

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2026-3-63-81>

УДК 551.557.5

## **Характеристики струйных течений в Южном полушарии по данным реанализа ERA5 за период 2001–2025 гг.**

***А.Р. Иванова, Е.Н. Скриптунова,  
Н.И. Комасько, А.А. Завьялова***

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

Представлена климатология струйных течений Южного полушария, рассчитанная для первой четверти XXI века по данным реанализа ERA5. Исследована повторяемость струйных течений в различных частях полушария, изучена сезонная и межгодовая изменчивость характеристик максимального ветра (скорости, высоты уровня, направления, толщины слоя). Приведены климатические данные о струйных течениях для аэронавигационного планирования на эшелонах полета.

*Ключевые слова:* струйное течение, Южное полушарие, реанализ, климатология, сезонная навигация

## **Characteristics of the Southern Hemisphere jet streams based on ERA5 data for 2001–2025**

***A.R. Ivanova, E.N Skriptunova,  
N.I. Komasko, A.A. Zavyalova***

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

A climatology of the Southern Hemisphere jet streams calculated for the first quarter of the 21st century using ERA5 reanalysis data is presented. An occurrence frequency of jet streams in various regions is investigated, and the seasonal and interannual variabilities of maximum wind characteristics (speed, level height, direction, and layer thickness) are analyzed. Climatological data on jet streams at flight levels intended for air navigation planning are provided.

*Keywords:* jet stream, Southern Hemisphere, reanalysis, climatology, seasonal air navigation

### **Введение**

Струйные течения (СТ), представляющие собой «сильные узкие воздушные потоки с почти горизонтальной осью в верхней тропосфере или стратосфере, характеризующиеся большими вертикальными и горизонтальными сдвигами ветра и одним или более максимумами скорости» [4],

являются одним из ключевых объектов глобальной атмосферной циркуляции и связаны с границами, разделяющими масштабные области атмосферы с различным термическим режимом. В горизонтальной плоскости подобное разграничение происходит посредством планетарных высотных фронтальных зон, в вертикальной – тропопаузы. Изменчивость СТ, таким образом, может быть маркером глобальных изменений атмосферной циркуляции, поэтому мониторинг их положения и интенсивности весьма важен. Климатические характеристики СТ отслеживаются по данным различных реанализов [5, 7, 13], а будущее состояние – с помощью глобальных климатических моделей [6, 11].

Обновление климатических данных о СТ Южного полушария (ЮП) в настоящее время особенно актуально в свете решения задач полного информационного замещения продукции Всемирной системы зональных прогнозов данными Российского центра зональных прогнозов (РЦЗП). Оперативная информация о положении СТ, их характеристиках – скорости на оси, направлении, горизонтальных и вертикальных размерах, высоте уровня максимального ветра (МВ) – имеет важное значение для аэронавигации и должна предоставляться для территории всего глобуса на картах особых явлений SigWX.

Кроме того, помимо оперативной прогностической информации, авиакомпаниям необходимы сведения о среднем (климатическом) ветре и положении СТ для разработки стратегического планирования на ближайший навигационный сезон. Существуют периоды летней и зимней навигации, для которых производятся предварительные штурманские расчеты по планируемым трассам полетов с целью определения оптимальных маршрутов и потенциально необходимых запасов горючего для производства закупок топлива. Хотя периоды для обработки такой информации в регламентирующих документах строго не оговорены, как правило, используются свежие климатические данные продолжительностью 5–10 лет.

### **Использованные материалы и метод определения характеристик струйных течений**

В работе были использованы материалы ERA5 – находящегося в свободном доступе реанализа глобальных атмосферных наблюдений пятого поколения, созданного в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды. Это данные о геопотенциале и компонентах скорости ветра на сетке с шагом 0.25 градуса по широте и долготе на следующих стандартных изобарических поверхностях: 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 50 гПа (для сроков 00, 06, 12, 18 ВСВ). К сожалению, уровень 70 гПа для геопотенциала в реанализе ERA5 отсутствует, что не позволило более точно определять положение оси СТ в низких широтах.

Для получения информации о СТ в каждом узле сетки реанализа был произведен расчёт характеристик МВ – скорости, высоты уровня, направления. Было решено применить стандартный метод поиска максимума

на вертикальном профиле скорости ветра, описанный в [2] и реализованный ранее на данных радиозондирования. Гладкий профиль получался на основе имеющейся информации о ветре на стандартных изобарических поверхностях с помощью сплайн-аппроксимации 3-го порядка при условии равенства нулю второй производной на верхней и нижней границах слоя. Далее путем пошагового сравнения значений на профиле с интервалом 1 м выбиралось максимальное значение, определяемое как скорость максимального ветра. Если оно превышало 30 м/с, то относилось к области СТ. Высота, на которой это значение обнаружено, назначалась уровнем МВ (высотой оси СТ). Направление МВ рассчитывалось по отмеченным на этой высоте значениям зональной и меридиональной составляющих скорости ветра, сплайны для которых строились параллельно.

Однако даже для данных реанализа с довольно грубым вертикальным разрешением выяснилось, что ветер по вертикали меняется крайне неравномерно. Анализ локальных максимумов на вертикальном профиле, построенном без применения сплайна (кусочно-линейном) в средней и верхней тропосфере, выявил возможность появления до 4 максимумов со скоростями, превышающими 30 м/с. В табл. 1 показано количество узлов с разным числом максимумов на профиле в процентном соотношении от площади СТ.

**Таблица 1.** Процент узлов сетки реанализа ERA5 в полосе 20–80° ю. ш., на вертикальном профиле которых фиксируется N максимумов скорости ветра, превышающей 30 м/с, в среднем за период 2001–2025 гг.

**Table 1.** Percentage of ERA5 reanalysis grid points in the 20–80° S latitude band where N maxima of wind speeds exceeding 30 m/s are recorded on the vertical profile, averaged over the period 2001–2025

| N           | Месяц |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      | Год  |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|
|             | I     | II   | III  | IV   | V    | VI   | VII   | VIII  | IX   | X    | XI   | XII  |      |
| 20–80° ю.ш. |       |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |
| 1           | 90.9  | 90.8 | 90.6 | 89.5 | 86.8 | 83.8 | 80.6  | 79.2  | 80.0 | 82.2 | 85.8 | 89.6 | 85.1 |
| 2           | 8.7   | 8.8  | 9.0  | 10.0 | 12.5 | 15.3 | 18.2  | 19.6  | 19.0 | 17.0 | 13.7 | 10.0 | 14.1 |
| 3           | 0.4   | 0.4  | 0.4  | 0.5  | 0.7  | 0.9  | 1.2   | 1.2   | 1.1  | 0.8  | 0.5  | 0.4  | 0.8  |
| 4           | .003  | .004 | .004 | .005 | .007 | .010 | .0133 | .0134 | .010 | .007 | .004 | .003 | .008 |

Хорошо заметно, что летом и ранней осенью ЮП (январь–март) в теле струи наблюдается наибольшее количество вертикальных профилей с единственным максимумом (свыше 90 %). Зимой и ранней весной, в период расщепления струи на субтропическое и полярное СТ, вертикальный профиль ветра демонстрирует множественность максимумов.

По этой причине, прежде, чем начинать построение сплайна по данным реанализа, выбиралось самое большое значение скорости ветра на стандартных изобарических поверхностях, а далее, с привлечением данных

на соседних уровнях, между ними воспроизводился гладкий профиль с использованием кубического сплайна с шагом 1 м.

