

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-2-6-22>

УДК 551.557.5

Струйные течения Южного полушария и факторы, определяющие их динамику

А.Р. Иванова

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

Представлен обзор статей, посвященных струйным течениям Южного полушария. Обсуждаются особенности структуры струйных течений и результаты анализа их изменчивости в различные периоды XX и начала XXI века. Описаны результаты работ, связанных с климатическим моделированием струйных течений в рамках проектов СМIP и PAMIP. Указаны возможные причины изменения положения и интенсивности струйных течений как на длинных, так и на коротких временных масштабах.

Ключевые слова: струйные течения, Южное полушарие, реанализ, Южная кольцевая мода, изменение климата, стратосферный озон, вулканические извержения

Southern Hemisphere jet streams and factors determining their dynamics

A.R. Ivanova

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

A review of papers related to jet streams in the Southern Hemisphere is presented. The structural features of jet streams and an analysis of their variability during different periods of the 20th and early 21st centuries are discussed. The results of climate modeling of jet streams within the CMIP and PAMIP projects are described. Potential causes for changes in the position and intensity of jet streams on both long and short timescales are identified.

Keywords: jet streams, Southern Hemisphere, reanalysis, Southern Annular Mode, climate change, stratospheric ozone, volcanic eruptions

Введение

Сведения о струйных течениях (СТ) и максимальном ветре в пределах верхней тропосферы и нижней стратосферы представляют значительный интерес для авиации и являются частью продукции для метеорологического обеспечения полетов по маршруту, распространяемой Всемирной системой зональных прогнозов ИКАО [10]. Информация о СТ – важная составляющая навигационных расчетов, обеспечивающих оптимизацию траектории движения самолетов с точки зрения как экономичности полетов

(использование попутного потока), так и их безопасности (обход сопутствующих зон турбулентности в ясном небе).

Исторически открытие узких зон сильных ветров в верхней тропосфере, позднее названных «струйными течениями», произошло в Северном полушарии в 20-х годах прошлого века [28]. В результате активного использования авиации в период Второй мировой войны было выявлено их критичное влияние на полеты воздушных судов, что дало стимул к активному изучению СТ. В 1947 г. сотрудниками департамента метеорологии университета Чикаго под руководством К.-Г. Россби [36] был подготовлен отчет, в котором понятие «jet stream» использовалось для описания основных черт циркуляции Северного полушария. Над североамериканским континентом были рассчитаны характеристики СТ (скорость, положение, градиенты скорости ветра, кривизна оси в процессе меандрирования, длина образующихся волн), а также установлена связь СТ с высотными барическими образованиями и с областью разрыва тропопаузы.

В это же время в связи с развитием дальней авиации активизировались исследования ветра на высотах и над океаническим Южным полушарием (ЮП). Уже в конце 1940-х годов сотрудниками Метеорологического департамента Австралии был опубликован ряд работ, посвященных быстрому движению перистых облаков над Австралией, вызванному экстремальными ветрами на больших высотах, обнаруженными по данным шаропилотного зондирования. В 1952 г. Гиббс в работе [23] провел аналогию наблюдаемого высотного ветра в регионе с ранее описанным в литературе струйным течением над Северной Америкой. Он установил, что профили среднего геострофического ветра над Австралией и Северной Америкой обнаруживают некое сходство в зимний период соответствующего полушария, но значительно отличаются летом. Изменчивость профилей вдоль широты над Австралией и, возможно, надо всем ЮП оказалась значительно меньшей, чем над североамериканским континентом. Общие черты обнаруженных СТ в обоих полушариях были довольно близки в летний и зимний периоды: обе струи с осями вблизи 25° широты зимой и в диапазоне $35\text{--}45^\circ$ широты летом располагались на высоте порядка 12 км; скорость ветра на оси СТ составляла 80–100 узлов зимой и около 40 узлов летом. В обоих полушариях в зонах СТ были отмечены сильные горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра. Вторичный максимум геострофического ветра был обнаружен в высоких широтах Южного полушария.

Большой вклад в изучение струйных течений ЮП внесли материалы, полученные во время проведения Международного геофизического года (1957–1958 гг.), обеспечившего массовые метеорологические и аэрологические наблюдения в малонаселенном Южном полушарии и в особенности – на территории Антарктиды. В нашей стране результаты анализа этих данных были опубликованы в работах известных советских ученых В.А. Бугаева, П.Д. Астапенко, С.С. Гайгерова и др. [1–5].

Структура поля струйных течений в Южном полушарии

Согласно современным представлениям, в каждом полушарии можно выделить два типа струйных течений на основании их широтного расположения и механизма возникновения: субтропические струйные течения и полярные струйные течения (называемые также струйными течениями умеренных широт). Различие между субтропическими и полярными струйными течениями концептуально обосновано [46, 47]. Субтропические струйные течения возникают из-за сохранения углового момента в верхней тропосферной ветви циркуляции Гадлея (Хэдли), и, следовательно, в конечном итоге, из-за тропической конвекции. По этой причине их характеризуют как «термически обусловленные» (*thermally driven jet stream*). В отличие от них, струйные течения умеренных широт являются продуктом динамики внетропической области, а именно – результатом конвергенции потока импульса, связанной с вихрями умеренных широт, и трактуются как «движимые вихрями» (*eddy-driven jet stream*).

Первые обобщения климатического положения струйных течений Южного полушария можно обнаружить в монографии [8]. В ней было описано наличие в тропосфере единой мощной зональной струи с осью на высоте 250 гПа, смещающейся от января к июлю с 50° до 30° ю. ш. Отметим, что ветер над Южным полушарием в данной работе анализировался только в рамках геострофического соотношения по данным о давлении при аэрологическом зондировании. Причина заключалась в том, что далеко не все существовавшие на тот момент станции радиозондирования проводили наблюдения за ветром, хотя тогда уже было ясно, что отклонения от геострофической теории в областях максимального ветра могут быть значительными. Еще 1959 г. Ч. Ньютон [35] подтвердил, что для частицы воздуха в ядре струйного течения векторное изменение геострофической скорости составляет примерно половину векторного изменения фактической скорости ветра. За пределами ядра струйного течения, в зоне меньших скоростей ветра, геострофический ветер более точно адаптируется к изменениям фактической скорости ветра.

Развитие моделей циркуляции атмосферы, появление регулярных спутниковых измерений, а позднее – реанализа позволило собрать большой статистический материал, уточнить структуру и положение СТ в Южном полушарии.

