

ЭВОЛЮЦИЯ СТРАТОСФЕРНОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ НА ПРИМЕРЕ ЗИМНИХ ПЕРИОДОВ 2022–2024 ГГ. EVOLUTION OF THE STRATOSPHERIC POLAR VORTEX AS EVIDENCED BY THE WINTERS 2022–2024

О.С. Зоркальцева

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, olgak@iszf.irk.ru*

О.Ю. Антохина

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, olgayumarchenko@gmail.com
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
Томск, Россия*

А.В. Гочаков

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
Томск, Россия, wandering@bk.ru
Сибирский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт,
Новосибирск, Россия*

М.Ф. Артамонов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artamonov.maksim@iszf.irk.ru*

O.S. Zorkaltseva

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, olgak@iszf.irk.ru*

O.Yu. Antokhina

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, olgayumarchenko@gmail.com
V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,
Tomsk, Russia*

A.V. Gochakov

*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,
Tomsk, Russia, wandering@bk.ru
Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute,
Novosibirsk, Russia*

M.F. Artamonov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artamonov.maksim@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе рассмотрены вариация площади стратосферного полярного вихря (СПВ) и температура высокоширотной стратосферы в периоды с ноября по март 2022–2023 и 2023–2024 гг. на фоне средних многолетних значений данных параметров с 1979 по 2024 г. В 2022–2023 гг. площадь СПВ существенно превысила климатические значения в январе и декабре, а уменьшение площади СПВ произошло на месяц позже климатической нормы. Это сопровождалось экстремально низкими температурами полярной стратосферы в первую половину зимы и рекордно «жарким» внезапным стратосферным потеплением (ВСП) во вторую половину зимы. В зимний период 2023–2024 гг. не отмечалось экстремальных значений СПВ и температуры, однако наблюдалось четыре ВСП, три из которых были главными (major). В работе рассматриваются площади СПВ, температуры стратосферы, активность планетарных волн, а также обсуждаются причины различий двух зимних сезонов в контексте волновой активности.

Ключевые слова: площадь стратосферного полярного вихря, внезапные стратосферные потепления, планетарные волны, поток волновой активности.

Abstract. The paper examines the variation in the stratospheric polar vortex (SPV) area and the high-latitude stratosphere temperature from November to March for the winter periods 2022–2023 and 2023–2024 against the background of average long-term values of these parameters from 1979 to 2024. In 2022–2023, the SPV area significantly exceeded the climatic values in January and December, and a decrease in the SPV area occurred a month later than the climatic norm. This was accompanied by extremely low temperatures in the polar stratosphere in the first half of winter and a record-breaking “hot” sudden stratospheric warming (SSW) in the second half of winter. In the winter period 2023–2024, no extreme SPV and temperature values were observed, but four SSW episodes were recorded during the winter period, three of which were major. We analyze SPV areas, temperatures in the stratosphere, activity of planetary waves, and discuss the reasons for the differences between the two winter seasons in terms of wave activity.

Keywords: stratospheric polar vortex area, sudden stratospheric warmings, planetary waves, wave activity flux.

ВВЕДЕНИЕ

С окончанием летнего сезона в Северном полушарии происходит формирование стратосферного полярного вихря (СПВ), площадь которого увеличивается, а температура стратосферы падает по мере сокращения поступления солнечной радиации в высокие широты. Стратосферный полярный вихрь пред-

ставляет собой циклоническую структуру, окруженную мощными западными ветрами, которая способствует изоляции холодных воздушных масс в полярной области. Весной, с увеличением поступления солнечной радиации, СПВ ослабевает, его площадь сокращается, температура стратосферы повышается и циркуляция изменяет направление на восточное.

Внутрисезонная изменчивость СПВ характеризуется чередованием сильных и слабых состояний вихря. Сильное состояние связано с увеличением площади вихря и снижением температуры вовлеченных в него воздушных масс, сопровождающихся усилением западного потока. В слабом состоянии наблюдаются сокращение площади вихря и повышение температуры в высоких широтах [Baldwin et al., 2021; Limpasuvan et al., 2005]. Эти состояния зависят от взаимодействия СПВ с планетарными волнами, возникающими в тропосфере под влиянием орографии и температурных контрастов между сушей и океаном [Andrews et al., 1987]. Взаимодействие волн с зональным потоком способствует формированию стратосферных антициклонов, таких как Алеутский и Европейский. Эти антициклоны играют ключевую роль в динамике СПВ, поскольку способны создавать условия для адвекции воздушных масс с высокой завихренностью из области СПВ в тропики посредством так называемых обрушений волн Россби в стратосфере [McIntyre, Palmer, 1983; Антохина и др., 2024]. Усиление антициклонов приводит к деформации и уменьшению СПВ и развитию условий для внезапных стратосферных потеплений (ВСП).

Внезапные стратосферные потепления — это резкие ослабления стратосферного полярного вихря, сопровождаемые сокращением его площади и увеличением температуры полярной стратосферы. Во время этих событий СПВ либо смещается от полюса, либо расщепляется на две (или более) части, что приводит к значительным изменениям в структуре циркуляции [Lawrence, Manney, 2018; Limpasuvan et al., 2005; Baldwin et al., 2021]. ВСП оказывают значительное влияние на тропосферные процессы, вызывая экстремальные погодные явления, в том числе изменения в циркуляции и экстремальные температуры на поверхности [Baldwin, Dunkerton, 2001; Hitchcock, Simpson, 2014; Kidston et al., 2015; Smith et al., 2018]. Средняя частота ВСП составляет 0.7 случая в год, и за последние десятилетия наблюдается тенденция к их более раннему началу [Зоркальцева и др., 2023].

Механизмы формирования ВСП остаются предметом научной дискуссии. Согласно гипотезе «снизу вверх» (bottom-up), ВСП инициируются усилением планетарных волн из тропосферы, что связано с атмосферными блокирующими процессами, Эль-Ниньо, колебанием Маддена—Джулиана и особенностями снежного покрова [Вяткин и др., 2024; Кандиева и др., 2019; Baldwin et al., 2021]. Гипотеза «сверху вниз» (top-down) предполагает, что ВСП могут быть вызваны внутренними процессами в стратосфере, в том числе процессами взаимодействия волн со средним потоком или нелинейными взаимодействиями по типу «волна–волна» [Диденко и др., 2019], а также квазидвухлетними колебаниями экваториального ветра [Holton, Tan, 1980].

В данной работе исследуются условия формирования ВСП путем анализа изменений площади СПВ и температуры полярной стратосферы за период с 1979 по 2024 г. Основное внимание уделено взаимосвязи между этими параметрами и событиями

ВСП, а также их долговременной изменчивости. Для зимних периодов 2022–2023 и 2023–2024 гг. проведен углубленный анализ динамики СПВ, включая условия, предшествующие ВСП, и их последствия. Целью работы является выявление закономерностей взаимодействия СПВ с тропосферными аномалиями и определение факторов, влияющих на изменчивость характеристик вихря в контексте событий ВСП.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Анализ и расчеты были выполнены по данным климатического архива ECMWF ERA5 на сетке $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ [Hersbach et al., 2020]. Анализировались изменения средней зональной температуры воздуха вдоль 80° N (T) и скорости среднего зонального ветра вдоль 60° N (U), которые использовались в качестве критерия для идентификации ВСП. Архив вариаций U и T для каждого зимнего сезона с 1979 по 2024 г. доступен по ссылке [<https://disk.yandex.ru/d/lkG02E1Qb-Uq1g>].

Методы оценки площади СПВ можно разделить на три основные группы, в зависимости от подходов к определению границ СПВ:

1. Методы, использующие изолинии геопотенциала на уровнях давления (например, 10 гПа) или широту максимальной зональной скорости ветра. Эти методы вычислительно просты, но могут чрезмерно упростить границу при деформации вихря [Schoeberl, Hartmann, 1991].

2. Методы объективной идентификации, включая градиентные методы и алгоритмы кластеризации, позволяют точно определять границы. Эти методы особенно эффективны для нерегулярных форм вихрей, однако сложны с вычислительной точки зрения [Cámara et al., 2017; Bushra, Rohli, 2019; Kuchar et al., 2024].