Поскольку струйные течения, интересующие авиацию, расположены выше эшелона полета FL100, было принято решение рассматривать только те профили скорости ветра, максимумы на которых располагаются выше 3 км. В нижнем слое тропосферы, как правило, имеют место так называемые СТНУ – струйные течения нижнего уровня, образующиеся под инверсионными слоями и имеющие гораздо меньшую вертикальную и горизонтальную протяженность. Стоит заметить, однако, что наличие стоковых ветров с Антарктического ледового щита часто приводит к тому, что на его побережье в нижней тропосфере регистрируются очень сильные ветры, со скоростями, превышающими 30 м/с, которые нельзя отнести к СТНУ как таковым [6].

### **Области Южного полушария с отсутствием струйных течений**

В ходе исследования было выявлено наличие зон в тропосфере ЮП, где за 25 лет во всей толще тропосферы ни разу не фиксировались значения скорости ветра, превышающие 30 м/с. Такие области были определены для всех месяцев, а на рис. 1 красной заливкой они представлены только для центральных месяцев сезонов. Январская карта отсутствует, поскольку в январе и феврале подобные области не наблюдались ни разу за 25 лет.

Наибольшие площади зон тропосферы без СТ отмечаются в апреле над приэкваториальными частями Африки и Южной Америки. Подобная ситуация, но на меньшей территории, повторяется в ноябре (для Африки еще и в октябре). Зимой ЮП (с августа по сентябрь) зона отсутствия струйных течений прослеживается в приэкваториальной части Тихого океана к северо-востоку от австралийского материка. К декабрю не тронутой струями остаётся только крохотная территория примерно над юго-востоком африканской Анголы.

Анализ сезонного хода площади областей, свободных от влияния СТ, показал, что они составляют от 3.0 до 5.5 % от площади полушария. При этом в начале века максимум их приходился на осень ЮП, а в последнее десятилетие наибольшие площади отмечаются либо в летний, либо в зимние периоды.

### **Повторяемость струйных течений в Южном полушарии**

За исключения районов очень незначительной площади, описанных в предыдущем разделе, СТ за прошедшие 25 лет были отмечены во всех остальных областях ЮП. Напомним, что здесь и далее будут обсуждаться только СТ с осью в средней или верхней тропосфере (выше 3 км). На рис. 2 приведены значения средней повторяемости областей МВ со скоростью

более 30 м/с в центральные месяцы сезонов. Заметно, что существуют довольно обширные районы, где СТ наблюдаются практически всегда. Прежде всего это вытянутая область с осью примерно вдоль  $50^{\circ}$  ю. ш., простирающаяся от центра Южной Атлантики до  $80\text{--}90^{\circ}$  в. д., где в зимне-весенний сезон ЮП (карты для июля и октября) повторяемость СТ превышает 90 %, а в летне-осенний (карты для января и апреля) она ненамного ниже (80 %). Кроме того, в июле повторяемость СТ выше 90 % прослеживается вдоль  $30^{\circ}$  ю. ш. от центральной части Индийского океана через всю Австралию до  $140^{\circ}$  з. д. Примечательной особенностью является резкое увеличение (до 70 %) повторяемости сильных ветров, пересекающих экватор: летом (январь) – в центральной части Тихого океана, зимой (июль) – над Индийским океаном, о различии природы которых будет упомянуто ниже. Хотя в классических представлениях о СТ считалось, что они не способны пересекать экватор, в [9] было показано, что существует межполушарный обмен в зонах прорыва западных ветров («westerly ducts»), связанных с эпизодами разрушений волн Россби.

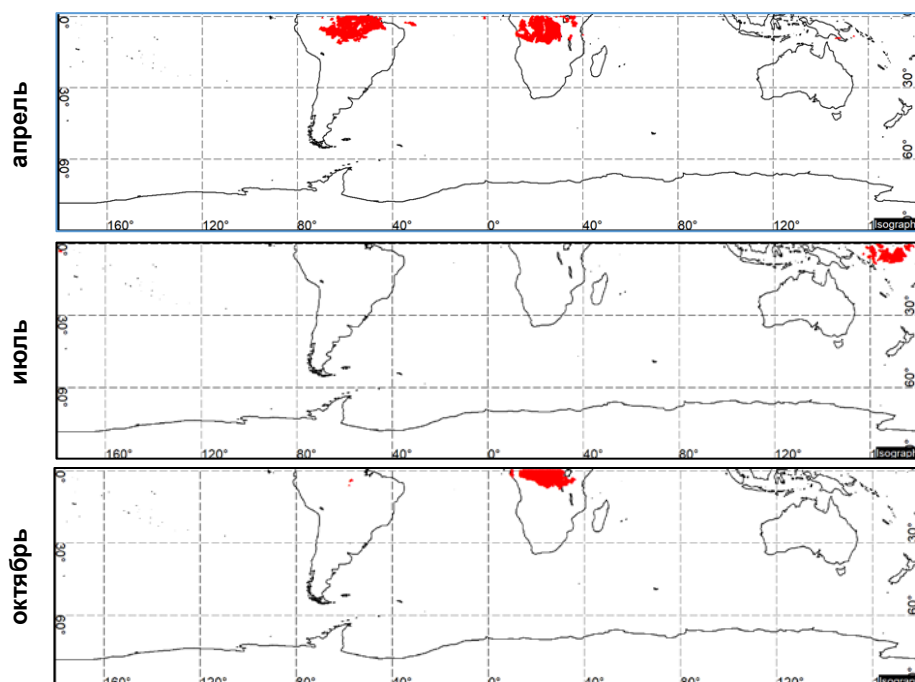


**Рис. 1.** Области в средней и верхней тропосфере (выделены красным) со скоростями ветра, не превышающими 30 м/с, за период 2001–2025 гг. в апреле, июле и октябре.

**Fig. 1.** Regions in the middle and upper troposphere (highlighted in red) with maximum wind speeds not exceeding 30 m/s during the period 2001–2025 in April, July, and October.

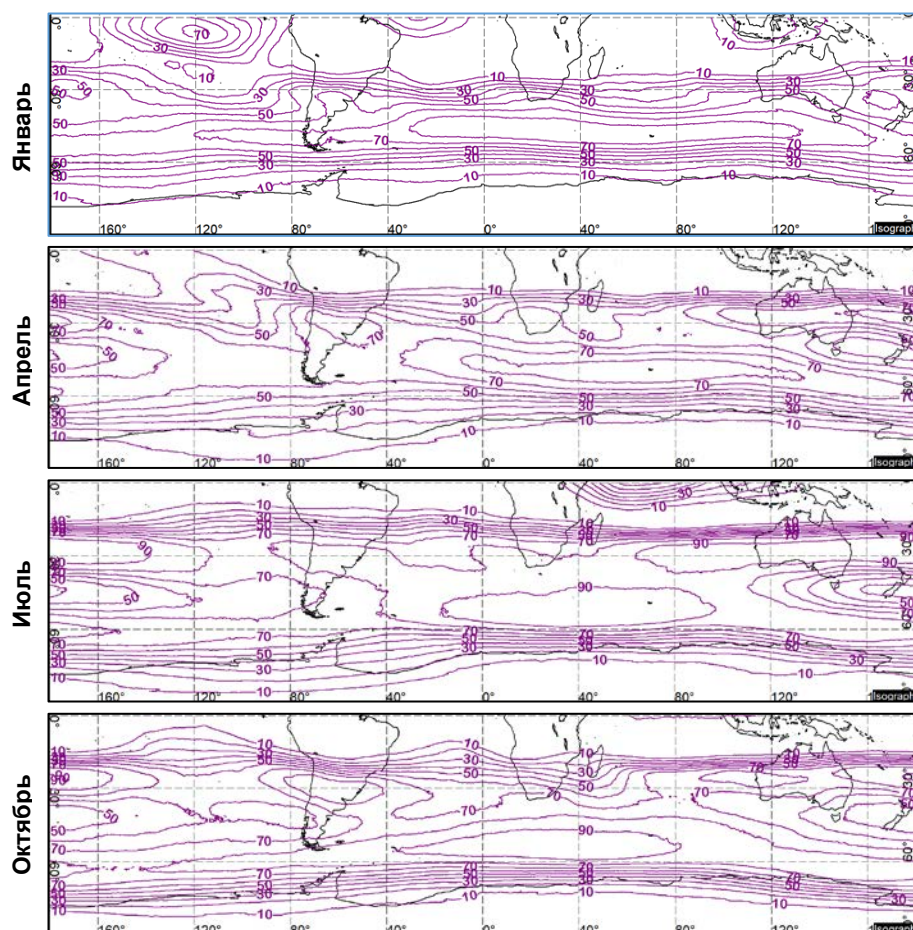


**Рис. 2.** Повторяемость (в %) значений скорости ветра выше 30 м/с над территорией ЮП в центральные месяцы сезонов за период 2001–2025 гг.

