddies in the Southern Hemisphere winter circulation // Tellus. 1996. Vol. 47A. P. 331-350.
22. Diamond R., Sime L.C., Holmes C.R., Schroeder D. CMIP6 Models Rarely Simulate Antarctic Winter Sea-Ice Anomalies as Large as Observed in 2023 // Geophys. Res. Lett. 2024. Vol. 58. 10 pp. <https://doi.org/10.1029/2024GL109265>.
23. Gallego D., Ribera P., Garcia-Herrera R., Hernandez E., Gimeno L. A new look for the Southern Hemisphere jet stream // Climate Dynamics. 2005. Vol. 24. P. 607-621. DOI 10.1007/s00382-005-0006-7.
24. Garnfinkel C.I., White I., Gerber E.P., Son S.-W., Jucker M. Stationary Waves Weaken and Delay the Near-Surface Response to Stratospheric Ozone Depletion // J. Clim. 2023. Vol. 36. P. 565-583. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0874.1.
25. Gerber E.-P., Son S.-W. Quantifying the Summertime Response of the Austral Jet Stream and Hadley Cell to Stratospheric Ozone and Greenhouse Gases // J. Clim. 2014. Vol. 27. P. 5538-5559.
26. Gordon A.E., Cavallo S.M., Novak A.K. Evaluating Common Characteristics of Antarctic Tropopause Polar Vortices // J. Atm. Sci. 2023. Vol. 80. P. 337-352. <https://doi.org/10.1175/jas-d-22-0091.1>
27. Fredericksen J.S., Fredericksen C.S. Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes // Tellus. 2007. Vol. 59A. P. 559-617.
28. Hartmann D.L. The atmospheric general circulation and its variability // J. Met. Soc. Japan, 2007. Vol. 85(B). P. 123-143.
29. Hudson R.D. Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010 // Atm. Chem. Phys. 2012. Vol. 12. P. 7798-7808. DOI: 10.5194/acp-12-7797-2012.
30. Ivy D.J., Hilgenbrink C., Kinnison D., Plumb R.A., Sheshadri A., Solomon S., Thompson D.W.J. Observed Changes in the Southern Hemispheric Circulation in May // J. Clim. 2017. Vol. 30. P. 527-536. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0394.