3. Метод, использующий контур потенциальной завихренности (ПЗ) на изэнтропической (равных значений потенциальной температуры) поверхности 850 К. Этот метод, как и методы 1-го типа, прост, но при этом фиксирует динамическую структуру вихря [Hoskins et al., 1985; Nash et al., 1996]. Предполагая, что максимальные значения градиента потенциальной завихренности сосредоточены на кромке вихря и пренебрегая эффектами трения и диабатики, мы приходим к простой модели эволюции ПЗ как консервативной величины. Поскольку эволюция таких величин полностью определяется эволюцией их контуров, которые разделяют различные значения, использование ПЗ для определения границ вихря и последующего вычисления его площади является физически обоснованным.

На рис. 1 приведены распределения ПЗ на уровне 850 К (~32 км). Отчетливо выделяются области тропической стратосферы в диапазоне 0–200 единиц потенциальной завихренности (епз), области СПВ в диапазоне 450–700 епз (и выше), а также области перемешивания, формирующие так называемую зону прибоя. Ежедневные распределения ПЗ в средней стратосфере с ноября по март за 1979–2024 гг. представлены по ссылке [<https://bit.ly/4fYrC3u>].

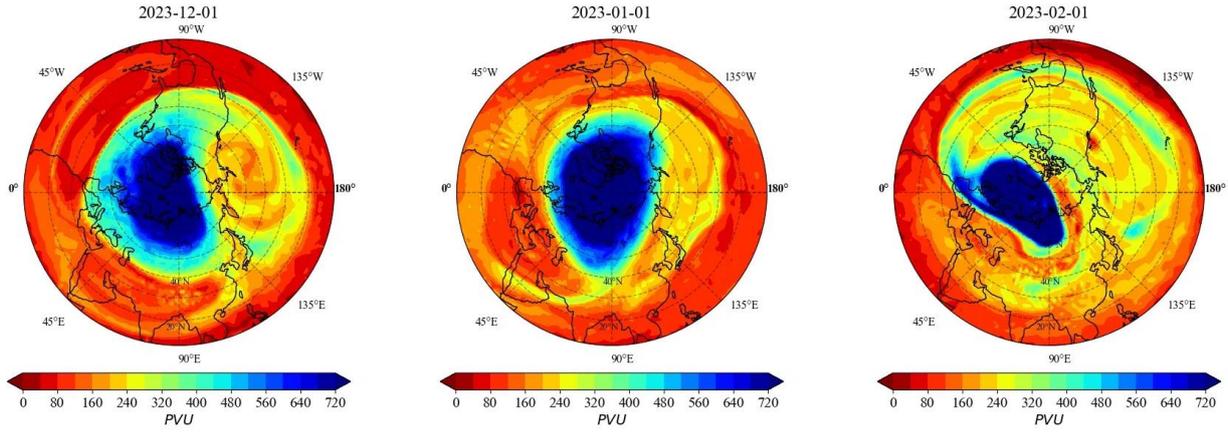


Рис. 1. Распределения значений ПЗ 1 декабря, 1 января и 1 февраля 2022–2023 гг.

Для определения контура полярного вихря по полям потенциальной завихренности на уровне 850 К потребовалось выполнить преобразование системы координат в равноугловую азимутальную проекцию Ламберта с центральной точкой (90° N, 0° E) для минимизации погрешности определения геометрических свойств искомым объектов. Отдельно для уровней 450 и 500 епз были построены полигоны для каждого замкнутого контура вихря. Таким образом, для каждого уровня получен набор контуров полярного вихря, которых может быть более одного при расщеплении СПВ. Общая площадь определяется как сумма площадей всех контуров для выбранного уровня епз и даты.

Для оценки стратосферной динамики и деформации СПВ были рассчитаны также амплитуды планетарных волн с зональными волновыми числами 1 (ПВ1) и 2 (ПВ2).

Влияние тропосферных условий на динамику СПВ оценивалось с помощью анализа трехмерного вектора волновой активности (ВА) — так называемого вектора Пламба [Plumb, 1985]. Для расчета компонент вектора ВА Пламба F_s использовались следующие соотношения:

$$F_s = p \cos \phi \begin{pmatrix} \frac{1}{2a^2 \cos^2 \phi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] \\ \frac{1}{2a^2 \cos \phi} \left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \phi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \phi} \right) \\ \frac{2\Omega^2 \sin^2 \phi}{N^2 a \cos \phi} \left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial z} \right) \end{pmatrix},$$

где $p = \frac{p_{lev}}{1000_{\text{мбар}}}$ — приведенное давление; ψ' —

малые возмущения функции тока; ϕ — широта; λ —

долгота; $z = -H \log \frac{p_{lev}}{1000}$ — высота; a — радиус

Земли; Ω — угловая скорость вращения Земли; N — частота Брента—Вяйсяля. При расчетах в качестве исходных использовались климатологические данные геопотенциала и температуры (для расчета N) из базы данных ECMWF ERA5 с разрешением

$2.5^\circ \times 2.5^\circ \times 19$ уровней p_{lev} . Для каждого узла сетки проводился расчет $\psi' = \frac{(Z - \langle Z_\lambda \rangle)g}{f}$, где Z — геопотенциал; $\langle Z_\lambda \rangle$ — геопотенциал, усредненный по долготам; g — ускорение свободного падения; $f = 2\Omega \sin \phi$ — параметр Кориолиса.

На основе полученных данных мы оценили количественно связь площади СПВ и температуры полярной стратосферы, а также динамику СПВ за два зимних сезона.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Площадь СПВ

Как было отмечено выше, визуально СПВ соответствуют контуры ПЗ в диапазоне от 450 до 700 епз. Необходимо было выбрать контур в качестве границы СПВ. Видно (табл. 1), что в годовом ходе вариации площадей 450 и 500 епз происходят синхронно, с максимумом в декабре и минимумом в марте. В среднем площадь СПВ оказалась больше по контуру 450 епз, чем по 500 епз, на 5 млн км². Мы использовали контур 500 епз, поскольку качественный анализ распределений ПЗ с 1979 по 2024 г. показал, что контур 450 епз нередко вовлекается в «зону прибора», формируя «хвост» вихря [McIntyre, Palmer, 1983], т. е. является внешней кромкой СПВ, участвующей в массообмене с низкими широтами.

Таблица 1

Значения площади СПВ с ноября по март, а также среднее за весь период, внутри изолиний 500 и 450 епз

Площадь СПВ, 10 ⁶ км ²		
Период	500 епз	450 епз
март	15.9	20.9
февраль	21.9	26.1
январь	30.6	34.5
декабрь	36.0	41.5
ноябрь	30.6	36.5
среднее	27.0	31.9

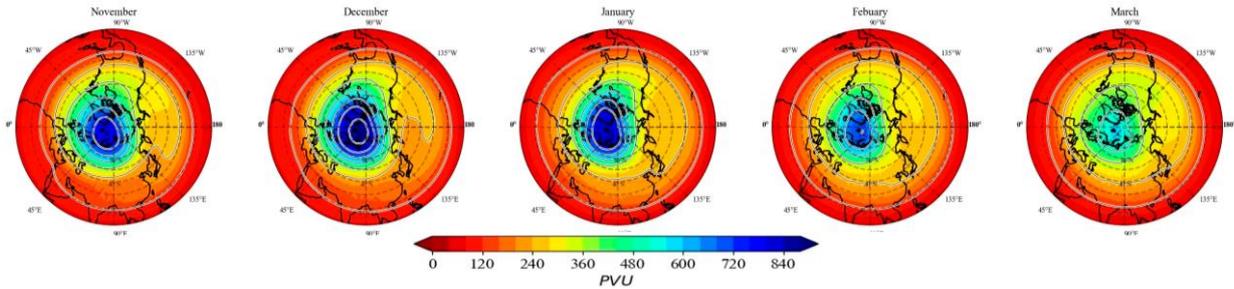


Рис. 2. Средние многолетние значения потенциальной завихренности на уровне 850 К с ноября по март