**Fig. 2.** Frequency (in %) of wind speed values above 30 m/s over the Southern Hemisphere in the central months of the seasons for 2001–2025.

Было установлено, что площадь, занятая СТ, в период с 2001 по 2025 г. составила в среднем 38.6 % от территории Южного полушария (табл. 2). При этом от лета к зиме площадь струй увеличивается с 28.1 до 48.5 % – в 1.7 раза. В это же время площадь областей максимального ветра со скоростями  $\geq 60$  м/с возрастает более чем в 2 раза (с 2.8 до 5.9 %), а со скоростями  $\geq 90$  м/с – почти в 4 раза (с 0.03 до 0.11 %). Наибольшее сокращение областей интенсивных скоростей наблюдается в декабре, а максимальное ослабление струи, выражающееся в уменьшении отношения площади высоких скоростей к общей площади СТ, – в ноябре. Таким образом, максимальному сужению струи предшествует ее ослабление и, напротив, максимальное расширение СТ наступает после ее усиления.

**Таблица 2.** Сезонный ход повторяемости  $P$  (%) скорости максимального ветра  $V_{MAX}$  в различных диапазонах за период 2001–2025 гг. и доля площадей (%) областей МВ со скоростями  $\geq 60$  м/с и  $\geq 90$  м/с от площади СТ (максимальные и минимальные значения обозначены красным и синим цветом соответственно)

**Table 2.** Seasonal variation in the frequency  $P$  (%) of maximum wind speed  $V_{MAX}$  across various ranges for the period 2001–2025, and the area rate (%) of regions with maximum wind speeds  $\geq 60$  m/s and  $\geq 90$  m/s relative to the total area of the jet stream (maximum and minimum values are indicated in red and blue, respectively)

| Месяц    | P30<br>$V_{MAX} \geq 30$ м/с | P60<br>$V_{MAX} \geq 60$ м/с | P90<br>$V_{MAX} \geq 90$ м/с | P60/P30 | P90/P30 |
|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|---------|
| Январь   | 28.1                         | 2.8                          | 0.03                         | 9.82    | 0.11    |
| Февраль  | 28.8                         | 2.9                          | 0.03                         | 10.10   | 0.10    |
| Март     | 30.2                         | 3.2                          | 0.04                         | 10.58   | 0.12    |
| Апрель   | 34.9                         | 3.6                          | 0.04                         | 10.41   | 0.10    |
| Май      | 41.0                         | 4.4                          | 0.05                         | 10.85   | 0.11    |
| Июнь     | 44.7                         | 5.4                          | 0.07                         | 12.11   | 0.16    |
| Июль     | 47.8                         | 5.9                          | 0.11                         | 12.37   | 0.22    |
| Август   | 48.5                         | 5.9                          | 0.09                         | 12.19   | 0.19    |
| Сентябрь | 47.0                         | 5.2                          | 0.06                         | 11.01   | 0.14    |
| Октябрь  | 43.6                         | 3.9                          | 0.04                         | 8.99    | 0.08    |
| Ноябрь   | 37.7                         | 2.9                          | 0.02                         | 7.64    | 0.05    |
| Декабрь  | 30.9                         | 2.4                          | 0.02                         | 7.85    | 0.06    |
| Среднее  | 38.6                         | 4.0                          | 0.05                         | 10.4    | 0.12    |

### Средние характеристики струйных течений Южного полушария

#### *Скорость максимального ветра*

Структура поля скорости МВ в среднем за период 2001–2025 г., представленная на рис. 3, обнаруживает в январе (летом ЮП) единую струю с квазизональной осью вблизи  $45^\circ$  ю. ш. и область МВ (ОМВ), простирающуюся вдоль половины широтного круга со скоростью, превышающей 45 м/с. Примечательным является наличие небольшого участка в приэкваториальной части Тихого океана, где СТ со средней скоростью около 35 м/с пересекает экватор, направляясь из Северного полушария в Южное.

Осенью (в апреле) при охлаждении тропосферы над Австралией и западом Тихого океана происходит расщепление единой струи, образование «дыры» в ее теле и начинает формироваться субтропическое СТ с осью вблизи  $30^\circ$  ю. ш. и скоростями на ней порядка 40 м/с. Напомним, что, согласно [8], расщепление и слияние СТ происходит в течение 2–3 недель. Явное разделение на субтропическое и полярное СТ в ЮП отчетливо заметно только над западной частью Тихого океана. Зимой ЮП (июль) интенсивность субтропического СТ достигает максимума (средние скорости на оси выше 60 м/с), и оно выражено в поле ветра гораздо лучше, чем

полярное СТ, сместившееся осью к  $60^\circ$  ю. ш. При этом заметна нижняя часть пересекающего экватор в центральной части Индийского океана СТ со скоростями около 30 м/с, чье стратосферное происхождение подтверждается дальнейшим анализом направления ветра. В весенние месяцы (октябрь) структура поля максимального ветра в верхней тропосфере указывает на перестройку циркуляции к летнему сценарию: ядро субтропического СТ сокращается по площади и ослабевает, а ОМВ в полярном СТ, напротив, усиливается.