31. *Karpechko A.* Jet stream stops shifting as ozone layer recovers // *Nature*. 2020. Vol. 579. P. 500-501.
32. *Kidston J., Frierson D.M.W., Renwick J.A., Vallis G.K.* Observations, Simulations, and Dynamics of Jet Stream Variability and Annular Modes // *J. Clim.* 2010. Vol. 23. P. 6186-6199. DOI: 10.1175/2010JCLI3235.1.
33. *Kohma M., Mizukoshi M., Sato K.* Dynamical Analysis of Tropopause Folding Events in the Coastal Region of Antarctica // *J. Clim.* 2022. Vol. 35. P. 4687-4700.
34. *Kushner P., Held I.M., Delworth T.L.* Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Response to Global Warming // *J. Clim.* 2000. Vol. 14. P. 2238-2249.
35. *Manney G.L., Hegglin M.I., Daffer W.H., Schwartz M.J., Santee M.L., Pawson S.* Climatology of Upper Tropospheric–Lower Stratospheric (UTLS) Jets and Tropopauses in MERRA // *J. Clim.* 2014. Vol. 27. P. 3248-3271. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00243.1.
36. *Marshall G.J., Stott P.A., Turner J., Connolley W.M., King J.C., Lachlan-Cope T.A.* Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere // *Geophys. Res. Lett.* 2004. Vol. 31. L14205. DOI: 10.1029/2004GL019952.
37. *Marshall G.J., Thompson D.W.J., van den Broeke M.R.* The Signature of Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Patterns in Antarctic Precipitation // *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44, no. 22. P.11580-11589.
38. *McKay R., Boschat G., Rudeva I., Dowdy A., Rauniyar S., Gillett Z., Purich A., Pepler A., Hope P.* A review of the observed changes in the Southern Hemisphere circulation and their links to rainfall changes in south-eastern Australia. Bureau of Meteorology, Australia, Bureau Research Report No. 054, July 2021.
39. *Meloen J., Siegmund P.C., Sigmond P.* A Lagrangian computation of stratosphere–troposphere exchange in a tropopause-folding event in the subtropical Southern Hemisphere // *Tellus*. 2001. Vol. 53A. P. 368-379.
40. *Nakamura H., Shimpō A.* Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset // *J. Clim.* 2004. Vol. 17. P. 1828-1844.
41. *Ndarana T., Waugh D.W.* Climatology of Rossby Wave Breaking on the Southern Hemisphere Tropopause // *J. Atm. Sci.* 2011. Vol. 68. P. 798-811. DOI: 10.1175/2010JAS3460.1
42. *Peña-Ortiz C., Manzini E., Giorgetta M.A.* Tropical Deep Convection Impact on Southern Winter Stationary Waves and Its Modulation by the Quasi-Biennial Oscillation // *J. Clim.* 2019. Vol. 32. P. 7453-7467.
43. *Pourret V., Šavli M., Mahfouf J.-F., Raspaud D., Doerenbecher A., Benichou H., Payan C.* Operational assimilation of Aeolus winds in the Météo-France global NWP model ARPEGE // *Quarterly Royal Meteorology Society*. 2022. Vol. 148. P. 2652-2671. DOI: 10.1002/qj.4329.
44. *Prince H.D., Gullenn J., Gibson P.B., Conway J., Kingston D.G.* A Climatology of Atmospheric Rivers in New Zealand // *J. Clim.* 2021. Vol. 34. P. 4383-4402. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0664.1.
45. *Rea D., Elsbury D., Butler A. H., Sun L., Peings, Y., Magnusdottir G.* Interannual influence of Antarctic sea ice on Southern Hemisphere stratosphere-troposphere coupling // *Geophys. Res. Lett.* 2024. Vol. 51. e2023GL107478. <https://doi.org/10.1029/2023GL107478>.
46. *Riviere G.* A Dynamical Interpretation of the Poleward Shift of the Jet Streams in Global Warming Scenarios // *J. Atm. Sci.* 2011. Vol. 68. P. 1253-1272. DOI: 10.1175/2011JAS3641.1.
47. *Rubin M.J.* Seasonal variations of the Antarctic tropopause // *J. Meteorology*. 1953. Vol. 10. P. 127-134.
48. *Simmons A.J.* Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022 // *Wea. Clim. Dynam. Discuss.* 2022. 45 p. <https://doi.org/10.5194/wcd-2022-19>.
49. *Sivakumar D., Bencherif H., Begue N., Thompson A.M.* Tropopause Characteristics and Variability from 11 yr of SHADOZ Observations in the Southern Tropics and Subtropics // *J. Appl. Met. Clim.* 2011. Vol. 50. P. 1403-1416. DOI: 10.1175/2011JAMC2453.1.
50. *Son S.-W., Lee S., Felstein S.B.* Intraseasonal Variability of the Zonal-Mean Extratropical Tropopause Height // *J. Atm. Sci.* 2007. Vol. 64. P. 608-620. DOI: 10.1175/JAS3855.1
51. *Son S.-W., Polvani L., Waugh D.W., Birner T., Akiyoshi H., Garcia R.R., Gettelman A., Plummer D.A., Rozanov E.* The Impact of Stratospheric Ozone Recovery on Tropopause Height Trends // *J. Clim.* 2009. Vol. 22. P. 429-445. DOI: 10.1175/2008JCLI2215.1.

52. Song J., Li C., Pan J., Zhou W. Climatology of Anticyclonic and Cyclonic Rossby Wave Breaking on the Dynamical Tropopause in the Southern Hemisphere // *J. Clim.* 2011. Vol. 24. P. 1239-1251. DOI: 10.1175/2010JCLI3157.1.

53. Speer M.S., Leslie L. M., Hartigan J. Jet Stream Changes over Southeast Australia during the Early Cool Season in Response to Accelerated Global Warming // *Climate*. 2022. Vol. 10. P. 84. <https://doi.org/10.3390/cli10060084>.

54. Stone K.A., Solomon S., Thompson D.W.J., Kinnison D., Fyfe J.C. On the Southern Hemisphere Stratospheric Response to ENSO and Its Impacts on Tropospheric Circulation // *J. Clim.* 2022. Vol. 35. P. 1963-1981.

55. Thompson D.W.J., Crow B.R., Barnes E.A. Intraseasonal Periodicity in the Southern Hemisphere Circulation on Regional Spatial Scales // *J. Atm. Sci.* 2017. Vol. 74. P. 865-877.

56. Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L., Hurst D.F., Thompson A.M., Stauffer R.M., Vornel H., Selkirk H.B. A Modern Approach to a Stability-Based Definition of the Tropopause // *Mon. Wea. Rev.* 2022. Vol. 12. P. 3151-3174.

57. Wang Ya, Huang G., Hu K., Tao W., Li X., Gong H., Gu L., Chang W. Asymmetric Impacts of El Niño and La Niña on the Pacific–South America Teleconnection Pattern // *J. Clim.* 2022. Vol. 35. P. 1825-1838. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0285.1.

58. Wille J.D., Pohl B., Favier V., Winters A.C., Baiman R., Cavallo S.M. et al. Examining atmospheric river life cycles in East Antarctica // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2024. Vol. 129. e2023JD039970. <https://doi.org/10.1029/2023JD039970>.

59. WMO. Definition of the tropopause // *WMO Bull.* 1957. Vol. 6. P. 134-138.

60. Zambri B., Solomon S., Thompson D.W.J., Fu Q. Emergence of Southern Hemisphere stratospheric circulation changes in response to ozone recovery // *Nature Geoscience*. 2021. Vol. 14. P. 638-644.

61. Zhu Z., Liu J., Song M., Hu Y. Changes in Extreme Temperature and Precipitation over the Southern Extratropical Continents in Response to Antarctic Sea Ice Loss // *J. Clim.* Vol. 36, no. 14. P 1-41.

62. Zuev V.V., Savelieva E.S., Krupchatnikov V.N., Borovko I.V., Pavlinsky A.V., Chkhetiani O.G., Maslennikova E.A. Antarctic polar vortex dynamics in 2019 and 2020 under the influence of the subtropical stratosphere // *Arctic and Antarctic Research*. 2023. Vol. 69, no. 4. P. 452-463. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-452-463>.

## References

1. Aleksandrov E.I., Prahov A.N. Sravnitel'naya ocenka nekotorykh klimaticeskikh karakteristik stanciya Novolazarevskaya i aerodroma stancii Novolazarevskaya. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2017, vol. 63, no. 3 (113), pp. 27-38 [in Russ.].

2. Vasil'ev A.A. Osobennosti meteorologicheskikh uslovij poletov samoletov nad Antarktikoj. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1979, vol. 215, pp. 137-143 [in Russ.].

3. Vasil'ev A.A., Vil'fand R.M. The distribution of the total ozone values in the end of the polar winter – the key to the forecast of extreme seasons? *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 349-352. DOI: 10.3103/S1068373910050080.

4. Gabis I.P. Vliyanie kvazidvuhletnih oscillyacij (KDO) na stratosfernyj polyarnyj vihr' v Antarktike [Influence of quasi-biennial oscillations (QBO) on the stratospheric polar vortex in the Antarctic]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2024, vol. 70, no. 3, pp. 353-372 [in Russ.]. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-3-353-372.

5. Gruzca, G.V., Ran'kova, E.Y., Rocheva, E.V. Large-scale oscillations of the atmospheric circulation in the southern hemisphere and their influence on climate change in some regions of the globe in the 20th century. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2007, vol. 32, no. 7, pp. 417-425. DOI: 10.3103/S1068373907070011.

6. Ivanova A.R. The tropopause: Variety of definitions and modern approaches to identification. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 12, pp. 808-817. <https://doi.org/10.3103/S1068373913120029>.

7. Ivanova A.R. Stratosphere-troposphere exchange and its specific features at extratropical latitudes. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016, vol. 41, no. 3, pp. 170-185. DOI: 10.3103/S106837391603002X.

8. Meteorologicheskoe obespechenie mezhdunarodnoj aeronavigacii. Prilozhenie 3 k Konvencii o mezhdunarodnoj grazhdanskoj aviacii. Mezhdunarodnaya organizaciya grazhdanskoj aviacii, izdanie 20-e, iyul' 2018 [in Russ.].

9. Meteorologiya Yuzhnogo polushariya / pod red. Ch.U. N'yutona. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1976, 260 p. [in Russ.].

10. Salivonchik S.V., Kakareka S.V. Analiz trendov klimaticheskih pokazatelej po dannym nazemnyh meteonablyudenij i reanaliza na Zemle Enderbi, Vostochnaya Antarktika [Analysis of trends of meteorological characteristics at Enderby Land, East Antarctica based on land observations data and reanalysis]. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2022, vol. 68, no. 2, pp. 142-159 [in Russ.].

