

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.510.532

Опрокидывание волн Россби в стратосфере. Часть II. Условия возникновения внезапных стратосферных потеплений

О.Ю. Антохина^{✉1,2}, А.В. Гочаков^{1,3}, О.С. Зоркальцева², П.Н. Антохин¹,
В.Н. Крупчатников⁴, М.Ф. Артамонов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

³Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
630099, г. Новосибирск, ул. Советская, 30

⁴Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6

Поступила в редакцию 28.02.2025;

после доработки 18.03.2025;

принята к печати 20.03.2025

Изучение формирования ВСП и их сложных взаимосвязей с тропосферными и стратосферными процессами имеет фундаментальное значение для углубления понимания динамики атмосферной циркуляции. Это особенно важно в условиях глобальных климатических изменений, которые не только усиливают частоту, но и увеличивают интенсивность аномальных атмосферных явлений. На основании разработанного метода идентификации опрокидываний волн Россби (ОВР), адаптированного к особенностям циркуляции в стратосфере, проанализированы условия возникновения главных внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в Северном полушарии. Метод основан на изучении геометрии контуров потенциальной завихренности в стратосфере на уровне 850 К с использованием данных реанализа ERA5. Показано, что аномальное количество ОВР в ноябре и декабре играют ключевую роль в подготовке к возникновению ВСП. Большинство анализируемых событий ВСП связано с увеличением количества ОВР в Азиатско-Тихоокеанском (АТ) регионе в ноябре и декабре, а иногда и январе. В случаях, когда начало ВСП связано с опрокидываниями волн над Атлантикой и Европой, ему также предшествуют аномалии ОВР над АТ-регионом. Для выявленных типов опрокидываний в стратосфере характерны атмосферные блокировки в тропосфере, сопровождающиеся отрицательными аномалиями приземной температуры над Евразией и/или Северной Америкой. Увеличение частоты главных событий ВСП в первой половине зимы согласуется с ранее обнаруженной тенденцией усиления отрицательного температурного отклика на атмосферное блокирование в Северном полушарии. Результаты работы могут быть использованы для улучшения прогнозирования ВСП и связанных с ними экстремальных погодных явлений, а также в климатическом моделировании для учета влияния ОВР на стратосферные процессы.

Ключевые слова: стратосфера, опрокидывание планетарных волн, опрокидывание волн Россби, внезапные стратосферные потепления, аномалии циркуляции, температура; stratosphere, planetary wave breaking, Rossby wave breaking, sudden stratospheric warming, circulation anomaly, temperature.

Введение

В зимней стратосфере Северного полушария происходят сложные процессы перемешивания воздушных масс, вызванные проникновением планетарных волн из тропосферы и их взаимодействием

с зональным потоком [1–3]. Эти процессы играют ключевую роль в формировании внезапных стратосферных потеплений (ВСП) (см. [4, 5]), сопровождающихся резким повышением температуры в полярной стратосфере, замедлением и реверсом среднезонального ветра. Внезапные стратосферные потепления могут значительно влиять на климат и погодные условия в глобальном масштабе.

Возникновение ВСП связано с ослаблением или разрушением стратосферного полярного вихря (СПВ), вызванным адиабатическими эффектами и адвективным переносом теплых воздушных масс в полярную область [2, 4]. Это может приводить к существенным

* Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Александр Владимирович Гочаков (wandering@bk.ru); Ольга Сергеевна Зоркальцева (meteorologist-ka@yandex.ru); Павел Николаевич Антохин (arn@iao.ru); Владимир Николаевич Крупчатников (vkрупчатников@yandex.ru); Максим Федорович Артамонов (artamonov.maksim@iszf.irk.ru).

изменениям циркуляции тропосферы: экстремальные холода могут охватывать Северную Америку, Европу и Азию, в то время как в Арктике наблюдаются аномальные потепления [4]. События ВСП тесно связаны с долговременными изменениями в климатической системе, включая арктическое усиление, уменьшение площади морского льда и глобальное потепление [6]. Изучение процессов формирования ВСП является ключевым для улучшения воспроизведения циркуляции стратосферы и динамического взаимодействия стратосферы с тропосферой в численных моделях. Это, в свою очередь, способствует повышению точности сезонных прогнозов и прогнозов экстремальных погодных явлений. В зимний сезон обычно фиксируется одно или два события ВСП. Однако известны зимы, когда ВСП полностью отсутствовали. В такие периоды из-за устойчивого сохранения холодного и изолированного стратосферного полярного вихря вплоть до марта создавались условия для значительного разрушения озонового слоя, как это наблюдалось весной 2011 и 2020 гг. [7–9].