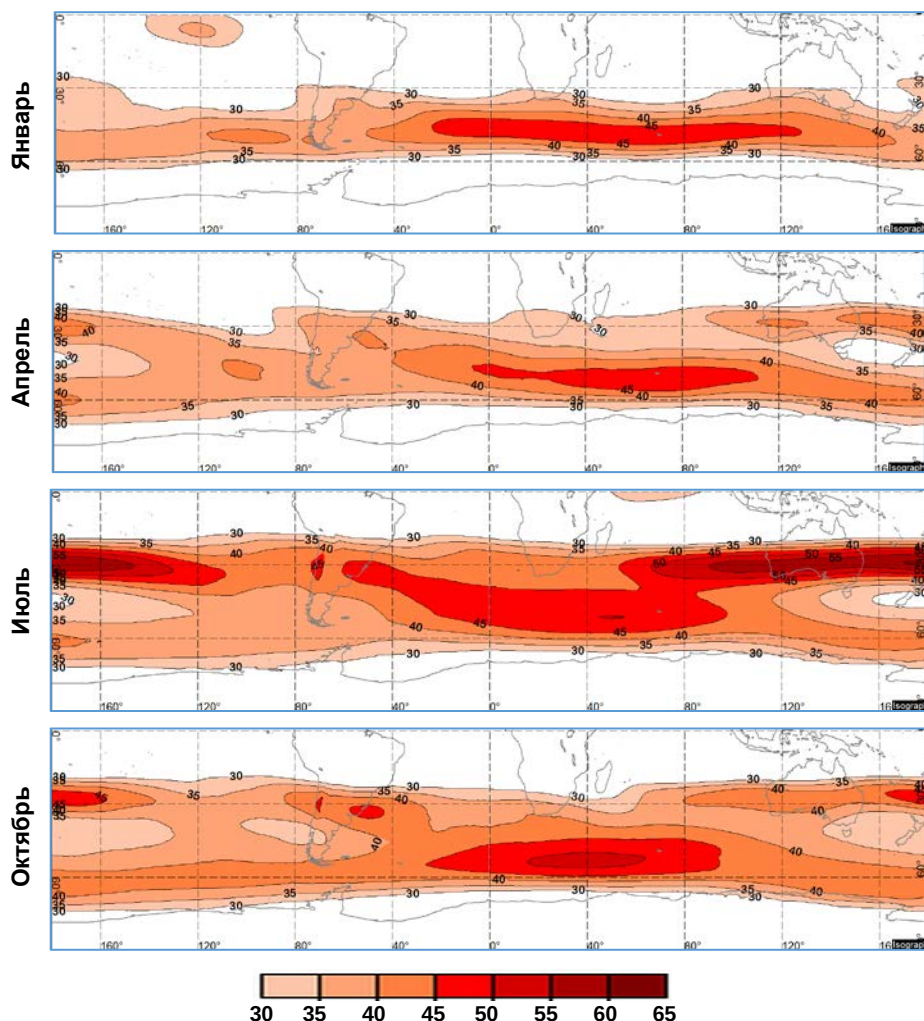


**Рис. 3.** Поле скорости максимального ветра (в м/с) в зонах струйных течений Южного полушария в среднем за период 2001–2025 гг.

**Fig. 3.** Maximum wind speed (in m/s) in the jet stream areas of the Southern Hemisphere averaged for 2001–2025.

### *Высота оси струйных течений*

Высота оси СТ, изображенная на рис 4, соответствует классическим канонам, пожалуй, только в январе, в период существования одной струи. На рисунке отчетливо видно, что летом в ЮП высота оси СТ зависит от широты: она уменьшается к полюсу. В приэкваториальном участке СТ, пересекающем экватор, уровень МВ расположен на 13–14 км (соответствует высоте оси субтропического СТ), в то время как на полярной стороне моноструи он опускается до 9 км. В апреле становится заметна неоднородность значений высоты струи в приантарктической области: на краю осевая плоскость СТ приподнимается.

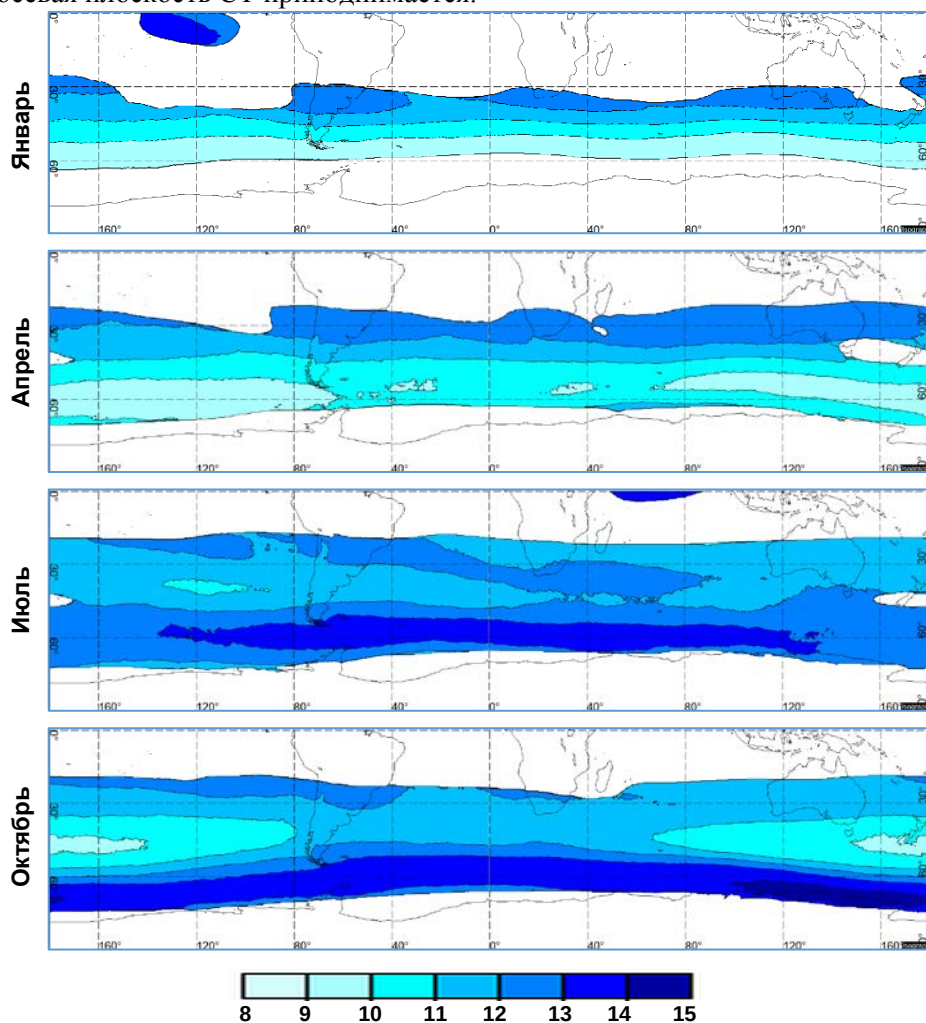


**Рис. 4.** Поле высоты уровня максимального ветра (км) – осевой плоскости струйных течений Южного полушария в среднем за период 2001-2025 гг.  
**Fig. 4.** Height (km) of the maximum wind level—the axial plane of Southern Hemisphere jet stream averaged for 2001-2025.

Зимняя (июльская) картина демонстрирует максимальный подъем оси СТ, практически везде превышающей 11 км, на полярной стороне СТ достигающей 13–14 км. Это связано со слиянием тропосферного СТ с нижней частью стратосферного полярного вихря, так что определить точно переход от сильных скоростей в СТ к периферийным потокам циркумполярного вихря не представляется возможным. Весной (в октябре) подобная ситуация на полярной стороне СТ сохраняется, однако в его центральной части вдоль 45° ю. ш. над Тихим и восточной частью Индийского океана осевая плоскость СТ опускается.

### *Направление максимального ветра*

В умеренных широтах тропосферное СТ в осреднении своем должно быть квазизональным, то есть сохранять преимущественно западное направление. Средняя картина, рассчитанная с учетом повторяемости СТ в каждом квадрате сетки, действительно отвечает этому утверждению. На рис. 5 изображены цветом преобладающие румбы в среднем за центральные месяцы сезонов.

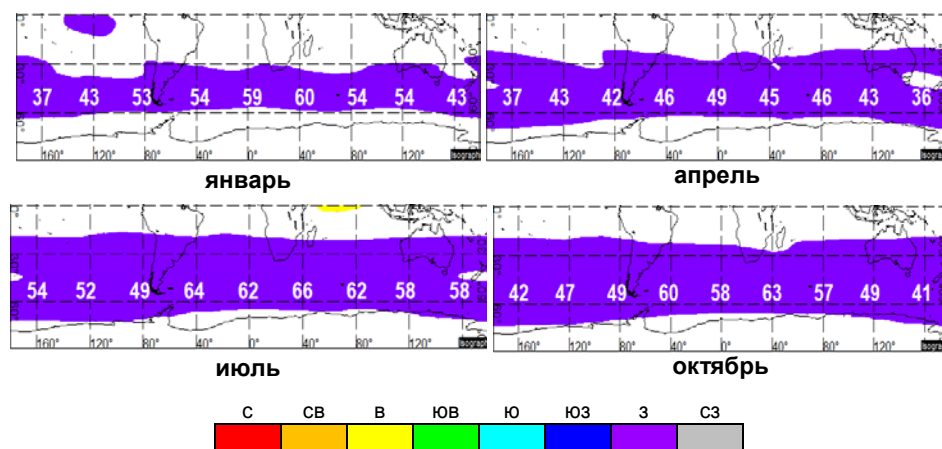


**Рис. 5.** Преобладающее направление максимального ветра (румб) в зонах СТ по данным ERA5 за 2001–2025 гг. с указанием его повторяемости вдоль 45° ю. ш.