11. Sibir E.E., Radionov V.F. Variacii obshchego sodержaniya ozona na rossijskih antarkticheskikh stanciyah. Rezul'taty mnogoletnih nablyudenij. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2018, vol. 64, no. 3 (117), pp. 250-261 [in Russ.].

12. Chernikov A.A. Razvitie nablyudenij i issledovanij po aerologii. *Ocherki po istorii gidrometeorologicheskoy sluzhby. Tom 3. Kniga II.* Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat publ, 2005, pp. 177-191 [in Russ.].

13. Aceituno P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part II: Upper-Air Circulation. *J. Clim.*, 1989, vol. 2, pp. 341-355.

14. Banerjee A., Fyfe J.C., Polvani L.M., Waugh D., Chan K.-L. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol. *Nature*, 2020, vol. 579, pp. 544-561. DOI: 10.1038/s41586-020-2120-4.

15. Barroso J.A., Zurita-Gotor P. Intraseasonal variability of the zonal-mean extratropical tropopause: the role of changes of the polar vortex strength and upper-troposphere wave breaking. *J. Atmos. Sci.*, 2016, vol. 73, pp. 1383-1399.

16. Berrisford P., Hoskins B.J., Tyrplis E. Blocking and Rossby Wave Breaking on the Dynamical Tropopause in the Southern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, 2007, vol. 64, pp. 2881-2898.

17. Bracegirdle T.J., Holmes C.R., Hosking J.S., Marshall G.J., Osman M., Patterson M., Rackow T. Improvements in circumpolar Southern Hemisphere extratropical atmospheric circulation in CMIP6 compared to CMIP5. *Earth and Space Science*, 2020, vol. 7, no. 6. e2019EA001065. DOI: 10.1029/2019EA001065.

18. Byrne N.J., Shepherd T.G. Seasonal Persistence of Circulation Anomalies in the Southern Hemisphere Stratosphere and Its Implications for the Troposphere. *J. Clim.*, 2018, vol. 31, pp. 3467-3483.

19. Compendium of Findings on the Effects of Climate Change on Weather Hazards and Analysis of the Impacts of Climate Change on Aviation Operations. *AeM Series No. 9*, WMO, 2025.

20. Court A. Tropopause disappearance during Antarctic winter. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1942, vol. 23, pp. 220-238.

21. Cuff T.J., Cai M. Interaction between low- and high-transient eddies in the Southern Hemisphere winter circulation. *Tellus*, 1996, vol. 47A, pp. 331-350.

22. Diamond R., Sime L.C., Holmes C.R., Schroeder D. CMIP6 Models Rarely Simulate Antarctic Winter Sea-Ice Anomalies as Large as Observed in 2023. *Geophys. Res. Lett.*, 2024, vol. 58, 10 p. DOI: 10.1029/2024GL109265.

23. Gallego D., Ribera P., Garcia-Herrera R., Hernandez E., Gimeno L. A new look for the Southern Hemisphere jet stream. *Climate Dynamics*, 2005, vol. 24, pp. 607-621. DOI: 10.1007/s00382-005-0006-7.

24. Garnfinkel C.I., White I., Gerber E.P., Son S.-W., Jucker M. Stationary Waves Weaken and Delay the Near-Surface Response to Stratospheric Ozone Depletion. *J. Clim.*, 2023, vol. 36, pp. 565-583. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0874.1.

25. Gerber E.-P., Son S.-W. Quantifying the Summertime Response of the Austral Jet Stream and Hadley Cell to Stratospheric Ozone and Greenhouse Gases. *J. Clim.*, 2014, vol. 27, pp. 5538-5559.