Представленная в [22] картина климатологии СТ ЮП за вторую половину XX века по данным реанализа NCEP/NCAR (1958–2002 гг.) обнаружила, что единая верхнетропосферная струя с осью вблизи 42–45° ю. ш. и максимальными скоростями 35 м/с, охарактеризованная как СТ умеренных широт, наблюдалась только в теплый сезон, с декабря до середины апреля. Осенью и зимой происходило ее разделение на две части. С конца мая по ноябрь существовало две ярко выраженные струи (субтропическая и полярная).

В районе 30° ю. ш. формировалось сильное и стабильное субтропическое СТ со средними скоростями до 45–50 м/с, максимальные скорости при этом были сосредоточены в области над Тихим океаном. Наиболее изменчивое (как по скорости, так и по широте) полярное СТ с максимальными скоростями над Атлантическим и Индийским океанами, характеризовалось постепенным смещением к полюсу в течение холодного сезона и достигало примерно 60° ю. ш. к его концу. Было обнаружено, что переход СТ от летнего режима к зимнему и обратно (расщепление и слияние струи) может происходить в весьма короткие сроки – в течение 2–3 недель. Максимальные скорости ветра на оси струи по данным европейского реанализа за 1979–2022 гг. были зарегистрированы над Южной Атлантикой и достигали 120 м/с в октябре 2019 г. [42]. Отметим, что над Северным полушарием (чаще всего в тихоокеанском регионе) периодически может происходить слияние двух струй, называемое «jet superposition», но это положение не характеризуется такими масштабами и постоянством, как в Южном полушарии [18].

Было установлено, что в период существования двух струй постоянное циркумполярное СТ, хорошо прослеживающееся в тропосфере, практически сливается с нижней частью полярного стратосферного вихря, иногда также называемой струйным течением. На подобную ошибку в названии указывал еще в 1959 г. В.А. Бугаев, проанализировавший информацию радиозондирования в антарктической зоне. Упомянув периферию интенсивного циркумполярного зимнего вихря, он писал: «Так развиваются сильные зональные течения в зимней антарктической стратосфере, которые неправильно называют струйными течениями (это не узкая зона ветров со скоростями более 30 м/с)» [3].

Исследование циркуляции ЮП выявило ряд особенностей для субтропического и полярного СТ.

Авторы [21] на примере 40-летнего ряда данных реанализа подтвердили возможность связи субтропического СТ ЮП с явлением Эль-Ниньо – Южное Колебание (ЭНЮК), обнаружив усиление субтропической струи над Тихим океаном в период положительной фазы ЭНЮК и ослаблением во время отрицательной. В работе [48] было показано, что эпизоды Эль-Ниньо связаны также со смещением субтропического СТ к экватору. Дальнейшие исследования подтвердили связь динамики субтропического струйного течения в ЮП с муссонной циркуляцией. Накамура [34] доказал этот факт для СТ над южной частью Тихого океана. Лопез и др., изучая аномальную дивергенцию тепла в Южной Атлантике, установили, что этот процесс обеспечивает межполушарный перенос тепла и влаги, моделируя тем самым глобальные муссоны, и приводит к смещению субтропического СТ к экватору [29].

В отличие от субтропического СТ, существующего только в определенный период года, постоянное струйное течение умеренных широт часто прослеживается во всей толще тропосферы, порой начинаясь от подстилающей поверхности. Скорости ветра в самой нижней тропосфере, превышающие 30 м/с [15, 24], могут быть связаны с кататическими ветрами,

обусловленными топографией антарктического материка. Чаще всего они прослеживаются в таких районах, как залив Придз ($60\text{--}83^\circ$ в. д.), Земля Адели ($110\text{--}163^\circ$ в. д.), море Росса (163° в. д. – 150° з. д.), море Беллинсгаузена ($60\text{--}100^\circ$ з. д.) и море Уэдделла ($10\text{--}60^\circ$ з. д.). Доказано, что наличие континентального ледового щита вокруг ЮП оказывает значительное влияние на формирование всей циркуляции ЮП в целом и поля СТ в частности. Паттерсон [37], проведя эксперименты с помощью идеализированной модели, установил, что в отсутствие антарктической орографии потоки вихревого импульса, направленные к экватору и связанные с орографией, исчезают и, следовательно, конвергенция вихревого импульса в средних широтах уменьшается. Без Антарктического плато вихревая активность над Индийским океаном усиливается и не может проникнуть дальше к полюсу. Вместе с этим потоки импульса в высоких широтах, направленные к экватору, также прекращаются, замедляя движение вихрей. Это ослабляет СТ над Индийским океаном, приводя к замедлению распространения волн Россби вниз по течению. В результате поток застаивается над средними и высокими широтами южной части Тихого океана и характерная картина расщепления струйного течения разрушается.

В реальной картине циркуляции ЮП главным регулятором полярного СТ, определяющим его положение и интенсивность, является Южная кольцевая мода, ЮКМ (Антарктическое колебание), связанная с широтными вариациями вихревых потоков импульса [46]. В положительную фазу ЮКМ можно наблюдать усиление полярной струи и ее смещение к полюсу. В [40] показано, что на сезонном масштабе диполь Индийского океана и ЭНЮК также, хотя и в меньшей степени, могут оказывать влияние на динамику СТ в полярных и умеренных широтах Южного полушария. Основным же фактором, ответственным за изменчивость полярного струйного течения, является интенсивность стратосферного полярного вихря.

Изменчивость струйных течений

Появление и развитие схем реанализа позволили на основании длинных временных рядов проследить изменения со временем положения и интенсивности струйных течений и связать их с некоторыми факторами изменений современного климата. Активно развивающиеся климатические модели позволяют делать прогнозы таких изменений в будущем.

Чаще всего при анализе трендов глобальной циркуляции используются наборы данных Европейского центра среднесрочных прогнозов (ERA), Японского метеорологического агентства (JRA-55) или американский реанализ, созданный совместно Национальными центрами исследования окружающей среды и Национальным центром атмосферных исследований США (NCEP/NCAR). Следует отметить, что существующие ряды данных реанализа подготавливаются с использованием различных численных схем, и поэтому расчеты по ним могут отличаться. Например, тренд скорости ветра в умеренных широтах Южного полушария на поверхности

200 гПа за последние 40 лет составил по данным ERA5 0.22 ± 0.10 м/с за 10 лет, а по данным JRA-55 0.19 ± 0.10 м/с в десятилетие [42]. Но даже результаты, полученные по одним и тем же наборам данных, могут иметь различия. В [17] показано, что такой эффект может давать изменение горизонтального разращения.

Проанализируем некоторые итоги исследований, касающиеся динамики струйных течений.