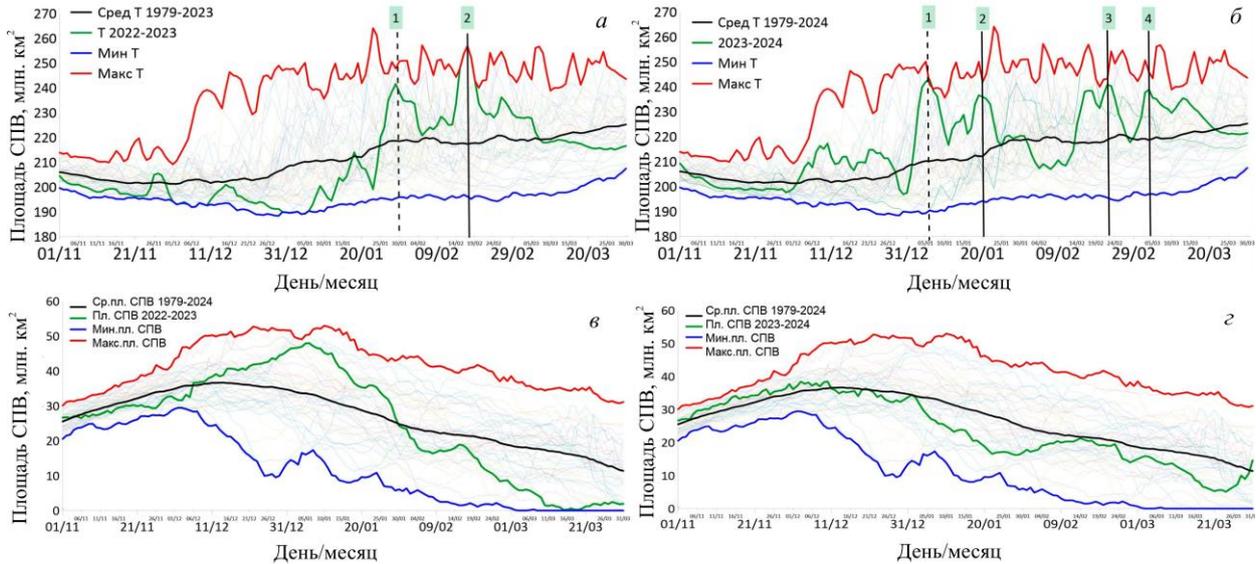


Рис. 3. Вариации температуры полярной стратосферы (а, б) и площади СПВ (в, г) с ноября по март 2022–2023 гг. (а, в) и 2023–2024 гг. (б, г); вертикальными линиями отмечены дни максимума температуры для незначительных (штрихи) и главных (сплошная) ВСП. Красной линией показаны максимальные значения, черной — средние за период с 1979 по 2024 г. Зелеными линиями показаны средние значения за зиму 2022–2023 гг. (слева) и 2023–2024 гг. (справа)

На рис. 2 показаны карты усредненных за 1979–2024 гг. значений ПЗ в зимний период. Положение стратосферного полярного вихря отмечено голубой и синей заливкой, соответствующей значениям выше 500 епз.

Видно, что к ноябрю СПВ уже сформирован, максимальные значения ПЗ в полярной стратосфере наблюдаются в декабре, заметно также увеличение площади СПВ. В январе–феврале площадь СПВ сокращается, что связано с высокой повторяемостью ВСП в эти месяцы. В марте нередки случаи финальных ВСП, к тому же в этом месяце начинается постепенная перестройка циркуляции, в связи с чем в полярной области существенно уменьшается ПЗ и сокращается площадь СПВ (см. рис. 2, табл. 1).

2.2. ВСП

Внезапные стратосферные потепления вносят существенный вклад в динамику СПВ, что выражается в сокращении средней площади вихря в январе относительно декабря. С целью более детального анализа влияния ВСП на СПВ мы рассмотрели зимние периоды 2022–2023 гг. (рис. 3, а, в) и 2023–2024 гг. (см. рис. 3, б, г), для которых заметна существенная

разница во времени начала и интенсивности ВСП и в динамике площади СПВ. Первая половина зимнего сезона 2022–2023 гг. характеризовалась аномально холодной стратосферой. Дважды, в ноябре и декабре, были зафиксированы абсолютные температурные минимумы, между которыми наблюдался незначительный подъем температуры. В эти месяцы площадь СПВ превышала климатическую норму, что указывает на его усиленное состояние. Лишь в начале января 2023 г. началось постепенное сокращение площади вихря, завершившееся незначительным (minor) ВСП в конце месяца. Однако в следующем месяце произошло главное ВСП с максимальной февральской температурой за весь исследуемый период.

В зимний сезон 2023–2024 гг. не наблюдалось экстремальных вариаций параметров стратосферы. Колебания температуры начали проявляться в конце ноября, а декабрь оказался теплее климатической нормы. Площадь СПВ начала сокращаться уже в декабре. Особенностью зимы 2023–2024 гг. стало большое количество внезапных стратосферных потеплений.

Было зарегистрировано четыре ВСП, из которых три сопровождалось реверсом зонального ветра

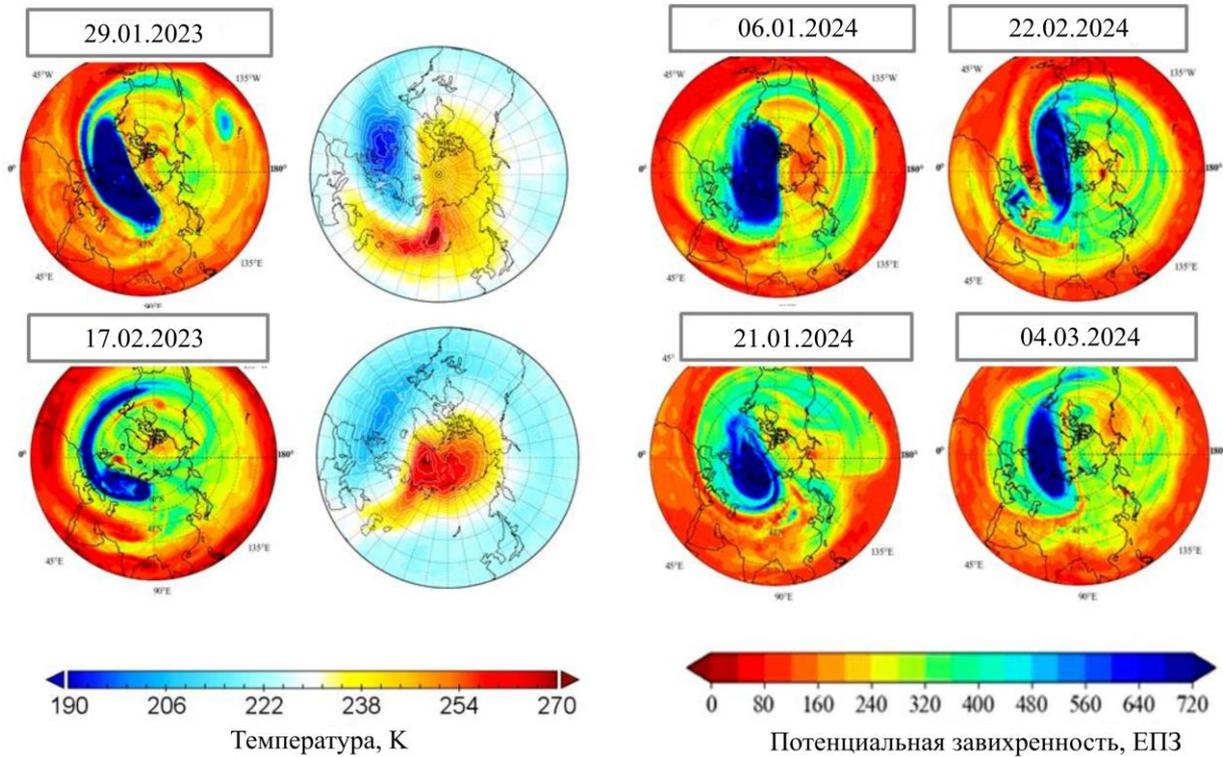


Рис. 4. Распределения потенциальной завихренности на поверхности 850 К и температуры на поверхности 10 гПа в день максимумов ВСП

в средних широтах и, соответственно, классифицировались как главные (major), хотя в двух из них реверс ветра был минимальным (1–2 м/с) и длился всего несколько дней.