26. Gordon A.E., Cavallo S.M., Novak A.K. Evaluating Common Characteristics of Antarctic Tropopause Polar Vortices. *J. Atm. Sci.*, 2023, vol. 80, pp. 337-352. DOI: 10.1175/jas-d-22-0091.1.
27. Fredericksen J.S., Fredericksen C.S. Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes. *Tellus*, 2007, vol. 59A, pp. 559-617.
28. Hartmann D.L. The atmospheric general circulation and its variability. *J. Met. Soc. Japan*, 2007, vol. 85(B), pp. 123-143.
29. Hudson R.D. Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010. *Atm. Chem. Phys.*, 2012, vol. 12, pp. 7798-7808. DOI: 10.5194/acp-12-7797-2012.
30. Ivy D.J., Hilgenbrink C., Kinnison D., Plumb R.A., Sheshadri A., Solomon S., Thompson D.W.J. Observed Changes in the Southern Hemispheric Circulation in May. *J. Clim.*, 2017, vol. 30, pp. 527-536. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0394.
31. Karpechko A. Jet stream stops shifting as ozone layer recovers. *Nature*, 2020, vol. 579, pp. 500-501.
32. Kidston J., Frierson D.M.W., Renwick J.A., Vallis G.K. Observations, Simulations, and Dynamics of Jet Stream Variability and Annular Modes. *J. Clim.*, 2010, vol. 23, pp. 6186-6199. DOI: 10.1175/2010JCLI3235.1.
33. Kohma M., Mizukoshi M., Sato K. Dynamical Analysis of Tropopause Folding Events in the Coastal Region of Antarctica. *J. Clim.*, 2022, vol. 35, pp. 4687-4700.
34. Kushner P., Held I.M., Delworth T.L. Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Response to Global Warming. *J. Clim.*, 2000, vol. 14, pp. 2238-2249.
35. Manney G.L., Hegglin M.I., Daffer W.H., Schwartz M.J., Santee M.L., Pawson S. Climatology of Upper Tropospheric–Lower Stratospheric (UTLS) Jets and Tropopauses in MERRA. *J. Clim.*, 2014, vol. 27, pp. 3248-3271. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00243.1.
36. Marshall G.J., Stott P.A., Turner J., Connolley W.M., King J.C. Lachlan-Cope T.A. Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, vol. 31, L14205. DOI: 10.1029/2004GL019952.
37. Marshall G.J., Thompson D.W.J., van den Broeke M.R. The Signature of Southern Hemisphere Atmospheric Circulation Patterns in Antarctic Precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, vol. 44, no. 22, pp.11580-11589.
38. McKay R., Boschat G., Rudeva I., Dowdy A., Rauniyar S., Gillett Z., Purich A., Pepler A., Hope P. A review of the observed changes in the Southern Hemisphere circulation and their links to rainfall changes in south-eastern Australia. Bureau of Meteorology, Australia, Bureau Research Report No. 054, July 2021.
39. Meloen J., Siegmund P.C., Sigmond P. A Lagrangian computation of stratosphere–troposphere exchange in a tropopause-folding event in the subtropical Southern Hemisphere. *Tellus*, 2001, vol. 53A, pp. 368-379.
40. Nakamura H., Shimpo A. Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset. *J. Clim.*, 2004, vol. 17, pp. 1828-1844.
41. Ndarana T., Waugh D.W. Climatology of Rossby Wave Breaking on the Southern Hemisphere Tropopause. *J. Atm. Sci.*, 2011, vol. 68, pp. 798-811. DOI: 10.1175/2010JAS3460.1.
42. Peña-Ortiz C., Manzini E., Giorgetta M.A. Tropical Deep Convection Impact on Southern Winter Stationary Waves and Its Modulation by the Quasi-Biennial Oscillation. *J. Clim.*, 2019, vol. 32, pp. 7453-7467.
43. Pourret V., Šavli M., Mahfouf J.-F., Raspaud D., Doerenbecher A., Benichou H., Payan C. Operational assimilation of Aeolus winds in the Météo-France global NWP model ARPEGE. *Quarterly Royal Meteorology Society*, 2022, vol. 148, pp. 2652-2671. DOI: 10.1002/qj.4329.
44. Prince H.D., Gullenn J., Gibson P.B., Conway J., Kingston D.G. A Climatology of Atmospheric Rivers in New Zealand. *J. Clim.*, 2021, vol. 34, pp. 4383-4402. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0664.1.
45. Rea D., Elsbury D., Butler A. H., Sun L., Peings, Y., Magnusdottir G. Interannual influence of Antarctic sea ice on Southern Hemisphere stratosphere-troposphere coupling. *Geophys. Res. Lett.*, 2024, vol. 51, e2023GL107478. <https://doi.org/10.1029/2023GL107478>.
46. Riviere G. A Dynamical Interpretation of the Poleward Shift of the Jet Streams in Global Warming Scenarios. *J. Atm. Sci.*, 2011, vol. 68, pp. 1253-1272. DOI: 10.1175/2011JAS3641.1