Субтропическое струйное течение

В [21] на основании доказанного факта существенной перестройки глобальной циркуляции в начале-середине 1970-х гг. были выбраны два периода реанализа NCEP/NCAR до и после указанного события (1949–1968 и 1975–1994 гг. соответственно). Оказалось, что упомянутая перестройка повлекла за собой снижение пиковой интенсивности субтропического струйного течения Южного полушария примерно на 17 %. При этом положение максимума интенсивности зонального ветра в субтропиках (около 30° ю. ш.) в оба периода сохранялось вблизи геопотенциальной поверхности 200 гПа.

Исследуемые по данным того же реанализа тренды в период 1958–2008 гг. с выделением «послеспутникового» периода 1979–2008 гг. [38] обнаружили, что ускорение и смещение к полюсу субтропического СТ в последний отрезок времени происходили с большей скоростью и на больших зонально протяженных территориях, чем в среднем за весь 50-летний период исследований. Сдвиг к полюсу по широте в «послеспутниковый» период составил 0.3 град/10 лет, при этом скорость в областях максимального ветра увеличивалась примерно на 0.6 м/с в десятилетие.

Исследования [32] по данным временных рядов, заканчивающихся 2019 г., сформированных на базе трех различных реанализов, позволили установить, что оба СТ в Южном полушарии в течение большинства холодных сезонов примерно с 1960-х годов становились все более волнообразными. Введенный термин «*waviness*» базировался на методологии определения среднего смещения по широте (*ALD, average latitude displacement*) оси максимального ветра на уровне тропопаузы [31]. Было установлено, что, несмотря на возрастающую интенсивность меандрирования, максимальные скорости на осях СТ практически не изменились. При этом субтропическое СТ по данным реанализа ERA5 претерпело статистически значимую миграцию к полюсу.

Полярное струйное течение

В отличие от субтропического СТ, согласно [32], полярное СТ в Южном полушарии не демонстрирует тенденции изменения скорости, в то время как его смещение к полюсу статистически значимо и происходит примерно в 3 раза быстрее, чем для субтропического струйного течения.

Авторы упомянутого выше исследования [38] пришли к выводам, что в глобальной структуре СТ наибольшие изменения в послеспутниковый период (1979–2008 гг.) претерпело СТ южного полярного фронта в течение австралийского лета и осени. Средняя скорость полярного СТ увеличивалась в период 1979–2008 гг. примерно на 0.7 м/с за десятилетие.

Было доказано, что сохраняющаяся тенденция смещения полярного СТ к полюсу может быть связана с увеличением бароклинности верхней тропосферы. В [39] на основе простой общей модели циркуляции сухой атмосферы авторы установили, что, когда верхнетропосферная бароклинность усиливается, чаще всего происходит обрушение волн Россби по антициклоническому типу, что «толкает» СТ дальше к полюсу. Авторы [14] оценили скорость такого смещения в 0.3° широты за десятилетие.

Однако анализ наиболее свежих данных реанализа ERA5 (1979–2022 гг.) обнаружил некоторую неоднозначность утверждения о смещении СТ в направлении полюса [42]. Было установлено, что движение СТ над южной частью Атлантического океана в декабре–феврале в сторону полюса компенсируется в среднем за год движением к экватору в другие сезоны. Осредненная за 43 года картина динамики СТ позволила заключить, что движение среднегодового максимума ветра над Южной Атлантикой направлено только к полюсу от 18° з. д. на восток и не превышает 1° широты. Движение же к экватору превышает 1° широты к западу от 22° з. д. и достигает пика на $4,6^\circ$ широты на 45° з. д.

Эта же работа подтвердила усиление полярного СТ. Тренд скорости ветра на 200 гПа, рассчитанный за все месяцы, для области между 45° и 60° ю. ш., составил $0,29 \pm 0,19$ м/с за десятилетие.

Будущее струйных течений Южного полушария

Климатическое моделирование позволяет с определенной степенью доверия прогнозировать изменение глобальной циркуляции и динамику струйных течений как компонента последней. Однако разнообразие таких прогнозов даже для одного сценария гораздо больше, чем различие расчетов по разным наборам реанализов, поскольку описание физических процессов в моделях существенно отличается. По данным [12] было установлено, что значительный разброс в прогнозах CMIP5 смещения СТ в ЮП в основном объясняется разницей меридиональных температурных градиентов «экватор – полюс» как в верхней, так и в нижней тропосфере, в меньшей степени – площадью морского льда вокруг Антарктиды. В [43, 49] подчеркивалось, что климатические модели в проекте CMIP5 воспроизводили положение СТ, сдвигая его к экватору. Причиной этого в [30] назван неучёт сезонных изменений структуры СТ в ЮП, а также выявленная периодичность Южной кольцевой моды, составляющая примерно 150 дней.

Последующие климатические эксперименты, уже в рамках проекта CMIP6, позволили уточнить динамику СТ в XXI веке. По данным [15], для сценария высоких выбросов к концу этого столетия прогнозируется

смещение к полюсу западного СТ в средних широтах примерно на 130 км. В [50] было установлено, что, в зависимости от моделируемого объема сезонной потери морского льда и динамики стратосферного полярного вихря (объясняющих 70 % дисперсии реакции СТ летом и 35 % зимой), в летний период ожидаемое усиление струйного течения составит 1–2 м/с, а смещение к полюсу – 2–4 градуса широты. При этом между интенсивностью СТ и потеплением в Антарктиде имеет место отрицательная корреляция. Степень смещения СТ к полюсу демонстрирует положительную связь с увеличением осадков в высоких широтах вокруг Антарктиды.

В [33] отмечено, что глобальные климатические модели, по-видимому, довольно точно оценивают наблюдаемый сдвиг полярного СТ по широте, но недооценивают его наблюдаемое усиление. Поэтому авторы предложили интегрировать прогнозы климатических моделей с наблюдениями, что позволило подтвердить следующую версию. Причиной примерно 50 % наблюдаемого сдвига полярного СТ по широте можно считать глобальное потепление, а оставшиеся 50 % следует отнести к удаленным факторам, связь которых с глобальным потеплением остается неопределенной (например, изменчивость стратосферного полярного вихря, динамика озонового слоя, изменение температуры поверхности океана в тропиках).

Критически низкие значения площади морского льда в Антарктике в последние годы указывают на наличие ее отрицательного тренда [16]. Следствием этого является потепление нижней тропосферы в высоких широтах, которое уменьшает температурный градиент «полюс – экватор», стимулируя смещение СТ средних широт к экватору. С другой стороны, еще один эффект глобального потепления – увеличение температуры океана – действует в противоположном направлении на СТ, способствуя его смещению к полюсу. Недавние исследования в рамках проекта взаимного сравнения моделей полярного усиления (PAMIP) [41, 44] позволили обнаружить ведущую роль морского льда в этом «противостоянии» и вероятный сдвиг полярного СТ к экватору в будущем более теплом климате.