**Fig. 5.** Prevailing direction (rhumb) of maximum wind in the jet stream region based on ERA5 data for 2001–2025, showing its frequency along 45° S.

Фиолетовый цвет, обозначающий западное направление, полностью превалирует во внетропических широтах, а ближе к экватору видна нижняя часть восточного приэкваториального СТ (желтый цвет), расположенного в стратосфере. Отметим, что повторяемость западного направления в центральной части СТ наиболее высока в зимний период ЮП, а в осенний период ее значения снижаются. При этом зональность струйного потока чаще всего соблюдается в Южной Атлантике, а отклонения от зональности более

типичны для Австрало-Тихоокеанского региона. Меандрирование струйного течения обуславливает сравнительно высокую повторяемость ветров северо-западного и юго-западного направления – порядка 20 %, в то время как ветры восточного направления в зонах струйных течений наблюдались менее чем в 1 % случаев. Кстати, усиление меандрирования или «волнистости» («waveness») СТ в последние десятилетия было отмечено в работе [10].

Однако в реальности, в конкретный срок, отклонения от преобладающего направления могут быть существенными (рис. 6). Так, например, над Южной Америкой 1 января 2025 г. хорошо видна квазиколецевая структура сильных ветров в верхней тропосфере с последовательной сменой направлений, на остальной территории – формирование крупномасштабных волн в теле струи.

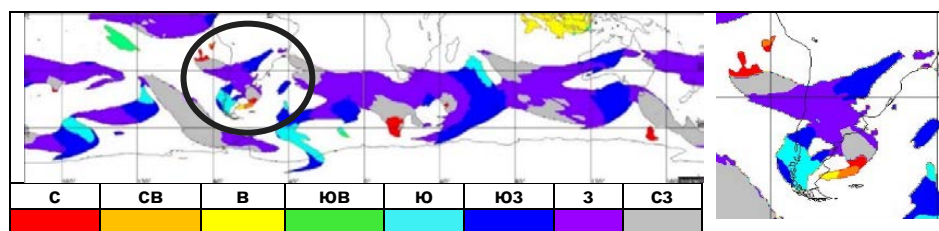


**Рис. 6.** Направление ветра в зонах СТ на высоте оси 1 января 2025 г., 12 ч ВСВ.

**Fig. 6.** Wind direction in the jet stream region at axis height on January 1, 2025, 12:00 UTC.

### *Толщина струйных течений*

Сведений о толщине СТ в современной литературе очень немного. В словаре [3] указывается, что их вертикальная протяженность составляет «несколько километров». Более конкретные цифры можно найти в монографии О.Г. Богаткина [1]. Он указал, что мощность внетропических СТ может достигать 6–10 км, а субтропических – 8–12 км. В данной работе была проведена попытка связать толщину области, где наблюдаются скорости выше 30 м/с, с высотой оси СТ, которая опосредованно может разделить СТ в умеренных и тропических широтах. Как указывалось выше, далеко не всегда вертикальный профиль ветра демонстрирует струю с единым максимумом. На рис. 7, где красной вертикалью обозначена нижняя граница скорости СТ (30 м/с), продемонстрированы два профиля с мощными струями (порядка 20 км толщиной), причём вверху – верхнетропосферная струя, а внизу – результат слияния двух тропосферных СТ и стратосферного СТ.

В табл. 3 красным шрифтом представлены средние максимумы высоты оси и толщины СТ, а желтой заливкой обозначены градации, в которых повторяемость СТ с такими параметрами превышает 5 %. По летним (январь) данным, в период существования в ЮП одной струи, заметно, что

ее толщина практически в половине случаев составляет от 2.5 до 7.5 км, при этом там, где ось более низкая (7–9 км, ближе к полярным широтам), СТ не такое мощное. Наиболее часто повторяющиеся области СТ с осью на 9–13 км могут быть как очень тонкими, так и весьма мощными – с толщиной, превышающей 15 км.

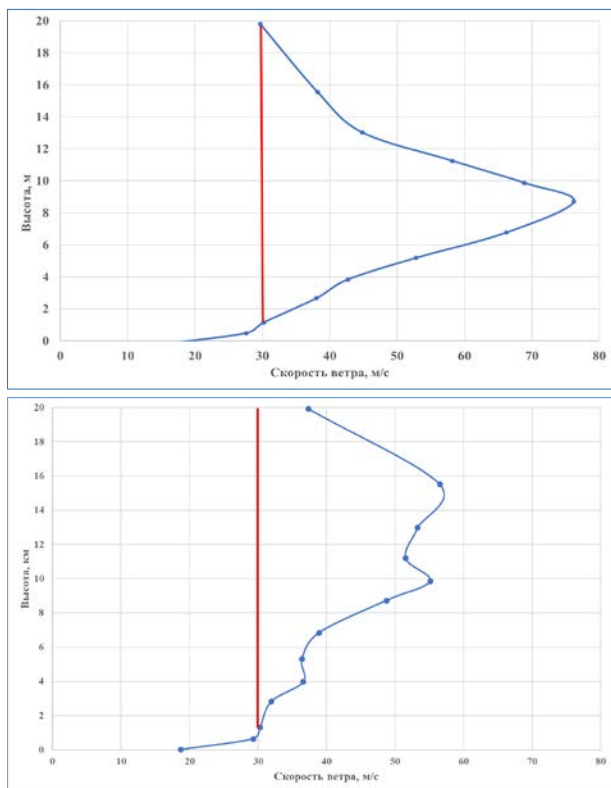


**Рис. 7.** Примеры слоев экстремальной толщины со скоростью ветра, превышающей 30 м/с, по данным ERA5: сверху – 3.04.2001, 12 ч ВСВ, 53.5° ю. ш., 10° з.д.; внизу – 1.09.2025, 00 ч ВСВ, 43.75° ю. ш., 0° д.

**Fig. 7.** Layers of extreme thickness with wind speeds exceeding 30 m/s, based on ERA5 data: April 3, 2001, 12:00 UTC, 53.5° S, 10° W (top); September 1, 2025, 00:00 UTC, 43.75° S, 0° E (bottom).

Осенью (в апреле) при расщеплении СТ увеличивается повторяемость струй с более высокими осями, характерными для субтропиков. Однако в среднем максимум повторяемости приходится на те же градации, что и летом.

В зимний период ЮП (июль), когда сформировалось субтропическое СТ, распространившееся к экватору, более половины случаев приходится на градацию высоты оси 11–13 км. Эта высокая субтропическая струя становится более мощной, чем СТ умеренных широт (максимум повторяемости значений толщины смещается на градацию 7.5–10 км).