47. Rubin M.J. Seasonal variations of the Antarctic tropopause. *J. Meteorology.*, 1953, vol. 10, pp. 127-134.
48. Simmons A.J. Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022. *Wea. Clim. Dynam. Discuss.*, 2022, 45 p. DOI: 10.5194/wcd-2022-19.
49. Sivakumar D., Bencherif H., Begue N., Thompson A.M. Tropopause Characteristics and Variability from 11 yr of SHADOZ Observations in the Southern Tropics and Subtropics. *J. Appl. Met. Clim.*, 2011, vol. 50, pp. 1403-1416. DOI: 10.1175/2011JAMC2453.1.
50. Son S.-W., Lee S., Felstein S.B. Intraseasonal Variability of the Zonal-Mean Extratropical Tropopause Height. *J. Atm. Sci.*, 2007, vol. 64, pp. 608-620. DOI: 10.1175/JAS3855.1.
51. Son S.-W., Polvani L., Waugh D.W., Birner T., Akiyoshi H., Garcia R.R., Gettelman A., Plummer D.A., Rozanov E. The Impact of Stratospheric Ozone Recovery on Tropopause Height Trends. *J. Clim.*, 2009, vol. 22, pp. 429-445. DOI: 10.1175/2008JCLI2215.1.
52. Song J., Li C., Pan J., Zhou W. Climatology of Anticyclonic and Cyclonic Rossby Wave Breaking on the Dynamical Tropopause in the Southern Hemisphere. *J. Clim.*, 2011, vol. 24, pp. 1239-1251. DOI: 10.1175/2010JCLI3157.1.
53. Speer M.S., Leslie L.M., Hartigan J. Jet Stream Changes over Southeast Australia during the Early Cool Season in Response to Accelerated Global Warming. *Climate*, 2022, vol. 10, pp. 84. DOI: 10.3390/cli10060084.
54. Stone K.A., Solomon S., Thompson D.W.J., Kinnison D., Fyfe J.C. On the Southern Hemisphere Stratospheric Response to ENSO and Its Impacts on Tropospheric Circulation. *J. Clim.*, 2022, vol. 35, pp. 1963-1981.
55. Thompson D.W.J., Crow B.R., Barnes E.A. Intraseasonal Periodicity in the Southern Hemisphere Circulation on Regional Spatial Scales. *J. Atm. Sci.*, 2017, vol. 74, pp. 865-877.
56. Tinney E.N., Homeyer C.R., Elizalde L., Hurst D.F., Thompson A.M., Stauffer R.M., Vomel H., Selkirk H.B. A Modern Approach to a Stability-Based Definition of the Tropopause. *Mon. Wea. Rev.*, 2022, vol. 12, pp. 3151-3174.
57. Wang Ya, Huang G., Hu K., Tao W., Li X., Gong H., Gu L., Chang W. Asymmetric Impacts of El Niño and La Niña on the Pacific–South America Teleconnection Pattern. *J. Clim.*, 2022, vol. 35, pp. 1825-1838. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0285.1.
58. Wille J.D., Pohl B., Favier V., Winters A.C., Baiman R., Cavallo S.M. et al. Examining atmospheric river life cycles in East Antarctica. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 2024, vol. 129, e2023JD039970. DOI: 10.1029/2023JD039970.
59. WMO. Definition of the tropopause. *WMO Bull.*, 1957, vol. 6, pp. 134-138.
60. Zambri B., Solomon S., Thompson D.W.J., Fu Q. Emergence of Southern Hemisphere stratospheric circulation changes in response to ozone recovery. *Nature Geoscience*, 2021, vol. 14, pp. 638-644.
61. Zhu Z., Liu J., Song M., Hu Y. Changes in Extreme Temperature and Precipitation over the Southern Extratropical Continents in Response to Antarctic Sea Ice Loss. *J. Clim.*, vol. 36, no. 14, pp. 1-41.
62. Zuev V.V., Savelieva E.S., Krupchatnikov V.N., Borovko I.V., Pavlinsky A.V., Chkhetiani O.G., Maslennikova E.A. Antarctic polar vortex dynamics in 2019 and 2020 under the influence of the subtropical stratosphere. *Arctic and Antarctic Research*, 2023, vol. 69, no. 4, pp. 452-463. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-452-463.

Поступила 28.01.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;

принята в печать 18.06.2025.

Submitted 28.01.2025; approved after reviewing 04.06.2025;

accepted for publication 18.06.2025.