Факторы, влияющие на климатическую изменчивость струйных течений в Южном полушарии

Хотя основные причины многолетней динамики струйных течений Южного полушария были обозначены в предыдущем разделе, опишем здесь более подробно факторы, потенциально способные повлиять на изменчивость характеристик СТ.

Очевидно, что главной причиной изменения глобальной циркуляции, ответственной за изменчивость СТ в обоих полушариях, является **глобальное потепление** [13]. Специфика проявления этого фактора в Южном полушарии выражается прежде всего в резком сокращении площади морского льда и деградации окраин антарктического ледового щита, представляющего собой отличительную особенность формирования полушарной циркуляции [7]. Феномен полярного усиления, приводящий

не только к уменьшению ледового покрова, но и к росту поглощения тепла океаном, весьма отчетливо должен проявиться над Южным полушарием, покрытым водой более чем на 80%.

Состояние полярного стратосферного вихря, его связь с **содержанием стратосферного озона**, оказывающим влияние на динамику СТ, неоднократно упоминается в [11, 26, 48]. Было выяснено, что истощение озона привело к радиационному охлаждению нижней стратосферы над Антарктидой в конце XX века и сильно повлияло на внетропическую циркуляцию Южного полушария, сместив СТ к полюсу. Напротив, восстановление озонового слоя должно иметь противоположный эффект по сравнению с его истощением, стремясь сместить СТ к экватору [50]. Авторы [11] подтвердили, что истощение озонового слоя было основной причиной положительной фазы ЮКМ и смещения к полюсу СТ умеренных широт ЮП. Эксперименты с моделированием в период истощения и восстановления озонового слоя [11] продемонстрировали, что эффект восстановления озона в будущем будет скомпенсирован эффектом парниковых газов и до середины текущего столетия положение СТ за счет этих двух факторов практически не изменится.

В [19] сделан вывод о том, что истощение озонового слоя в 1980–1990-х годах внесло значительный вклад в усиление стратосферной «струи» в нижней части полярного вихря. Поскольку тропосферное полярное СТ ЮП находится в тесной «сцепке» с ним в летний период, причину изменения интенсивности зональных ветров в тропосфере также связывают с динамикой содержания озона.

В работе [27] на основании использования химико-климатической модели и данных европейского реанализа была обоснована связь положения оси субтропического СТ Южного полушария с областью максимальных градиентов зонально-осредненного содержания озона в верхней тропосфере-нижней стратосфере. Установлено, что чем больше интенсивность градиента, тем выше оказывается зональная скорость ветра в субтропической струе, а положение оси СТ согласуется с широтой, на которой этот максимальный градиент отмечается.

Одним из возможных факторов, способных повлиять на изменение полшарной циркуляции и, следовательно, на динамику СТ, являются **вулканические извержения**. В Южном полушарии большая часть действующих вулканов расположена на территории Южной Америки (Охос-дель-Саладо, Котопахи, Льюльялььяко) – так называемый «Андский пояс», а также на островах Индонезии (Кракатау, Семеру, Мерапи, Левотоби и др.), которые также принадлежат к Тихоокеанскому огненному кольцу. Основным следствием крупных эксплозивных извержений является изменение радиационного баланса в атмосфере. Мелкие частицы силикатной пыли и серного аэрозоля, концентрируясь в стратосфере, увеличивают оптическую толщину аэрозольного слоя, что ведет к уменьшению температуры вблизи поверхности Земли.

Доказано [25], что недавнее извержение вулкана Хунга (20° ю. ш.) в январе 2022 г. привело к понижению температуры поверхности Южного полушария в течение последующих двух лет примерно на 0.12°C . В прошлом более мощные извержения вулканов ЮП, таких как Кракатау и Тамбора, повлияли на изменения температуры поверхности также в Северном полушарии, снизив ее там на 0.3 и 0.5°C соответственно [9]. Авторы [6] пришли к выводу, что после вулканических извержений похолодание в ЮП проявляется в меньшей степени, чем в СП. Понижение температуры поверхности влечет за собой снижение конвективной неустойчивости и изменения в глобальных ячейках циркуляции, что может приводить к ослаблению субтропических СТ. По данным [48], 9 из 11 моделей проекта CMIP6 продемонстрировали, что после вулканических извержений будет происходить смещение субтропического СТ к экватору.

Исследование [20] с применением иерархии идеализированных моделей было направлено на разделение коротко- и длинноволновых эффектов воздействий, связанных с вулканическим аэрозолем, на атмосферную циркуляцию. Эксперименты показали, что глобальное помутнение из-за выброса вулканического пепла (коротковолновый эффект) не приводит к существенным изменениям стратосферного вихря, и движение СТ к экватору будет незначительным. Зато потепление нижней тропической тропосферы в результате поглощения аэрозолем длинноволнового излучения будет усиливать стратосферный вихрь и способствовать смещению СТ к полюсам, причем в Южном полушарии это будет происходить как в теплый, так и в холодный сезоны.

Отметим, что вышеперечисленные факторы работают на относительно длинных временных масштабах. Обнаруженным недавно источником кратковременных изменений динамики струйных течений являются некоторые события **космической погоды**. Солнечные протонные события, вызывая нагрев стратосферы в полярных регионах, уменьшают градиент температуры между экватором и полюсом (отвечающим за интенсивность СТ), что способствует ослаблению скоростей в СТ. Косвенное воздействие космической погоды будет происходить и через ее влияние на стратосферный полярный вихрь, ослабление которого будет приводить к смещению полярного СТ в сторону экватора, а усиление – в сторону полюса. Как ожидается, эти процессы практически не затронут СТ в субтропиках.

К сожалению, доказательства влияния космической погоды на южное полярное струйное течение пока отсутствуют. Однако для Северного полушария с хорошо развитыми кросс-полярными перелетами недавно были опубликованы исследования китайских ученых, проанализировавших более 16 тысяч записей о полетах, затронутых полярным струйным течением Северного полушария в период с 2015 по 2019 год [51]. Оказалось, что примерно 87 % рейсов в западном направлении имели в среднем на 7 минут меньшую продолжительность во время солнечных протонных событий (СПС) по сравнению со спокойными периодами, при этом рейсы, следовавшие в восточном направлении, продолжались на 7 минут дольше, чем

в отсутствие СПС. В период полного 11-летнего солнечного цикла, когда было зафиксировано 42 СПС, было отмечено смещение полярного СТ к полюсу, которое, по утверждению авторов, связано с выпадением высокоэнергетических частиц. Поскольку воздействие таких эпизодов на магнитосферу и стратосферу ожидаемо симметрично относительно обоих полюсов Земли, можно предположить, что полярное СТ Южного полушария может претерпевать аналогичные изменения.