**Таблица 3.** Повторяемость толщины СТ в зависимости от высоты его оси в центральные месяцы сезонов в полосе 20–80° ю. ш.**Table 3.** Frequency of the jet stream thickness as a function of the height of its axis during the central months of the seasons in the 20–80° S latitude band

| Толщина СТ, км | Высота оси струйного течения, км |      |       |       |       |       |       |        |
|----------------|----------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                | 3-5                              | 5-7  | 7-9   | 9-11  | 11-13 | 13-15 | 15-17 | Всего  |
| Январь         |                                  |      |       |       |       |       |       |        |
| 0-1            | 0.01                             | 0.06 | 0.50  | 0.71  | 0.71  | 0.39  | 0.00  | 2.37   |
| 1-2.5          | 0.03                             | 0.27 | 3.09  | 3.74  | 4.87  | 2.41  | 0.00  | 14.42  |
| 2.5-5          | 0.03                             | 0.30 | 5.10  | 6.85  | 9.38  | 3.61  | 0.02  | 25.28  |
| 5-7.5          | 0.01                             | 0.20 | 4.02  | 7.89  | 7.52  | 2.07  | 0.02  | 21.73  |
| 7.5-10         | 0.01                             | 0.14 | 3.32  | 7.81  | 5.14  | 0.96  | 0.01  | 17.40  |
| 10-12.5        | 0.01                             | 0.10 | 2.19  | 6.52  | 3.45  | 0.46  | 0.00  | 12.74  |
| 12.5-15        | 0.01                             | 0.04 | 0.75  | 2.85  | 1.69  | 0.17  | 0.00  | 5.51   |
| >15            | 0.00                             | 0.00 | 0.07  | 0.26  | 0.19  | 0.01  | 0.00  | 0.54   |
| Всего          | 0.12                             | 1.11 | 19.04 | 36.64 | 32.95 | 10.10 | 0.04  | 100.00 |
| Апрель         |                                  |      |       |       |       |       |       |        |
| 0-1            | 0.02                             | 0.09 | 0.39  | 0.66  | 0.56  | 0.32  | 0.00  | 2.03   |
| 1-2.5          | 0.06                             | 0.50 | 2.64  | 3.33  | 4.11  | 2.10  | 0.00  | 12.74  |
| 2.5-5          | 0.06                             | 0.70 | 4.89  | 5.89  | 9.25  | 3.50  | 0.02  | 24.30  |
| 5-7.5          | 0.03                             | 0.47 | 4.08  | 6.66  | 8.49  | 2.41  | 0.06  | 22.19  |
| 7.5-10         | 0.02                             | 0.28 | 3.36  | 6.29  | 5.41  | 1.23  | 0.09  | 16.67  |
| 10-12.5        | 0.01                             | 0.19 | 2.46  | 5.34  | 2.88  | 0.43  | 0.03  | 11.35  |
| 12.5-15        | 0.01                             | 0.11 | 1.70  | 3.47  | 1.45  | 0.14  | 0.01  | 6.89   |
| >15            | 0.01                             | 0.10 | 1.19  | 1.91  | 0.58  | 0.04  | 0.00  | 3.83   |
| Всего          | 0.21                             | 2.44 | 20.71 | 33.54 | 32.74 | 10.17 | 0.20  | 100.00 |
| Июль           |                                  |      |       |       |       |       |       |        |
| 0-1            | 0.00                             | 0.00 | 0.02  | 0.39  | 0.47  | 0.29  | 0.00  | 1.18   |
| 1-2.5          | 0.00                             | 0.03 | 0.23  | 1.88  | 4.03  | 2.06  | 0.00  | 8.22   |
| 2.5-5          | 0.00                             | 0.02 | 0.31  | 3.48  | 11.55 | 3.73  | 0.03  | 19.13  |
| 5-7.5          | 0.00                             | 0.01 | 0.36  | 7.14  | 16.07 | 3.48  | 0.04  | 27.12  |
| 7.5-10         | 0.00                             | 0.02 | 0.63  | 8.91  | 15.39 | 2.81  | 0.02  | 27.77  |
| 10-12.5        | 0.00                             | 0.02 | 0.38  | 4.75  | 7.65  | 1.19  | 0.01  | 13.99  |
| 12.5-15        | 0.00                             | 0.00 | 0.08  | 0.83  | 1.42  | 0.19  | 0.00  | 2.51   |
| >15            | 0.00                             | 0.00 | 0.00  | 0.02  | 0.05  | 0.01  | 0.00  | 0.08   |
| Всего          | 0.01                             | 0.11 | 2.01  | 27.39 | 56.63 | 13.75 | 0.10  | 100.00 |
| Октябрь        |                                  |      |       |       |       |       |       |        |
| 0-1            | 0.02                             | 0.06 | 0.24  | 0.60  | 0.38  | 0.17  | 0.00  | 1.46   |
| 1-2.5          | 0.05                             | 0.37 | 1.63  | 2.96  | 2.96  | 1.11  | 0.00  | 9.08   |
| 2.5-5          | 0.04                             | 0.53 | 2.72  | 4.78  | 7.19  | 1.80  | 0.02  | 17.07  |
| 5-7.5          | 0.02                             | 0.32 | 1.94  | 5.24  | 7.24  | 2.84  | 1.46  | 19.06  |
| 7.5-10         | 0.01                             | 0.17 | 1.53  | 4.46  | 4.94  | 3.48  | 4.89  | 19.49  |
| 10-12.5        | 0.01                             | 0.12 | 1.32  | 4.03  | 2.71  | 1.78  | 2.49  | 12.46  |
| 12.5-15        | 0.00                             | 0.15 | 2.36  | 4.07  | 1.70  | 1.20  | 2.02  | 11.51  |
| >15            | 0.02                             | 0.38 | 2.56  | 3.81  | 1.41  | 0.62  | 1.09  | 9.87   |
| Всего          | 0.16                             | 2.11 | 14.29 | 29.94 | 28.53 | 13.00 | 11.97 | 100.00 |

Наибольший процент самых «толстых» струй наблюдается в переходные сезоны, особенно весной (в октябре) в процессе слияния двух течений в единую струю. Анализ мощности струй по 10-градусным широтным полосам (таблица не приведена) показал, что в зимне-весенний сезон максимум повторяемости СТ толщиной более 15 км наблюдается в области 60–70° ю. ш., где достигает 12–15 % (против 7–9 % в субтропической зоне). Такой результат, вероятнее всего, обусловлен уже упомянутым выше слиянием тропосферной полярной струи с нижней частью стратосферного циркумполярного вихря.

#### *Межгодовая изменчивость характеристик струйных течений*

Был проведен поиск трендов скорости и высоты уровня максимального ветра в течение 25-летнего периода для характерных участков струи – областей максимального ветра, аппроксимированных прямоугольниками (пример на рис. 8), а также для значений, осредненных по 30-й, 45-й и 60-й параллелям.

Предыдущие исследования, связанные с изучением динамики СТ по 30-летним данным (1979–2008 гг.), показали, что скорость в областях МВ субтропического СТ в южной части Тихого океана увеличивалась примерно на 0.6 м/с за 10 лет [12]. Однако ни для одной области или для широтного круга значимых трендов скорости в ОМВ и высоты уровня максимального ветра обнаружено не было. Пример поиска трендов для нижнего прямоугольника на карте, относящейся к зимнему сезону ЮП, изображен на рис. 8. Коэффициент детерминации  $R^2$  для обеих характеристик значительно ниже 0.5, что подтверждает отсутствие значимого тренда.

#### *Информация о струйных течениях в периоды летней и зимней навигации*

Период летней навигации рассчитывается каждый год с последнего воскресенья марта до субботы перед последним воскресеньем октября. Следует отметить, что, хотя календарные сезоны в Южном полушарии противоположны сезонам в Северном, международные правила смены навигационного расписания едины для всего мира.