Несмотря на установленную связь между ВСП и проникновением планетарных волн из тропосферы в стратосферу, механизмы формирования ВСП продолжают активно изучаться. Эти волны формируются под влиянием таких факторов, как рельеф местности, разница температур между континентами и океанами, а также бароклинная неустойчивость, и именно они определяют динамику взаимодействия между тропосферой и стратосферой. На основе анализа результатов наблюдений и модельных расчетов в настоящее время принято выделять два основных механизма формирования ВСП [4, 11, 12].

Первый механизм — «снизу вверх» (bottom-up) [4] — предполагает, что ВСП инициируются усиленным проникновением планетарных волн из тропосферы в стратосферу. Ключевыми факторами, способствующими этому процессу, выступают атмосферные блокирования [13, 14], фазы ENSO (Эль-Ниньо Южное колебание), колебание Маддена-Джулиана [15] и особенности формирования снежного покрова [4].

Второй механизм — «сверху вниз» (top-down) [4] — предполагает, что ВСП могут быть вызваны внутренними процессами в стратосфере даже при отсутствии выраженных аномалий в тропосфере. В этом случае стратосфера «подготавливает» СПВ к состоянию, при котором даже минимальные возмущения могут инициировать резонансное усиление волн. Ключевую роль в этом процессе играют взаимодействия потоков волновой активности с зональной циркуляцией, а также нелинейные взаимодействия между волнами в стратосфере [16]. Кроме того, фаза квазидвухлетнего колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере формирует благоприятные или неблагоприятные условия для проникновения потока волновой активности в полярную стратосферу, определяя «пропускную способность» стратосферного потока [17].

Согласно исследованию [2] (подробнее см. в обзоре работы [10]), подготовке СПВ предшествует

спонтанное усиление амплитуды волн. Подготовка включает несколько эпизодов увеличения активности планетарных волн, которые в поле потенциальной завихренности (PV) проявляются как опрокидывания волн. Постепенное сокращение площади СПВ происходит за счет адвекции воздуха с высокой завихренностью в тропики и расширения зоны прибоа. Это создает условия для фокусировки волн, при которых даже слабое усиление волновых потоков из тропосферы может инициировать ВСП за счет резонансного усиления волн в стратосфере. Кроме планетарных волн важную роль в процессе подготовки играют и гравитационные — мелкомасштабные атмосферные волны, которые модифицируют зональные ветры в верхней стратосфере и мезосфере, способствуя ослаблению СПВ [18]. Таким образом, взаимодействие планетарных и гравитационных волн создает комплексный механизм подготовки ВСП.

Один из наиболее эффективных и информативных методов исследования динамики стратосферы, как в преддверии, так и в периоды ВСП, — это использование распределения PV [2, 4]. В нашей предыдущей работе [10] были собраны данные об опрокидывании волн Россби (ОВР), которые предоставляют возможность более глубокого анализа процессов, предшествующих ВСП. Настоящее исследование посвящено анализу ОВР для главных событий ВСП, выделенных в рамках исследования [5].

Основная цель работы — выявление характерных аномалий количества ОВР (далее аномалии ОВР), их географического распределения и временной эволюции. Эти данные позволят уточнить ключевые механизмы подготовки СПВ к ВСП.

1. Материалы и методы

1.1. Выбор событий ВСП

Для анализа были выбраны ранние и средние главные (major) события ВСП за период 1979–2021 гг., начало которых приходилось на даты до 12 февраля. Классификация по датам возникновения предложена авторами [19]. Мы исключили события, начинающиеся после этой даты, поскольку они часто представляют собой так называемые финальные ВСП, связанные не только с динамическими процессами, но и с радиационными механизмами усиливающегося солнечного нагрева [20, 21]. События для анализа были отобраны на основании критериев, предложенных в статье [5] (таблица). Такой подход позволил сосредоточиться на процессах, связанных преимущественно с проникновением тропосферных волн в стратосферу.