Заключение

Структура струйных течений над Южным полушарием отличается от хорошо известной картины в Северном полушарии. Основным отличием является то, что в период «австралийского лета» над ЮП наблюдается единое мощное СТ. Характерным признаком циркуляции ЮП является расщепление этой струи в холодный сезон на субтропическое и полярное СТ и слияние их в теплый период, причем такая перестройка происходит довольно быстро, в течение нескольких недель. Динамика субтропического СТ тесно связана с муссонной циркуляцией, полярного – с интенсивностью стратосферного полярного вихря.

За прошедшие десятилетия, начиная примерно с середины прошлого века, были отмечены изменения в положении и скоростях струйных течений ЮП. Исследования, проведенные с использованием наборов данных реанализа, выявили что в большей степени они затронули характеристики полярного СТ. Прежде всего это касается некоторого смещения его оси к полюсу, которое происходит гораздо быстрее, чем для субтропической струи. Наряду с этим отмечено значимое усиление полярного СТ (увеличение осевых скоростей). В то же время для обеих струй, как субтропической, так и полярной, в последние 40 лет отмечается усиление меандрирования.

Климатическое моделирование позволило проследить некоторые аспекты динамики СТ в будущем. Эксперименты, проводимые в рамках проектов СМIP и РАМIP, позволили оценить вклад различных факторов в изменение глобальной циркуляции и характеристик СТ. Было показано, что глобальное потепление, несомненно, является ведущим фактором, но его последствия (например, увеличение температуры стратосферы и сокращения площади морского льда) могут оказывать противоположное воздействие на динамику СТ. Кроме того, ряд исследований связывает будущее изменение положения СТ с изменением динамики стратосферного озона, а также с коротко- и длинноволновыми эффектами вулканических извержений. Показано, что факторы, уменьшающие температурный градиент между экватором и полюсом, приведут к ослаблению СТ и их возможному смещению к экватору. Однако значительная неопределенность климатических прогнозов и невозможность полного учета процессов взаимодействия различных факторов оставляет открытым вопрос о будущих изменениях струйных течений Южного полушария.

Список литературы

1. Астапенко П., Альт Ж., Рона Н. Некоторые вопросы циркуляции атмосферы в Антарктике в 1958 г. // Международный геофизический год. II раздел программы МГТ (метеорология) под ред. В.А. Бугаева. М.: Издание АН СССР, 1960. 131 с.
2. Бугаев В.А. Струйные течения в атмосфере над Мирным // Бюллетень советской антарктической экспедиции. 1959. № 12. С. 20-23.
3. Бугаев В.А. Атмосферные процессы в Антарктике // Основные итоги изучения Антарктики за 10 лет: Доклады Всесоюзного совещания по изучению Антарктики. 1967. С. 16-26.
4. Гайгеров С.С. Аэрология полярных районов. М.: Гидрометиздат, 1964. 304 с.
5. Гайгеров С.С. Некоторые данные об аэрологическом строении атмосферы у антарктического побережья зимой // Труды ЦАО. 1964. Вып. 59. С. 92-102.
6. Екайкин А.А., Верес А.Н. Изменение температуры в Центральной Антарктиде после крупных вулканических извержений во втором тысячелетии нашей эры // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69, № 3. С. 374-385. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-374-385>
7. Иванова А.Р. Некоторые особенности циркуляции в свободной атмосфере Южного полушария, влияющие на полеты воздушных судов // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 3 (396). С. 8-27. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-8-27>
8. Метеорология Южного полушария / под ред. Ч.У. Ньютона. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 260 с.
9. Муравьев Я.Д. Вулканические извержения и климат // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2. С. 71-82.
10. Правила аэронавигационного обслуживания. Метеорология (PANS-MET, Doc 10157). Международная организация гражданской авиации. Первое издание. Апрель 2025 г.
11. Barnes E.A., Barnes N.W., Polvani L.M. Delayed Southern Hemisphere Climate Change Induced by Stratospheric Ozone Recovery, as Projected by the CMIP5 Models // J. Climate. 2014. Vol. 27. P. 852-867. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00246.1
12. 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>
13. Breul Ph., Ceppi P., Shepherd T.G. Revisiting the wintertime emergent constraint of the southern hemispheric midlatitude jet response to global warming // Weather Clim. Dynam. 2023. Vol. 4. P. 39-47. <https://doi.org/10.5194/wcd-4-39-2023>
14. Breul, P., Ceppi, P., Simpson, I.R., Wooling T. Seasonal and regional jet stream changes and drivers // Nat Rev Earth Environ. 2025. <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00749-9>
15. Cable A., Tarrison T.C., Kent E., Kornes R., Bracegirdle T.J. A new index used to characterise the extent of Antarctic marine coastal winds in climate projections // Weather Clim. Dynam. 2026. Vol. 7. P. 247-262. <https://doi.org/10.5194/wcd-7-247-2026>
16. Caporale G.M., Romero-Rojo M.F., Gil-Alana L.A. Trends in Sea Ice and Snow-Cover Extent: A Fractional Integration Analysis // J. Hydrometeor. 2026. Vol. 27. P. 5-16. DOI: 10.1175/JHM-D-25-0050.1
17. Chen T.-Ch., Goose H., Davrinche C., Libera S. et al. Southern Annular Mode persistence and westerly jet: a reassessment using high-resolution global models // Weather Clim. Dynam. 2025. Vol. 6. P. 1179-1193, <https://doi.org/10.5194/wcd-6-1179-2025>
18. Christenson C.E., Martin J.E., Handlos Z.J. A Synoptic Climatology of Northern Hemisphere, Cold Season Polar and Subtropical Jet Superposition Events // J. Climate. 2017. Vol. 30. P. 7231-7246. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0565.1
19. Cordero R.R., Feron S., Domiani A., Llanillo P.J. et al. Signature of the stratosphere-troposphere coupling on recent record-breaking Antarctic sea-ice anomalies // Cryosphere. 2023. Vol. 17. P. 4996-5006. <https://doi.org/10.5194/tc-17-4995-2023>
20. DallaSanta K., Gerber E.P., Toohey M. The Circulation Response to Volcanic Eruptions: The Key Roles of Stratospheric Warming and Eddy Interactions // J. Climate. 2019. Vol. 32. P. 1001-1120. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0099.1