Принимая во внимание изменчивость климата, а также тот факт, что авиационные климатические описания ограничиваются 5–10-летним периодом, было принято решение рассчитать характеристики СТ на эшелонах полета для периодов летней и зимней навигации по данным о ветре, осредненным за 10 последних лет, с 2016 по 2025 год. (табл. 4).

Расчеты производились для каждого эшелона полетов (Flight Level, FL), высота которого измеряется в гектофутах, в слое SigWX (FL100 – FL600).

На рис. 9 представлены области СТ только для эшелонов, кратных 60 гектофутам. Установлено, что СТ в летнюю навигацию (холодный период ЮП) появляются на высоте эшелона FL170 и прослеживаются до самого

верхнего эшелона, относящегося к слою «*significant weather*» – FL600. Максимальные скорости в тропосферных СТ, превышающие 45 м/с, достигают наибольшей протяженности на эшелонах FL360 – FL400 и прослеживаются в виде узкой полосы вдоль 30° ю. ш. примерно от 100° в. д. до 160° з. д. Выше, в стратосфере, подобные максимумы в поле скорости ветра появляются уже на эшелонах FL560 – FL600 в виде более коротких полос с осью вдоль 55° ю. ш. и центром вблизи 40° в. д.

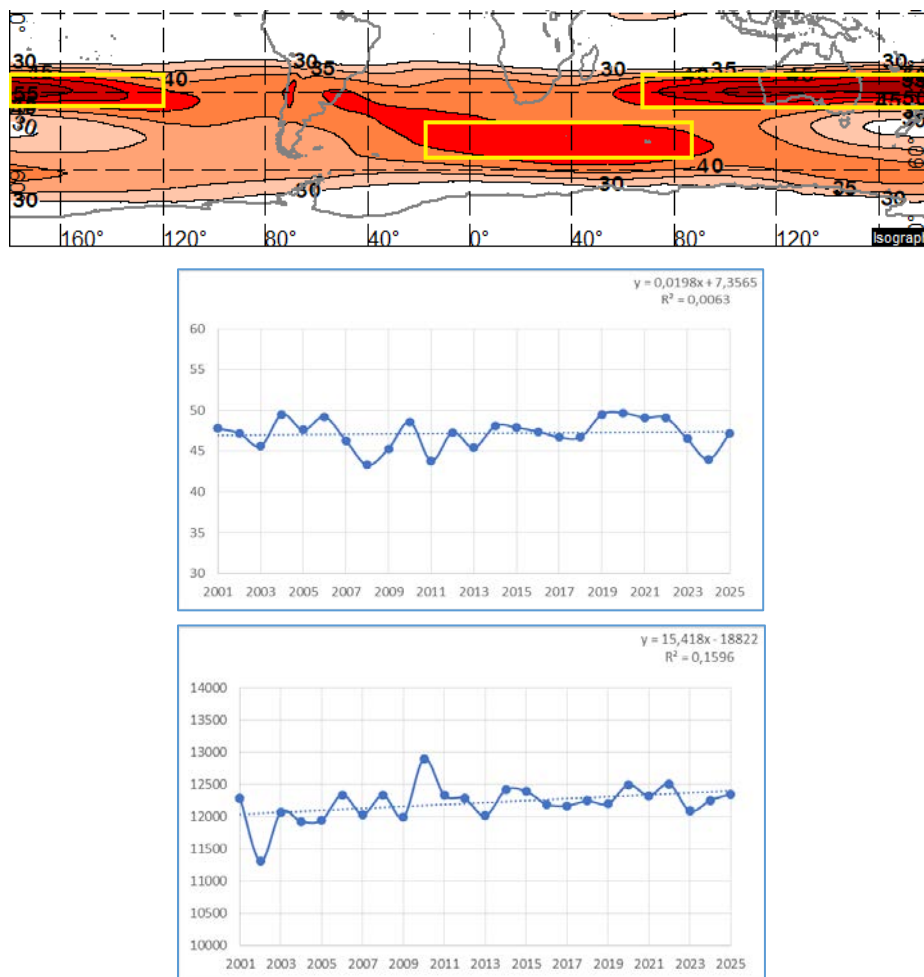


**Рис. 8.** Поле скорости ветра в зоне СТ в зимний период Южного полушария, где ОМВ аппроксимированы прямоугольниками (вверху). Расчет трендов скорости и высоты уровня МВ для нижнего прямоугольника.

**Fig. 8.** Wind speed ( $\text{ms}^{-1}$ ) in the jet stream region during the Southern Hemisphere winter, with the jet cores approximated by rectangles (top). Calculation of speed and altitude trends of the maximum wind level for the lower rectangle (bottom).

**Таблица 4.** Периоды сезонной навигации в 2016–2025 гг. и количество соответствующих сроков (N) по данным ERA5**Table 4.** Seasonal navigation periods in 2016–2025 and the number of corresponding periods (N) based on ERA5 data

| Год  | Летняя навигация      | N   | Зимняя навигация           | N   |
|------|-----------------------|-----|----------------------------|-----|
| 2016 | 27 марта – 29 октября | 868 | 30 октября – 25 марта 2017 | 588 |
| 2017 | 26 марта – 28 октября | 868 | 29 октября – 24 марта 2018 | 588 |
| 2018 | 25 марта – 27 октября | 868 | 28 октября – 30 марта 2019 | 616 |
| 2019 | 31 марта – 26 октября | 840 | 27 октября – 28 марта 2020 | 616 |
| 2020 | 29 марта – 24 октября | 840 | 25 октября – 27 марта 2021 | 616 |
| 2021 | 28 марта – 30 октября | 868 | 31 октября – 26 марта 2022 | 588 |
| 2022 | 27 марта – 29 октября | 868 | 30 октября – 25 марта 2023 | 588 |
| 2023 | 26 марта – 28 октября | 868 | 29 октября – 30 марта 2024 | 616 |
| 2024 | 31 марта – 26 октября | 840 | 27 октября – 29 марта 2025 | 616 |
| 2025 | 30 марта – 25 октября | 840 | 26 октября – 28 марта 2026 | 616 |

В зимнюю навигацию (теплый период ЮП) СТ прослеживаются в более ограниченном слое, на эшелоне FL500 их влияние уже незаметно. Наиболее интенсивные СТ отмечаются на эшелонах FL300 – FL360. Здесь значения скорости в центральном ядре, вытянутом вдоль 45° ю. ш. примерно от 10° з. д. до 110° в. д., достигают 40 м/с. Следует отметить стабильность положения этого центрального ядра. Эта область максимального ветра, хотя и в ослабленном виде, сохраняется во всей толще тропосферы, сокращаясь по площади вверх до 15 км и вниз – примерно до 5 км.

### Заключение

По данным реанализа ERA5 за период 2001–2025 гг. были рассчитаны средние характеристики максимального ветра в зонах СТ ЮП – скорость, высота уровня, направление. В статье представлены результаты расчетов для центральных месяцев каждого сезона.

Установлено, что в среднем СТ занимают примерно 38.6 % от площади полушария; при этом в тропосфере существуют области, где в отдельные месяцы (кроме января и февраля) в течение 25 лет ни разу не были зафиксированы скорости ветра, превышающие 30 м/с. Площадь таких областей невелика и составляет примерно 3.0–5.5 % от площади ЮП. В то же время зимой ЮП над прибрежными морями Восточной Антарктиды и над Австралией повторяемость СТ превышает 90 %.

Максимальные скорости ветра в СТ, осредненные за 25-летний период, превышают 45 м/с в летний сезон в южной части Индийского океана, в зимний период в сформировавшемся субтропическом СТ они достигают 60 м/с над территорией австралийского материка.