Несмотря на четыре ВСП, амплитуды изменения таких ключевых параметров, как температура и площадь СПВ, оставались в пределах климатической нормы. Это контрастирует с зимой 2022–2023 гг., которая началась с экстремально низких температур и значительного увеличения площади СПВ, а завершилась рекордным потеплением и уменьшением площади вихря относительно климатической нормы. Различия в динамике параметров СПВ в двух зимних сезонах показывают сложность механизмов, влияющих на их изменчивость.

По типу деформации полярного вихря все ВСП зим 2022–2023 гг. и 2023–2024 гг. относятся к категории смещения вихря (рис. 4). Два ВСП 2022–2023 гг. и четыре ВСП 2023–2024 гг. демонстрировали смещение СПВ в Европу и Атлантику. Все ВСП произошли в Восточном полушарии, что соответствует наиболее часто наблюдающемуся сценарию развития ВСП.

2.3. Температура полярной стратосферы и площадь СПВ

Анализ вариаций температуры полярной стратосферы и площади СПВ за два зимних периода показал, что эти параметры находятся в обратной зависимости: при большом размере СПВ полярная стратосфера характеризуется низкими температурами, и наоборот. Такая же закономерность прослеживается

для предыдущих зимних сезонов. На рис. 5 представлены долговременные вариации аномалий площади СПВ с 1979 по 2024 г. Аномалии температуры в полярной стратосфере нанесены изолиниями, а дни начала ВСП отмечены синими ромбами. Этот подход позволяет визуализировать взаимосвязь между ключевыми параметрами СПВ и событиями ВСП, а также оценить их влияние на долговременные тенденции циркуляции в стратосфере.

Видно, что отмечаются моменты повышения температуры, которые сопровождаются уменьшением площади вихря и возникновением ВСП. Например, в конце 90-х — начале 2000-х гг. на протяжении 5–6 лет наблюдались аномально малые площади вихря и ранние ВСП. Позднее наблюдалось постепенное смещение дат ВСП на более привычное время — середину зимы. Не менее интересной особенностью является возникновение аномально больших вихрей в первой половине зимы и марте начиная с 2007 г. Этот феномен часто рассматривается в литературе как экстремальное состояние вихря [Lawrence et al., 2020; Baldwin, Dunkerton, 2001], которое было характерно в том числе для зимнего периода 2022–2023 гг.

Если рассматривать тенденции изменений СПВ и температуры, усредненные за зимние периоды, то видно, что наблюдаются понижение температуры и рост площади СПВ с 1979 по 2024 г. (рис. 6), однако по месяцам вариации температуры и СПВ не столь однородны. В основном среднюю за зимний период тенденцию обеспечивает март, именно для него характерны значительное уменьшение температуры и рост

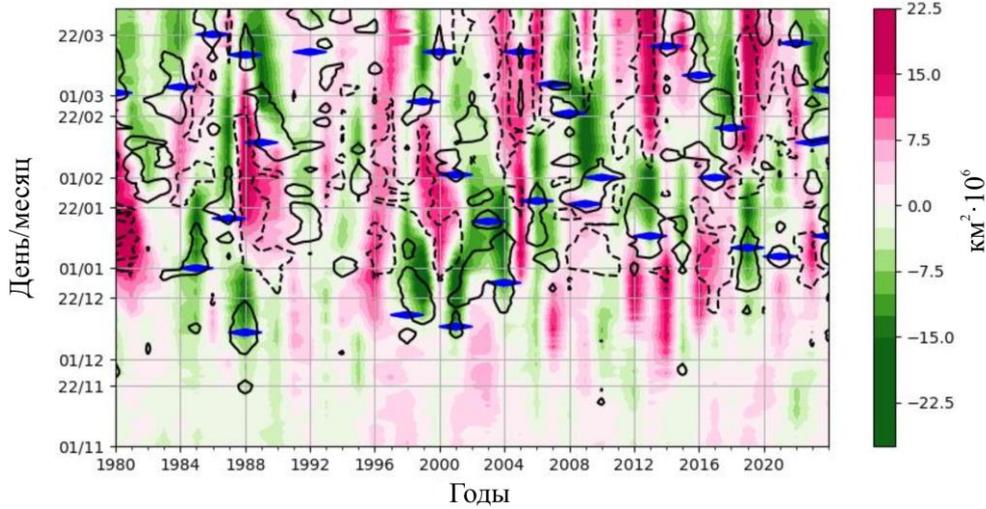


Рис. 5. Аномалии площади СПВ (заливка) и температуры на уровне 10 гПа (сплошная линия — +10 К, штрихи — -10 К); синими ромбами отмечены дни начала ВСП

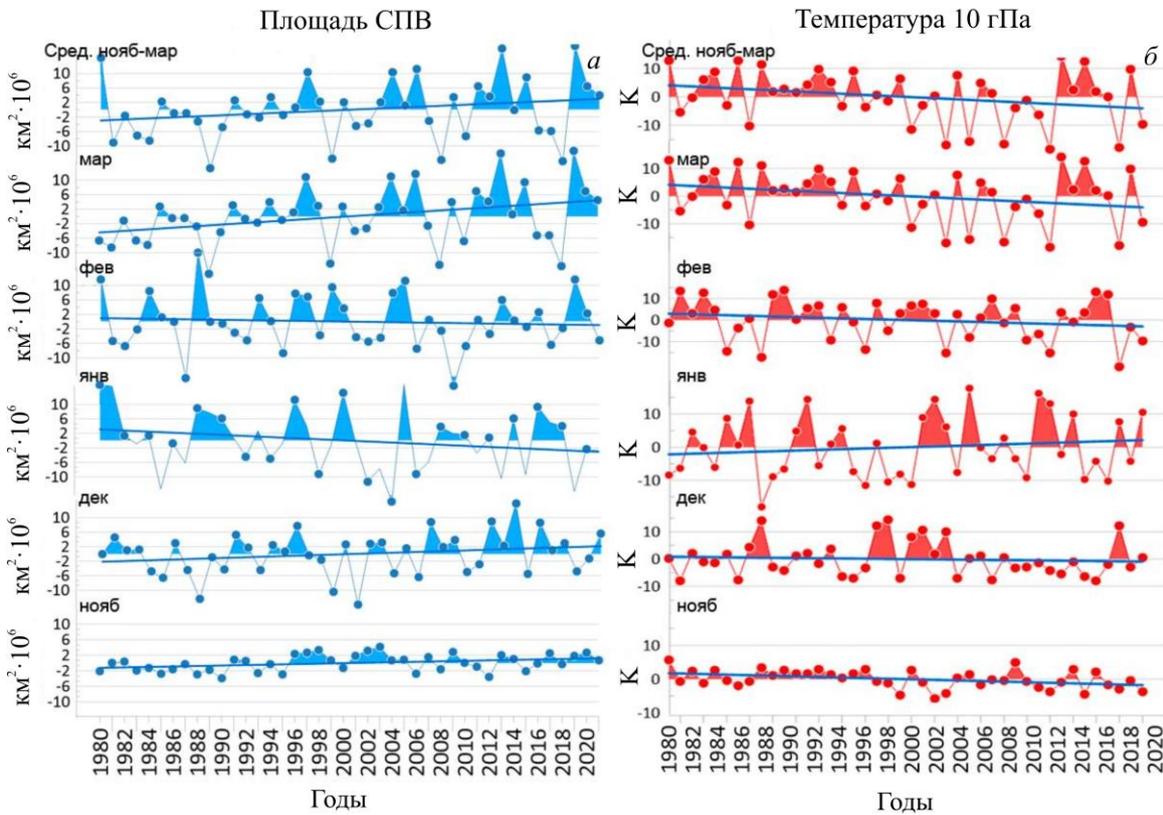


Рис. 6. Долговременные вариации аномалий площади СПВ (а) и температуры на уровне 10 гПа (б)

площади вихря. В январе наблюдается обратная тенденция — увеличение температуры на фоне уменьшения площади СПВ.