21. *Fredericksen J.S., Fredericksen C.S.* Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes // *Tellus*. 2007. Vol. 59A. P. 559-617.
22. *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
23. *Gibbs W.J.* Notes on the mean jet-stream over Australia // *Journal of Meteorology*. 1952. Vol. 9. P. 279-284.
24. *Guest P.J.* Inside Katabatic Winds Over the Terra Nova Bay Polynya: 1. Atmospheric Jet and Surface Conditions // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. Vol. 126. e2021JD034902. <https://doi.org/10.1029/2021JD034902>
25. *Gupta A.K., Mittal T., Fauria K.E., Bennartz R., Kok J.F.* The January 2022 Hunga eruption cooled the southern hemisphere in 2022 and 2023 // *Commun. Earth. Environ.* 2025. Vol. 6, no. 1. 15 p. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02181-9>
26. *Haas S., Fricke J., Wahl S., Matthes A.* Sensitivity of the Southern Hemisphere circumpolar jet response to Antarctic ozone depletion: prescribed versus interactive chemistry // *Atm. Chem. Phys.* 2020. Vol. 20. P. 14043-14061. <https://doi.org/10.5194/acp-20-14043-2020>
27. *Harzer F., Gamy H., Davis S., Birner H.* Probing the Suitability of Meridional Stratospheric Ozone Gradients for Inferring Interannual Variability and Trends of the Subtropical Jet Stream // *J. Climate*. 2025. Vol. 38. P. 2571-2587. DOI: 10.1175/JCLI-D-24-0530.1
28. *Lewis W.J.* Ooshi's observations viewed in the context of jet stream discovery // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2003. Vol. 84, no 3. P. 357-369.
29. *Lopez H., Dong Sh., Lee S.-K.* Decadal Modulations of Interhemispheric Global Atmospheric Circulations and Monsoons by the South Atlantic Meridional Overturning Circulation // *J. Climate*. 2016. Vol. 29. P. 1831-1850. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0491.1
30. *Lubis S.W., Hasanzadeh P.* The Intrinsic 150-Day Periodicity of the Southern Hemisphere Extratropical Large-Scale Atmospheric Circulation // *AGU Advances*. 2023. Vol. 4. e2022AV000833. <https://doi.org/10.1029/2022AV000833>
31. *Martin J.* Recent Trends in the Waviness of the Northern Hemisphere Wintertime Polar and Subtropical Jets // *JGR Atmospheres*. 2021. Vol. 26. e2020JD033668. <https://doi.org/10.1029/2020JD033668>
32. *Martin J.E., Norton T.* Waviness of the Southern Hemisphere wintertime polar and subtropical jets // *Weather Clim. Dynam.* 2023. Vol. 4. P. 875-886. <https://doi.org/10.5194/wcd-4-875-2023>
33. *Mindlin J., Shepherd T.G., Osmand M., Verad C.S., Kretschmera M.* Explaining and predicting the Southern Hemisphere eddy-driven jet // *PNAS (Proceedings of the National Academy of Science of the USA)*. 2025. Vol. 122, no. 29. e2500697122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2500697122>
34. *Nakamura H., Shimpo A.* Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset // *J. Climate*. 2004. Vol. 17. P. 1828-1844.
35. *Newton Ch. W.* Axial velocity streaks in the jet stream: ageostrophic inertial oscillations // *Journal of Meteorology*. 1959. Vol. 16. P. 638-645.
36. On the General Circulation of the Atmosphere in Middle Latitudes (by Staff members of Department of Meteorology of the University of Chicago) // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1947. Vol. 29, no.6. P. 255-280.
37. *Patterson M., Wooling T., Bracegirdle T.J., Lewis N.T.* Wintertime Southern Hemisphere Jet Streams Shaped by Interaction of Transient Eddies with Antarctic Orography // *J. Climate*. 2020. Vol. 33.P. 10505-10522. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0153.1
38. *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. Climate*. 2019. Vol. 32. P. 7453-7467.
39. *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
40. *Saggiorio E., Shepherd T.G., Knight J.* Probabilistic Causal Network Modeling of Southern Hemisphere Jet Subseasonal to Seasonal Predictability // *J. Climate*. 2024. Vol. 37. P. 3055-3069. DOI: 10.1175/JCLI-D-23-0425.1

41. Screen J.A., Eade R., Smith D.M., Thomson S., Yu H. Net Equatorward Shift of the Jet Streams When the Contribution From Sea-Ice Loss Is Constrained by Observed Eddy Feedback // *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49. e2022GL100523. 9 p. <https://doi.org/10.1029/2022GL100523>
42. Simmons A.J. Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022 // *Weather Clim. Dynam.* 2022. Vol. 3. P. 777-809. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-777-2022>
43. Simpson I.R., Polyani L.M. Revisiting the relationship between jet position, forced response, and annular mode variability in the southern midlatitudes // *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43. P. 2896-2903. DOI: 10.1002/2016GL067989
44. Smith D.M., Screen J.A., Deser C., Cohen J. et al. The Polar Amplification Model Inter-comparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification // *Geosci. Model Dev.* 2019. Vol. 12. P. 1139-1164. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1139-2019>
45. Smith S., Lu J., Staten P.W. Diabatic Eddy Forcing Increases Persistence and Opposes Propagation of the Southern Annular Mode in MERRA-2 // *J. Atm. Sci.* 2024. Vol. 81. P. 743-763. DOI: 10.1175/JAS-D-23-0019.1
46. Spensberger C., Li C., Sprengler T. Linking Instantaneous and Climatological Perspectives on Eddy-Driven and Subtropical Jets // *J. Climate.* 2023. Vol. 36. P. 8525-8536. DOI: 10.1175/JCLI-D-23-0080.1
47. Suresan S., Harnic N., Caballero R. Extreme weather anomalies and surface signatures associated with merged Atlantic–African jets during northern winter // *Wea. Clim. Dyn.* 2025. Vol. 6. P. 789-806. <https://doi.org/10.5194/wcd-6-789-2025>
48. Thapa U.K., Stevenson S. Influence of ENSO and Volcanic Eruptions on Himalayan Jet Latitude // *Geophys. Res. Lett.* 2024. Vol. 51. e2023GL107271. 10 p. <https://doi.org/10.1029/2023GL107271>
49. Wenzel S., Eyring V., Gerber E.P., Karpechko A.Yu. Constraining Future Summer Austral Jet Stream Positions in the CMIP5 Ensemble by Process-Oriented Multiple Diagnostic Regression // *J. Climate.* 2016. Vol. 29. P. 673-686. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0412.1
50. Williams R.S., Marshall G.J., Levine X., Graff L.S. et al. Future Antarctic Climate: Story-lines of Midlatitude Jet Strengthening and Shift Emergent from CMIP6 // *J. Climate.* 2024. Vol. 37. P. 2157- 2178. DOI: 10.1175/JCLI-D-23-0122.1
51. Xu X., Wang Yi, Wei F., Bo M., Tang H., Wang D., Bian L., Wang B., Zuo P., Jiang Ch., Zhou Z., Li Z., Zeng L., Zhu X. The disrupted jet stream and its influence on flight time during solar proton events // *Scientific Reports.* 2025. Vol. 15, no. 1. P. 22969. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07137-9>, 14 p.