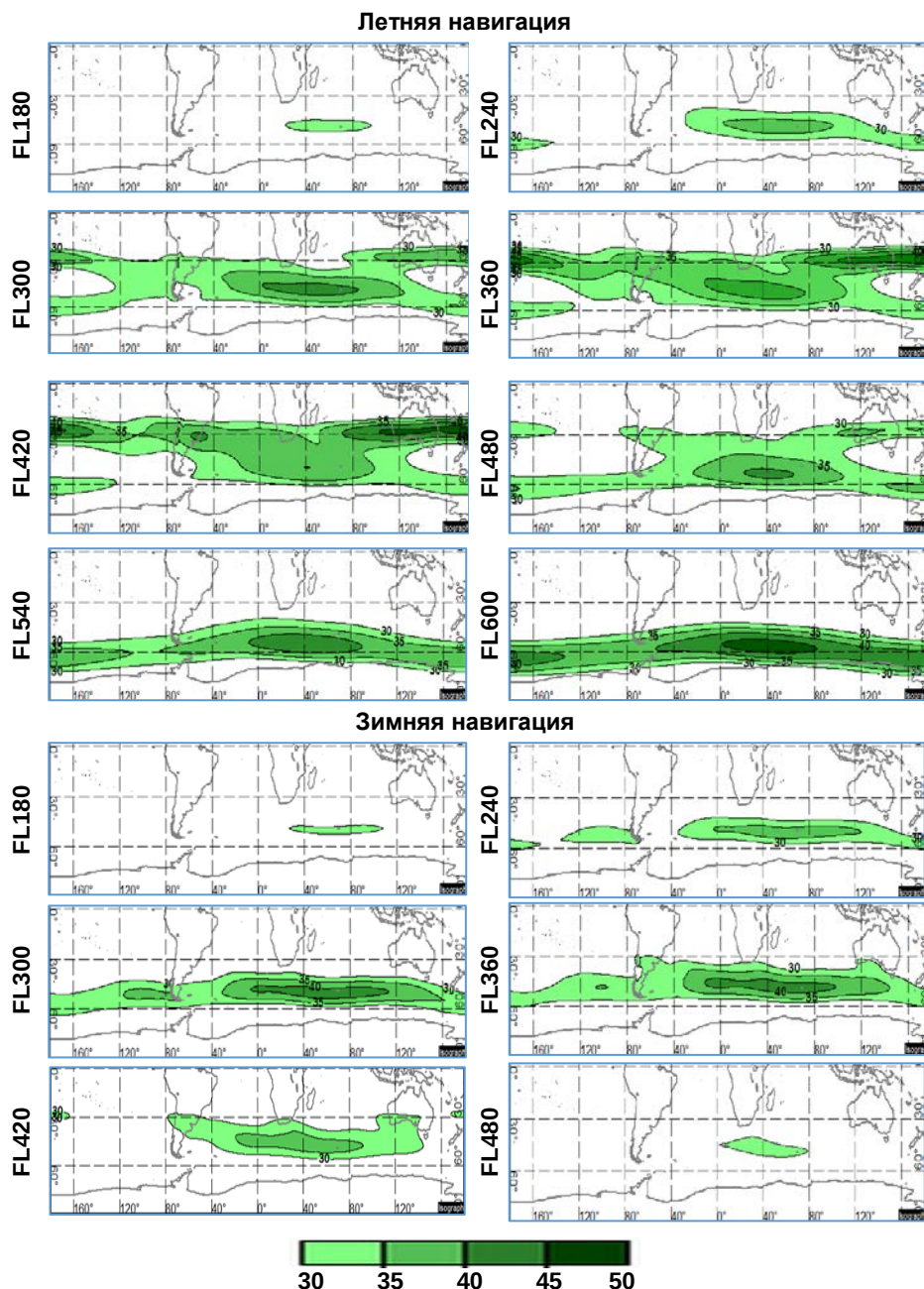


**Рис. 9.** Карты струйных течений (скорость ветра в м/с) на эшелонах полета для периодов летней и зимней навигации (холодный и теплый периоды в ЮП соответственно).

**Fig. 9.** Jet stream maps (maximum wind speed in m/s) at flight levels for summer and winter air navigation periods (cold and warm periods in the Southern Hemisphere, respectively).

Высота оси СТ в летний период соответствует классическим канонам, уменьшаясь от тропической к полярной периферии с 12–14 до 8–9 км, в то время как зимой ЮП осевая плоскость струи в южной части испытывает подъём до высот 13–14 км.

Впервые была получена информация о значениях толщины СТ Южного полушария. Выяснено, что самые мощные слои (>15 км) со скоростями ветра, превышающими 30 м/с, чаще всего наблюдаются в зоне субтропического СТ, а также вблизи антарктического побережья, где происходит слияние полярного СТ с нижней частью стратосферного циркумполярного вихря.

Исследование временной изменчивости скорости ветра и высоты оси СТ в ОМВ и в среднем для широтных кругов не обнаружило сколь-нибудь значимых трендов этих характеристик на протяжении 25-летнего периода.

Получены карты струйных течений Южного полушария на эшелонах полетов для периодов зимней и летней навигации за 2016–2025 гг. Установлено, что СТ ЮП могут оказывать влияние на полеты воздушных судов в зимнюю навигацию в слое FL170 – FL490, в летнюю – в слое FL170 – FL600.

#### Список литературы

1. Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. СПб.: Изд-во РГГМУ. 2009. 339 с.
2. Иванова А.Р. Методика расчета карты максимального ветра // Метеорология и гидрология. 1989. № 4. С. 59–64.
3. Хромов С.П., Мамонтова Л.И. Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
4. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: ТРИАДА ЛТД, 2016. 312 с.
5. 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>
6. 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>
7. Fredericksen J.S., Fredericksen C.S. Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes // Tellus A. 2007. Vol. 59, no. 5. P. 559–617. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00264.x
8. 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
9. Manney G., Hegglin M., Daffer W., Schwartz M., Santee M., Pawson S. Climatology of Upper Tropospheric–Lower Stratospheric (UTLS) Jets and Tropopause in MERRA // J. Climate. 2014. Vol. 27. P. 3248–3271. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00243
10. 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>
11. 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. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1828:SVITSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1828:SVITSH>2.0.CO;2)

12. 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. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0763.1>

13. 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>

### References

1. Bogatkin O.G. Osnovy aviacionnoj meteorologii. Sankt-Peterburg, RGGMU publ., 2009, 339 p. [in Russ.].

2. Ivanova A.R. Metodika rascheta karty maksimal'nogo vetra. *Meteorologija i gidrologija*, 1989, no. 4, pp. 59-64 [in Russ.].

3. Hromov S.P., Mamontova L.I. Meteorologicheskij slovar'. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1974, 568 p. [in Russ.].

4. Shakina N.P., Ivanova A.R. Prognozirovanie meteorologicheskikh uslovij dlja aviicii. Moscow, TRIADA LTD publ., 2016, 312 p. [in Russ.].

5. 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>

6. 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>

7. Fredericksen J.S., Fredericksen C.S. Interdecadal changes in southern hemisphere winter storm track modes. *Tellus A*, 2007, vol. 59, no. 5, pp. 559-617. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00264.x

8. 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

9. Manney G., Hegglin M., Daffer W., Schwartz M., Santee M., Pawson S. Climatology of Upper Tropospheric–Lower Stratospheric (UTLS) Jets and Tropopauses in MERRA. *J. Climate*, 2014, vol. 27, pp. 3248-3271. DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00243

10. 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>

11. Nakamura H., Shimo 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. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<1828:SVITSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1828:SVITSH>2.0.CO;2)

12. 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. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0763.1>

13. 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>

Поступила 03.09.2026; принята в печать 22.09.2026.  
Submitted 03.09.2026; accepted for publication 22.09.2026.