Анализируя график регрессионной зависимости средних многолетних значений площади вихря и температуры полярной стратосферы (рис. 7), нельзя не отметить перегиб в декабре. До этого момента площадь СПВ увеличивается, а температура снижается, однако после декабря площадь вихря начинает уменьшаться, а температура увеличиваться. Коэффициенты корреляции между площадью СПВ и температурой оказались высокими (табл. 2), хотя в де-

кабре и феврале они несколько ниже. В декабре это, вероятно, связано с тем самым перегибом, который в разные годы может происходить в разное время. В феврале низкий коэффициент корреляции объясняется высокой повторяемостью ВСП, которые нарушают обратную зависимость, поскольку температура изменяется значительно быстрее, чем площадь вихря (см. рис. 3).

Если рассматривать взаимосвязь площади СПВ и температуры для конкретных зим, то зависимость не настолько выраженная. Коэффициенты корреляции существенно ниже, чем в среднем за многолетний

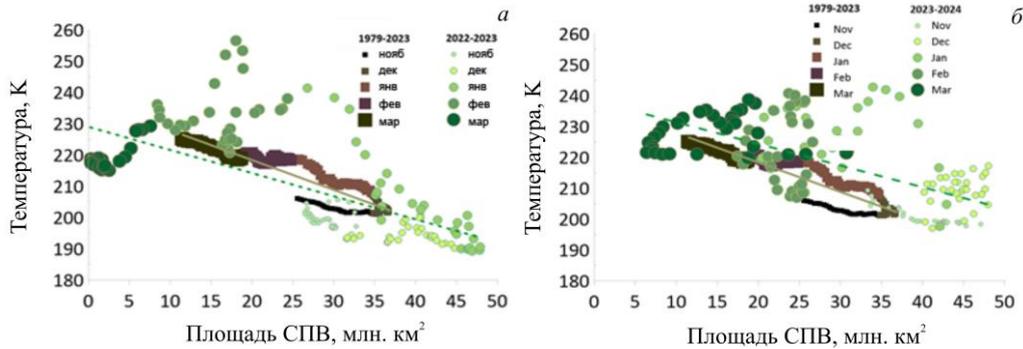


Рис. 7. Регрессионная зависимость температуры от площади СПВ: коричневая палитра — усредненные значения за 1979–2024 гг., зеленая — зимы 2022–2023 гг. (а) и 2023–2024 гг. (б)

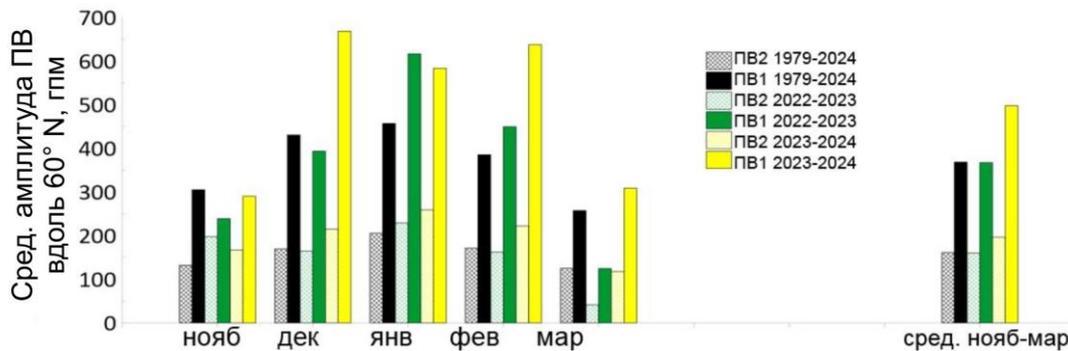


Рис. 8. Средние амплитуды ПВ1 (сплошная заливка) и ПВ2 (штриховка) в зимние периоды 2022–2023 гг. (зеленый) и 2023–2024 гг. (желтый), а также с 1979 по 2024 г. (черный и серый)

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между температурой полярной стратосферы и площадью СПВ

Период	Коэффициент корреляции		
	1979–2024	2022–2023	2023–2024
март	-0.98	0.82	
февраль	-0.30	0.15	
январь	-0.95	-0.93	0.1
декабрь	-0.62	-0.10	0.1
ноябрь	-0.94	0.10	0.0
среднее	-0.91	-0.68	-0.6

период. Сравнив две зимы, можно заметить, что переход от режима «увеличение площади — уменьшение температуры» к режиму «уменьшение площади — увеличение температуры» в 2022–2023 гг. произошел не в декабре, как это обычно бывает, а на месяц позже. В 2023–2024 гг. из-за многочисленных ВСП регрессия выглядит более хаотичной, однако переход на режим «уменьшение площади — увеличение температуры» все же произошел в декабре.

2.4. Планетарные волны

Различия в поведении СПВ и температуры стратосферы в двух зимних сезонах можно объяснить активностью планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (ПВ1 и ПВ2 соответственно) на изобарической поверхности 10 гПа вдоль широтного круга 60° N (рис. 8). Поскольку в оба сезона наблюдались ВСП со смещением вихря, основное внимание следует уделить ПВ1. В ноябре–декабре 2022 г. амплитуда ПВ1 была ниже нормы, однако

с января 2023 г. значительно превысила ее. Уже с декабря можно заметить существенные различия между зимами: в 2023–2024 гг. амплитуда ПВ1 была значительно выше климатически нормальных с декабря по март. Зимой 2022–2023 гг., несмотря на рост активности ПВ1 в январе, полярный вихрь оставался стабильным до середины февраля (рис. 9). Однако следует отметить, что повышенная волновая активность в январе 2023 г. подготовила условия для главного ВСП в феврале 2023 г. В среднем за зиму (см. рис. 8, справа) видно, что повышенные амплитуды ПВ1 привели к меньшей площади вихря в 2023–2024 гг., тогда как в 2022–2023 гг. площадь вихря оставалась близкой к норме. В то же время внутри зимнего периода вариации площади СПВ были намного значительнее в 2022–2023 гг., чем в 2023–2024 гг. Таким образом первая половина зимы 2022–2023 гг. характеризовалась суровыми условиями и большим СПВ, затем произошли рекордное потепление в феврале и уменьшение вихря, после чего вихрь оставался маленьким вплоть до сезонной перестройки циркуляции в стратосфере.

2.5. Тропосферный форсинг

Различия между зимами 2022–2023 гг. и 2023–2024 гг. наблюдаются не только в стратосфере, но и в среднеширотной тропосфере, что закономерно отражается на распределении потоков волновой активности в атмосфере. Это показывают средnezональные вертикальные потоки ВА Пламба вдоль 60° N, которые характеризуют распространение планетарных волн (рис. 10). Видно (см. рис. 10), что

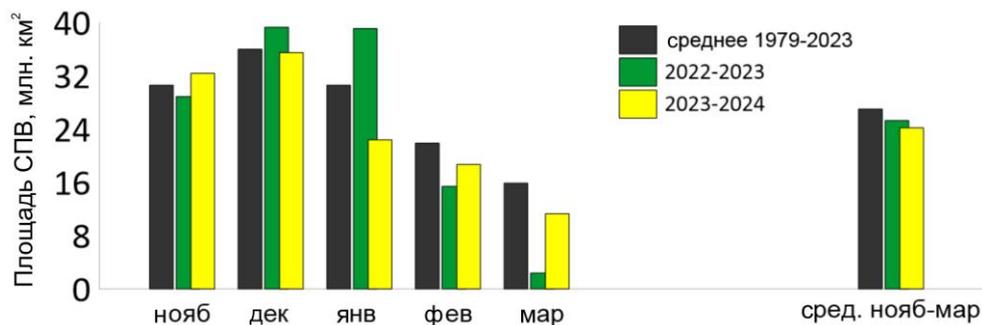


Рис. 9. Средние площади СПВ: черный — многолетние, зеленый — за зиму 2022–2023 гг., желтый — за зиму 2023–2024 гг.