References

1. Astapenko P., Al't ZH., Ropa N. Nekotorye voprosy cirkulyacii atmosfery v Antarktike v 1958 g. *Mezhdunarodnyj geofizicheskij god. II razdel programmy MGG (meteorologiya) pod red. V.A. Bugaeva.* Moscow, Izdanie AN SSSR, 1960, 131 p. [in Russ.].
2. Bugaev V.A. Strujnye techeniya v atmosfere nad Mirnym. *Byulleten' sovetskoj antarkticheskoy ekspedicii*, 1959, no. 12, pp. 20-23 [in Russ.].
3. Bugaev V.A. Atmosfernye processy v Antarktike. *Osnovnye itogi izucheniya Antarktiki za 10 let: Doklady Vsesoyuznogo soveshchaniya po izucheniyu Antarktiki*, 1967, pp. 16-26 [in Russ.].
4. Gajgerov S.S. Aerologiya polyarnyh rajonov. Moscow: Gidrometizdat publ., 1964. 304 p. [in Russ.].
5. Gajgerov S.S. Nekotorye dannye ob aerologicheskom stroenii atmosfery u antarkticheskogo poberezh'ya zimoj. *Trudy CAO*, 1964, vol. 59, pp. 92-102 [in Russ.].
6. Ekaykin A.A., Veres A.N. Temperature shifts in Central Antarctica after major volcanic eruptions in the second millennium of the common era. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2023, vol. 69, no. 3, pp. 374-385. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-3-374-385> [In Russ.].

7. Ivanova A.R. Some features of the Southern Hemisphere circulation in the free atmosphere affecting aircraft flights. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, vol. 396, no. 2, pp. 8-27. DOI: 10.37162/2618-9631-2025-2-8-27 [In Russ.].

8. Meteorologiya Yuzhnogo polushariya, pod red. CH.U. N'yutona. Leningrad, Gidrometeorizdat publ., 1976, 260 p. [In Russ.].

9. Muravyev Ya.D. Vulkanicheskie izverzheniya i klimat [Volcanic eruptions and climate]. *Вестник ДВО РАН [Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences]*, 2007, no. 2, pp. 71-82 [In Russ.].

10. Pravila aeronavigacionnogo obsluzhivaniya. Meteorologiya (PANS-MET, Doc 10157). Mezhdunarodnaya organizaciya grazhdanskoj aviacii. Pervoe izdanie. Aprel' 2025 g. [In Russ.].

11. Barnes E.A., Barnes N.W., Polvani L.M. Delayed Southern Hemisphere Climate Change Induced by Stratospheric Ozone Recovery, as Projected by the CMIP5 Models. *J. Climate*, 2014, vol. 27, pp. 852-867. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00246.1

12. 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>

13. Breul Ph., Ceppi P., Shepherd T.G. Revisiting the wintertime emergent constraint of the southern hemispheric midlatitude jet response to global warming. *Weather Clim. Dynam.*, 2023, vol. 4, pp. 39-47. <https://doi.org/10.5194/wcd-4-39-2023>

14. Breul, P., Ceppi, P., Simpson, I.R., Wooling T. Seasonal and regional jet stream changes and drivers. *Nat Rev Earth Environ*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00749-9>

15. Cable A., Tarrison T.C., Kent E., Kornes R., Bracegirdle T.J. A new index used to characterise the extent of Antarctic marine coastal winds in climate projections. *Weather Clim. Dynam.*, 2026, vol. 7, pp. 247-262. <https://doi.org/10.5194/wcd-7-247-2026>

16. Caporale G.M., Romero-Rojo M.F., Gil-Alana L.A. Trends in Sea Ice and Snow-Cover Extent: A Fractional Integration Analysis. *J. Hydrometeor.*, 2026, vol. 27, pp. 5-16. DOI: 10.1175/JHM-D-25-0050.1

17. Chen T.-Ch., Goose H., Davrinche C., Libera S. et al. Southern Annular Mode persistence and westerly jet: a reassessment using high-resolution global models. *Weather Clim. Dynam.*, 2025, vol. 6, pp. 1179-1193. <https://doi.org/10.5194/wcd-6-1179-2025>

18. Christenson C.E., Martin J.E., Handlos Z.J. A Synoptic Climatology of Northern Hemisphere, Cold Season Polar and Subtropical Jet Superposition Events. *J. Climate*, 2017, vol. 30, pp. 7231-7246. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0565.1

19. Cordero R.R., Feron S., Domiani A., Llanillo P.J. et al. Signature of the stratosphere-troposphere coupling on recent record-breaking Antarctic sea-ice anomalies. *Cryosphere*, 2023, vol. 17, pp. 4996-5006. <https://doi.org/10.5194/tc-17-4995-2023>

20. DallaSanta K., Gerber E.P., Toohey M. The Circulation Response to Volcanic Eruptions: The Key Roles of Stratospheric Warming and Eddy Interactions. *J. Climate*, 2019, vol. 32, pp. 1001-1120. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0099.1

21. Fredericksen J.S., Fredericksen C.S. Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes. *Tellus*, 2007, vol. 59A, pp. 559-617.