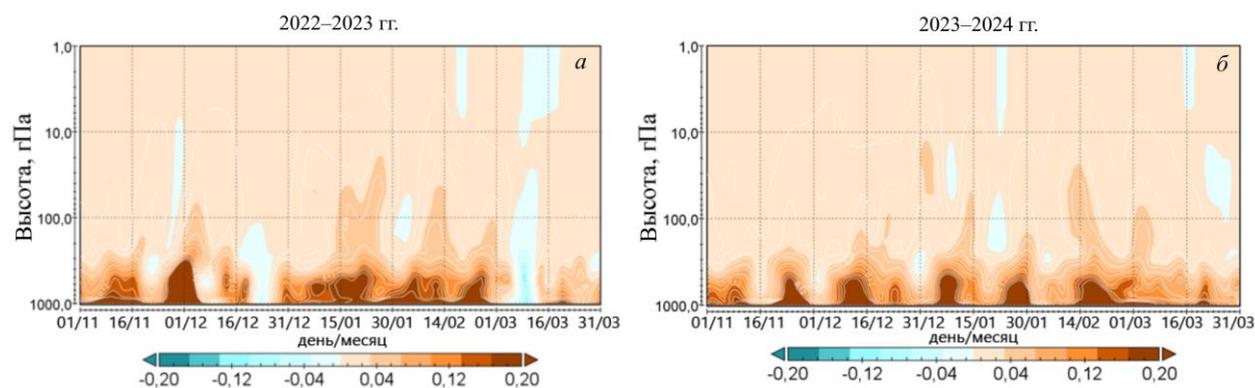


Рис. 10. Зонально усредненная вдоль 60° N вертикальная компонента потока волновой активности Пламба с 1 ноября 2022 г. по 1 марта 2023 г. (а) и с 1 ноября 2023 г. по 1 марта 2024 г. (б)

в целом на средних широтах преобладает восходящий поток, однако во второй половине декабря 2022 г. наблюдался нисходящий поток ВА. В отличие от этого, всю зиму 2023–2024 гг. наблюдался квазипериодический восходящий поток. Кроме того, на графиках за 2023–2024 гг. видно, что восходящий поток ВА остается достаточно интенсивным в нижней тропосфере до высот около 500 гПа. Если этому потоку удастся «просочиться» в верхние слои тропосферы, то он часто продолжает свое распространение в стратосферу, поэтому стоит рассмотреть особенности пространственного распределения вертикальных потоков ВА на границе между тропосферой и стратосферой (~ 100 гПа).

Для начала рассмотрим климатическое распределение вертикальной компоненты ВА в зимний период (рис. 11). В работах [Jadin, Zyulyaeva, 2010; Zyulyaeva, Zhadin, 2009] были подробно изучены волновые потоки. Согласно этим исследованиям, проникновение планетарных волн из тропосферы в стратосферу происходит преимущественно над севером Евразии, в то время как в области п-ва Лабрадор и Южной Гренландии фиксируются слабые нисходящие потоки. Это явление было названо «стратосферным мостом». Интенсификация проникновения планетарных волн в стратосферу в декабре ведет к значительным изменениям в ее динамике, создавая предварительные условия для возникновения ВСП в январе.

Для анализа «стратосферного моста» были построены карты аномалий вертикальных потоков ВА,

усредненных для зимних месяцев 2022–2023 и 2023–2024 гг. На рис. 12 показаны разрезы высота–широта вектора ВА с ноября по март, на которых видны значительные различия в ВА в начале зимнего сезона, особенно в ноябре и декабре, между анализируемыми годами. В ноябре 2022 г. над Азией не сформировалась восходящая ветвь «моста», и в декабре положительная аномалия ВА была замечена лишь в части этого региона. Рисунок 12 демонстрирует, что различия в динамике площади стратосферного вихря между двумя зимами объясняются аномалиями потока ВА из тропосферы. Распределения ВА в январе 2023 г. и в декабре 2023 г. аналогичны. Таким образом, формирование большого и холодного стратосферного вихря в зимний сезон 2022–2023 гг. было связано с поздним формированием восходящего потока волновой активности из тропосферы.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление двух зимних периодов позволило выделить различия, которые наблюдались не только в стратосфере, но и в тропосфере. Однако за рамками работы остались некоторые аспекты зимней стратосферы, например, меридиональные потоки тепла, остаточная циркуляция, Эль-Ниньо, квазидвухлетняя цикличность экваториального ветра (КДК), осцилляция Маддена—Джулиана (МДО) и пр. Зимние периоды 2022–2023 и 2023–2024 гг. ранее рассматривались в работах других авторов, например [Vargin et al., 2024; Lu et al., 2023; Qian et al., 2024]. Ниже мы

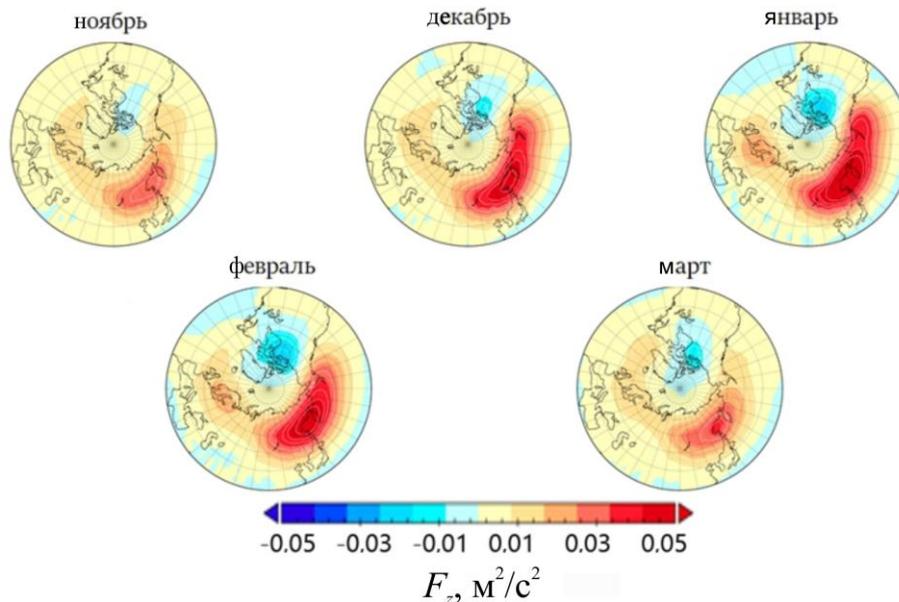


Рис. 11. Пространственное распределение климатических среднемесячных значений вертикальной компоненты потока волновой активности Пламба

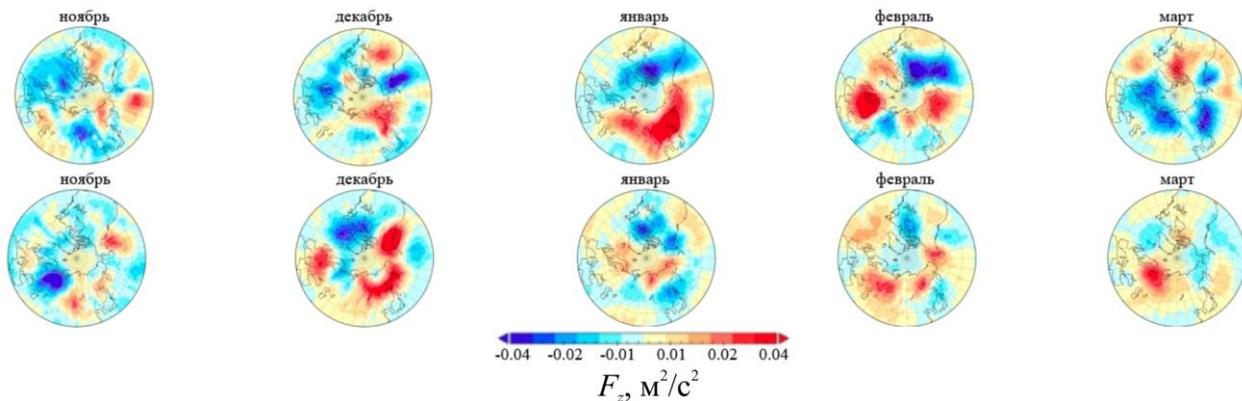


Рис. 12. Заливка — карты аномалий вертикальных потоков ВА, усредненных для зимних месяцев 2022–2023 гг. (верхние) и 2023–2024 гг. (нижние). Разрезы высота–широта — векторы ВА

остановимся на некоторых результатах этих работ. Vargin et al. [2024] отметили, что холодный и стабильный полярный вихрь в первой половине зимы 2022–2023 гг., рассмотренный и в нашей работе, привел к самому большому объему полярных стратосферных облаков с 1980 г. Незначительное ВСП в январе 2023 г. сопровождалось рекордным меридиональным потоком тепла в нижней стратосфере и существенными изменениями остаточной меридиональной циркуляции. Изменения конфигурации потока волновой активности после январского ВСП способствовали формированию главного ВСП в феврале, что подтверждается результатами настоящей работы (см. рис. 8).

В работе [Lu et al., 2023] исследовано стратосферно-тропосферное взаимодействие зимой 2022–2023 гг. и установлено, что незначительное ВСП в январе 2023 г. имело отклик в нижней тропосфере, но нисходящее воздействие было слабым. Так же как и мы в данной работе, Lu et al. [2023] связывают главное ВСП в феврале 2023 г. с критическим увеличением амплитуды ПВ1, но отмечают при этом, что главное ВСП привело к значительными анома-

лиями холода по всей Северной Америке вплоть до конца марта. Среди прочего авторы отметили, что условия Ла-Нинья способствовали усилению планетарных волн. Значительная потеря льда в Баренцевом море и море Лаптевых была еще одним фактором, способствующим возмущениям СПВ в январе–феврале 2023 г. Развитие фаз МДО 4–6 за две недели до главного ВСП также сыграло свою роль.

В работе [Qian et al., 2024] авторы, так же как мы, отнесли три главных ВСП зимнего сезона 2023–2024 гг. к типу смещения полярного вихря в результате динамики ПВ1. Qian et al. [2024] установили, что стратосферные возмущения распространялись в нижние слои тропосферы во время ВСП, вызывая волны холода во всех континентальных районах Северного полушария. Они отметили также усиление меридиональной остаточной циркуляции, которая перенесла большое количество водяного пара в тропическую стратосферу, что оказало значительное влияние на состав стратосферы.

Таким образом, результаты нашего исследования, находясь в согласии результатами других исследователей, расширяют и дополняют набор фак-

торов, влияющих на динамику зимней стратосферы. В отличие от перечисленных работ, отмечающих последствия ВСП в погодных условиях, мы акцентировали внимание на роли тропосферного форсинга в динамике стратосферы. Мы связываем наличие холодного и масштабного СПВ зимой 2022–2023 гг. с задержкой формирования «стратосферного моста» на месяц по сравнению с зимой 2023–2024 гг. Зимний сезон 2022–2023 гг. является ярким примером продолжения наметившейся с конца 90-х гг. тенденции к формированию экстремально больших СПВ в первой половине зимы и главных ВСП во второй половине. В то же время незначительное ВСП 6 января 2024 г. внесло вклад в тенденцию увеличения повторяемости ранних главных ВСП.

В контексте нашего исследования результаты работы [Zou, Zhang, 2024] могут быть полезны для объяснения тенденции к формированию экстремально больших СПВ в первой половине зимы и сильных ВСП во второй половине. Потеря морского льда в Арктике может усиливать восходящую волновую активность из тропосферы, причем максимальные положительные аномалии поверхностной температуры отмечаются в районе Карского и Баренцева морей, где формируется режим «теплая Арктика – холодная Евразия» [Zhang et al., 2018]. Возможно, это изменяет конфигурацию пространственного распределения ВА, т. е. ВА в тропосфере сохраняется высокой, но локализована в стороне от восходящей ветви «стратосферного моста». Это способствует растяжению и увеличению площади СПВ в начале зимы. В результате ВСП могут происходить во второй половине зимы, причем большой амплитуды, как мы наблюдали в зимний сезон 2022–2023 гг. Приведенные выше рассуждения будут служить отправной точкой в наших дальнейших исследованиях. Высокая вариативность процессов в зимней стратосфере от года к году, отмеченная в данной работе, обуславливает актуальность дальнейшего изучения динамики СПВ в контексте долговременных изменений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены вариации площади стратосферного полярного вихря (СПВ), температуры высокоширотной стратосферы, амплитуды планетарных волн, а также потоков волновой активности Пламба с ноября по март за два зимних сезона 2022–2023 и 2023–2024 гг. на фоне средних многолетних значений с 1979 по 2024 г. В 2022–2023 гг. площадь СПВ существенно превысила климатически нормальную в декабре и январе, а уменьшение площади СПВ произошло на месяц позже климатической нормы. Это сопровождалось экстремально низкими температурами полярной стратосферы в первую половину зимы и рекордно «жарким» внезапным стратосферным потеплением во вторую половину зимы. В зимний период 2022–2023 гг. наблюдалось два ВСП — незначительное в конце января, главное в середине февраля. Продолжительное увеличение площади вихря и более поздние сроки появления

главного ВСП в зимний период 2022–2023 гг. относительно 2023–2024 гг. были связаны с пониженной волновой активностью в стратосфере в первой половине зимы, которая была обусловлена аномалиями волновой активности в тропосфере. В зимний период 2023–2024 гг. не отмечалось экстремальных значений площади СПВ и температуры, однако за зимний период наблюдалось четыре ВСП, три из которых были major. В среднем температура полярной стратосферы обратно пропорциональна площади стратосферного полярного вихря. Обратная корреляционная зависимость может существенно нарушаться в отдельные годы, как, например, произошло в 2023–2024 гг. из-за обилия ВСП.

В изменениях рассматриваемых параметров обращает на себя внимание конец 90-х начало 2000-х гг., где на протяжении 5–6 лет наблюдались аномально низкие площади вихря и ранние ВСП. Не менее интересной особенностью выглядит возникновение аномально больших вихрей в первой половине зимы, начиная с 2007 г. Если рассматривать тенденции СПВ и температуры, усредненные за зимний период, то видно, что наблюдается понижение температуры и рост площади СПВ с 1979 по 2024 г. Однако по месяцам вариации температуры и СПВ не так однородны. В целом среднюю за зиму тенденцию обеспечивает март, именно для него характерно значительное уменьшение температуры и рост площади вихря. В январе наблюдается обратная тенденция — незначительное увеличение температуры на фоне уменьшения площади СПВ. Зимний сезон 2022–2023 гг. продолжает тенденцию к формированию экстремально больших СПВ в первой половине зимы и сильных ВСП во второй половине. В то же время незначительное ВСП 6 января 2024 г. внесло вклад в тенденцию увеличения повторяемости ранних ВСП. Высокая вариативность процессов в зимней стратосфере от года к году делает необходимым дальнейшее изучения динамики СПВ в контексте долговременных изменений.

Анализ и интерпретация результатов выполнены при поддержке проекта РНФ № 22-7710008. Обработка и хранение данных осуществлялись при поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антохина О.Ю., Гочаков А.В., Зоркальцева О.С. и др. Опрокидывание волн Россби в стратосфере. Часть I: Климатология и долговременная изменчивость. *Оптика атмосферы и океана*. 2024, т. 37, № 5. DOI: [10.15372/AOO20240509](https://doi.org/10.15372/AOO20240509).
- Вяткин А.Н., Зоркальцева О.С., Мордвинов В.И. Влияние Эль-Ниньо на параметры средней и верхней атмосферы над Восточной Сибирью по данным реанализа и моделирования в зимний период. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 1, с. 44–52. DOI: [10.12737/szf-101202406](https://doi.org/10.12737/szf-101202406) / Vyatkin A.N., Zorkaltseva O.S., Mordvinov V.I. Influence of El Niño on parameters of the middle and upper atmosphere over Eastern Siberia according to reanalysis and model data in winter. *Solar-Terrestrial Physics*. 2024, vol. 10, iss. 1, pp. 40–48. DOI: [10.12737/stp-101202406](https://doi.org/10.12737/stp-101202406).