22. 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

23. Gibbs W.J. Notes on the mean jet-stream over Australia. *Journal of Meteorology*, 1952, vol. 9, pp. 279-284.

24. Guest P.J. Inside Katabatic Winds Over the Terra Nova Bay Polynya: 1. Atmospheric Jet and Surface Conditions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, vol. 126, e2021JD034902. <https://doi.org/10.1029/2021JD034902>

25. Gupta A.K., Mittal T., Fauria K.E., Bennartz R., Kok J.F. The January 2022 Hunga eruption cooled the southern hemisphere in 2022 and 2023. *Commun. Earth. Environ.*, 2025, vol. 6, no. 1, 15 p. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02181-9>

26. Haas S., Fricke J., Wahl S., Matthes A. Sensitivity of the Southern Hemisphere circumpolar jet response to Antarctic ozone depletion: prescribed versus interactive chemistry. *Atm. Chem. Phys.*, 2020, vol. 20, pp. 14043-14061. <https://doi.org/10.5194/acp-20-14043-2020>
27. Harzer F., Garny H., Davis S., Birner H. Probing the Suitability of Meridional Stratospheric Ozone Gradients for Inferring Interannual Variability and Trends of the Subtropical Jet Stream. *J. Climate*, 2025, vol. 38, pp. 2571-2587. DOI: 10.1175/JCLI-D-24-0530.1
28. Lewis W.J. Ooshi's observations viewed in the context of jet stream discovery. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, vol. 84, no 3, pp. 357-369.
29. Lopez H., Dong Sh., Lee S.-K. Decadal Modulations of Interhemispheric Global Atmospheric Circulations and Monsoons by the South Atlantic Meridional Overturning Circulation. *J. Climate*, 2016, vol. 29, pp. 1831-1850. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0491.1
30. Lubis S.W., Hasanazadeh P. The Intrinsic 150-Day Periodicity of the Southern Hemisphere Extratropical Large-Scale Atmospheric Circulation. *AGU Advances*, 2023, vol. 4, e2022AV000833. <https://doi.org/10.1029/2022AV000833>
31. Martin J. Recent Trends in the Waviness of the Northern Hemisphere Wintertime Polar and Subtropical Jets. *JGR Atmospheres*, 2021, vol. 26, e2020JD033668. <https://doi.org/10.1029/2020JD033668>
32. Martin J.E., Norton T. Waviness of the Southern Hemisphere wintertime polar and subtropical jets. *Weather Clim. Dynam.*, 2023, vol. 4, pp. 875-886. <https://doi.org/10.5194/wcd-4-875-2023>
33. Mindlin J., Shepherd T.G., Osmund M., Verad C.S., Kretschmera M. Explaining and predicting the Southern Hemisphere eddy-driven jet. *PNAS (Proceedings of the National Academy of Science of the USA)*, 2025, vol. 122, no. 29, e2500697122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2500697122>
34. Nakamura H., Shimpo A. Seasonal Variations in the Southern Hemisphere Storm Tracks and Jet Streams as Revealed in a Reanalysis Dataset. *J. Climate*, 2004, vol. 17, pp. 1828-1844.
35. Newton Ch. W. Axial velocity streaks in the jet stream: ageostrophic inertial oscillations. *Journal of Meteorology*, 1959, vol. 16, pp. 638-645.
36. On the General Circulation of the Atmosphere in Middle Latitudes (by Staff members of Department of Meteorology of the University of Chicago). *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 1947, vol. 29, no. 6, pp. 255-280.
37. Patterson M., Wooling T., Bracegirdle T.J., Lewis N.T. Wintertime Southern Hemisphere Jet Streams Shaped by Interaction of Transient Eddies with Antarctic Orography. *J. Climate*, 2020, vol. 33, pp. 10505-10522. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0153.1
38. 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. Climate*, 2019, vol. 32, pp. 7453-7467.
39. 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
40. Saggiorio E., Shepherd T.G., Knight J. Probabilistic Causal Network Modeling of Southern Hemisphere Jet Subseasonal to Seasonal Predictability. *J. Climate*, 2024, vol. 37, pp. 3055-3069. DOI: 10.1175/JCLI-D-23-0425.1.
41. Screen J.A., Eade R., Smith D.M., Thomson S., Yu H. Net Equatorward Shift of the Jet Streams When the Contribution From Sea-Ice Loss Is Constrained by Observed Eddy Feedback. *Geophys. Res. Lett.*, 2022, vol. 49, e2022GL100523, 9 p. <https://doi.org/10.1029/2022GL100523>
42. Simmons A.J. Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022. *Weather Clim. Dynam.*, 2022, vol. 3, pp. 777-809. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-777-2022>
43. Simpson I.R., Polvani L.M. Revisiting the relationship between jet position, forced response, and annular mode variability in the southern midlatitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 2016, vol. 43, pp. 2896-2903. DOI: 10.1002/2016GL067989
44. Smith D.M., Screen J.A., Deser C., Cohen J. et al. The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification. *Geosci. Model Dev.*, 2019, vol. 12, pp. 1139-1164. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1139-2019>

45. Smith S., Lu J., Staten P.W. Diabatic Eddy Forcing Increases Persistence and Opposes Propagation of the Southern Annular Mode in MERRA-2. *J. Atm. Sci.*, 2024, vol. 81, pp. 743-763. DOI: 10.1175/JAS-D-23-0019.1

46. Spensberger C., Li C., Sprengler T. Linking Instantaneous and Climatological Perspectives on Eddy-Driven and Subtropical Jets. *J. Climate*, 2023, vol. 36, pp. 8525-8536. DOI: 10.1175/JCLI-D-23-0080.1

47. Suresan S., Harnic N., Caballero R. Extreme weather anomalies and surface signatures associated with merged Atlantic–African jets during northern winter. *Wea. Clim. Dyn.*, 2025, vol. 6, pp. 789-806. <https://doi.org/10.5194/wcd-6-789-2025>

48. Thapa U.K., Stevenson S. Influence of ENSO and Volcanic Eruptions on Himalayan Jet Latitude. *Geophys. Res. Lett.*, 2024, vol. 51, e2023GL107271, 10 p. <https://doi.org/10.1029/2023GL107271>

49. Wenzel S., Eyring V., Gerber E.P., Karpechko A.Yu. Constraining Future Summer Austral Jet Stream Positions in the CMIP5 Ensemble by Process-Oriented Multiple Diagnostic Regression. *J. Climate*, 2016, vol. 29, pp. 673-686. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0412.1

50. Williams R.S., Marshall G.J., Levine X., Graff L.S. et al. Future Antarctic Climate: Storylines of Midlatitude Jet Strengthening and Shift Emergent from CMIP6. *J. Climate*, 2024, vol. 37, pp. 2157-2178. DOI: 10.1175/JCLI-D-23-0122.1

51. Xu X., Wang Yi, Wei F., Bo M., Tang H., Wang D., Bian L., Wang B., Zuo P., Jiang Ch., Zhou Z., Li Z., Zeng L., Zhu X. The disrupted jet stream and its influence on flight time during solar proton events. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 22969. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07137-9>, 14 p.

Поступила 15.03.2026; принята в печать 26.05.2026.
Submitted 15.03.2026; accepted for publication 26.05.2026.