- Диденко К.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В., Погорельцев А.И. Диагностика нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн. *Ученые записки ПГГМУ*. 2019, № 56. DOI: [10.33933/2074-2762-2019-56-19-29](https://doi.org/10.33933/2074-2762-2019-56-19-29).
- Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю., Антохин П.Н. Долговременная изменчивость параметров внезапных стратосферных потеплений по данным реанализа ERA5. *Оттика атмосферы и океана*. 2023, т. 36, № 03, с. 200–208. DOI: [10.15372/AOO20230306](https://doi.org/10.15372/AOO20230306).
- Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И. и др. Влияние осцилляции Маддена—Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику внетропической стратосферы. *Геоматематизм и аэрономия*. 2019, т. 59, №. 1, с. 1–11. DOI: [10.1134/S0016794018060068](https://doi.org/10.1134/S0016794018060068).
- Andrews D., Taylor F., McIntyre M. The influence of atmospheric waves on the general circulation of the middle atmosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1987, vol. 323, iss. 1575, pp. 693–705. DOI: [10.1098/rsta.1987.0115](https://doi.org/10.1098/rsta.1987.0115).
- Baldwin M.P., Dunkerton T.J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*. 2001, vol. 294, pp. 581–584.
- Baldwin M., Ayarzagueno B., Birner T., et al. Sudden stratospheric warmings. *Rev. Geophys.* 2021, vol. 59. DOI: [10.1029/2020RG000708](https://doi.org/10.1029/2020RG000708).
- Bushra N., Rohli R.V. An objective procedure for delineating the circumpolar vortex. *Earth and Space Science*. 2019, vol. 6, no. 5, pp. 774–783. DOI: [10.1029/2019EA000590](https://doi.org/10.1029/2019EA000590).
- Cámara A., Albers J., Birner T., et al. Sensitivity of sudden stratospheric warmings to previous stratospheric conditions. *J. Atmos. Sci.* 2017, vol. 74, no. 9, pp. 2857–2877. DOI: [10.1175/JAS-D-17-0136.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0136.1).
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. The ERA5 Global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, vol. 146, pp. 1999–2049. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).
- Hitchcock P., Simpson I.R. The downward influence of stratospheric sudden warmings. *J. Atmos. Sci.* 2014, vol. 71, pp. 3856–3876. DOI: [10.1175/JAS-D-14-0012.1](https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0012.1).
- Holton J.R., Tan H.-C. The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. *J. Atmos. Sci.* 1980, no. 37, pp. 2200–2208. DOI: [10.1175/1520-0469\(1980\)037<2200:TIOTEQ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2200:TIOTEQ>2.0.CO;2).
- Hoskins B.J., McIntyre M.E., Robertson A.W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1985, vol. 111, no. 470, pp. 877–946. DOI: [10.1002/qj.49711147002](https://doi.org/10.1002/qj.49711147002).
- Jadin E.A., Zyulyaeva Yu.A. Interannual variations in the total ozone, stratospheric dynamics, extratropical SST anomalies and predictions of abnormal winters in Eurasia. *International Journal of Remote Sensing*. 2010, vol. 31, pp. 851–866. DOI: [10.1080/01431160902897874](https://doi.org/10.1080/01431160902897874).
- Kidston J., Scaife A., Hardiman S., et al. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature Geosci.* 2015, vol. 8, pp. 433–440. DOI: [10.1038/ngeo2424](https://doi.org/10.1038/ngeo2424).
- Kuchar A., Ohlert M., Eichinger R., Jacobi C. Large-ensemble assessment of the Arctic stratospheric polar vortex morphology and disruptions. *Weather and Climate Dynamics*. 2024, vol. 5, no. 3, pp. 895–912. DOI: [10.5194/wcd-5-895-2024](https://doi.org/10.5194/wcd-5-895-2024).
- Lawrence Z., Manney G. Characterizing stratospheric polar vortex variability with computer vision techniques. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018, vol. 123, no. 3, pp. 1510–1535. DOI: [10.1002/2017JD027556](https://doi.org/10.1002/2017JD027556).
- Lawrence Z., Perlwitz J., Butler A., et al. The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic oscillation and ozone loss. *JGR Atmosphere*. 2020, vol. 125, no. 22. DOI: [10.1029/2020JD033271](https://doi.org/10.1029/2020JD033271).
- Limpasuvan V., Hartmann D.L., Thompson D.W., et al. Stratosphere-troposphere evolution during polar vortex intensification. *Geophys. Res.* 2005, vol. 110. DOI: [10.1029/2005JD006302](https://doi.org/10.1029/2005JD006302).
- Lu Q., Rao J., Shi C., et al. Stratosphere-troposphere coupling during stratospheric extremes in the 2022/23 winter. *Weather Climate Extrem.* 2023, vol. 42. DOI: [10.1016/j.wace.2023.100627](https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100627).
- McIntyre M.E., Palmer T.N. Breaking planetary waves in the stratosphere. *Nature*. 1983, vol. 305, no. 5935, pp. 593–600.
- Nash E., Newman P., Rosenfield J., Schoeberl M. An objective determination of the polar vortex using Ertel’s potential vorticity. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, pp. 9471–9478. DOI: [10.1029/96JD00066](https://doi.org/10.1029/96JD00066).
- Plumb R.A. On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J. Atmos. Sci.* 1985, vol. 42, no. 3, pp. 217–229. DOI: [10.1175/15200469\(1985\)042<0217:ottdpo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/15200469(1985)042<0217:ottdpo>2.0.co;2).
- Qian L., Rao J., Shi C., Liu S. Enhanced stratosphere-troposphere and tropics-Arctic couplings in the 2023/24 winter. *Nature. Communications Earth & Environment*. 2024, vol. 5. DOI: [10.1038/s43247-024-01812-x](https://doi.org/10.1038/s43247-024-01812-x).
- Schoeberl M.R., Hartmann D.L. The dynamics of the stratospheric polar vortex and its relation to springtime ozone depletions. *Science*. 1991, vol. 251, no. 4989, pp. 46–52. DOI: [10.1126/science.251.4989.46](https://doi.org/10.1126/science.251.4989.46).
- Smith K., Polvani L., Tremblay L. The impact of stratospheric circulation extremes on minimum Arctic Sea ice extent. *J. Climate*. 2018, vol. 31, no. 18, pp. 7169–7183. DOI: [10.1175/JCLI-D-17-0495.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0495.1).
- Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V., Kirushov B.M. Large-scale dynamic processes during the minor and major sudden stratospheric warming events in January–February 2023. *Atmos. Res.* 2024, vol. 308. DOI: [10.1016/j.atmosres.2024.107545](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107545).
- Zhang P., Wu Y., Simpson I., et al. A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents-Kara Sea sea ice loss. *Sci. Adv.* 2018, vol. 4, no. 7. DOI: [10.1126/sciadv.aat6025](https://doi.org/10.1126/sciadv.aat6025).
- Zou C., Zhang R. Arctic Sea ice loss modulates the surface impact of Autumn stratospheric polar vortex stretching events. *Geophys. Res. Lett.* 2024, vol. 51, no. 3. DOI: [10.1029/2023GL107221](https://doi.org/10.1029/2023GL107221).
- Zyulyaeva Yu.A., Zhadin E.A. Analysis of three-dimensional Eliassen-Palm fluxes in the lower stratosphere. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2009, vol. 34, no. 8, pp. 483–490. URL: <https://disk.yandex.ru/d/IkG02E1Qb-Uq1g> (дата обращения 10 марта 2025 г.). URL: <https://bit.ly/4fYrC3u> (дата обращения 10 марта 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю., Гочаков А.В., Артамонов М.Ф. Эволюция стратосферного полярного вихря на примере зимних периодов 2022–2024 гг. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 2, с. 89–99. DOI: [10.12737/szf-112202508](https://doi.org/10.12737/szf-112202508).