Наиболее ранним событием, включенным в анализ, является ВСП, начавшееся 6.12.1987 г., а наиболее поздним — 6.02.1989 г. Из 19 отобранных событий только четыре произошли до 1998 г. (0,2 события в год), в то время как после 1998 г. зарегистрировано 15 событий (0,6 события в год). Эти данные подтверждают тенденции, представленные в [5], и указывают на увеличение частоты ранних

События ВСП (ранжированы по датам возникновения)

№	Зимний период, г.	Дата начала	Регионы с аномалиями ОВР				Группа ВСП (см. п. 2.2)	Сценарий деформации	Источник
			Месяц						
			X	XI	XII	I			
1	1987/1988	6.12.1987	AE	AT			1	CSS	[22]
2	2000/2001	7.12.2000	AE	AE, AT			1	D	[23]
3	1998/1999	13.12.1998					1	CSS	[24]
4	2003/2004	17.12.2003	AE, AT	AE			3	CSS	[25]
5	2001/2002	22.12.2001			AE, AT		1	D	[26]
6	2018/2019	24.12.2018	AE	AE, AT	AE, AT		1	8SS	[27]
7	2002/2003	27.12.2002	AE	AT	AE		1	D	–
8	1984/1985	29.12.1984	AE, AT		AT		2	8FS	[28]
9	2020/2021	1.01.2021			AT		1	D	[29]
10	2005/2006	3.01.2006	AE, AT	AT	AT		2	D	[30]
11	2012/2013	4.01.2013	AE		AT		1	8FS	[31]
12	2002/2003	14.01.2003	AE	AT	AE	AE	2	8SS	–
13	1986/1987	16.01.1987	AE	AE	AE	AE	3	D	–
14	2008/2009	18.01.2009	AE	AT	AT	AE	2	8FS	[32]
15	2009/2010	20.01.2010	AE, AT	AT	AE	AE, AT	2	8SS	[33]
16	2016/2017	27.01.2017	AE	AT	AE	AE, AT	2	D	[34]
17	2000/2001	30.01.2001	AE	AE, AT		AT	1	8SS	–
18	2017/2018	5.02.2018	AE	AE	AT	AT	2	8FS	[35]
19	1988/1989	6.02.1989		AT	AE	AE	3	8SS	[36]

Примечание. Ранние и средние события, произошедшие до 1998 г., выделены полужирным. Места, где зафиксированы аномалии ОВР: AE – Атлантико-Европейский регион (90° з.д. – 60° в.д.), AT – Азиатско-Тихоокеанский регион (60° в.д. – 90° з.д.), AE, AT – оба региона. Группа ВСП (см. разд. 2.2) – по последовательности проявления ОВР. Сценарии деформации СПВ: CSS – медленное С-образное расщепление, 8FS – быстрое 8-образное расщепление, 8SS – медленное 8-образное расщепление, D – смещение (на основе карт PV).

(до 5.01 [19]) и средних (до 12.02 [19]) событий ВСП в последние десятилетия. В таблицу также включено событие, произошедшее в декабре 2000 г., которое классифицировано как слабое (minor), но обладает рядом уникальных характеристик [23]. Во-первых, это наиболее раннее слабое ВСП в анализируемом периоде. Во-вторых, оно связано с главным потеплением января 2001 г., и это единственное слабое потепление, которое характеризуется расщеплением СПВ, зафиксированным на основании данных PV [5]. Слабое потепление декабря 2002 г. также включено в анализ, так как оно тесно связано с главным событием января 2003 г.

Мы хотели бы подчеркнуть, что слабые ВСП часто тесно связаны с главными [37]. Однако, как правило, два эпизода подобных «связанных» ВСП не происходят до начала февраля. Исключением стали случаи 2000–2001 и 2002–2003 гг., которые мы и отобрали для анализа. Эти дополнения позволяют учесть важные характеристики переходных событий, которые могут играть ключевую роль в процессе подготовки и возникновения главных ВСП.

1.2. Анализ процессов ОВР

Для анализа ОВР применялся алгоритм, адаптированный к условиям циркуляции в стратосфере [10]. Результатом работы алгоритма являются диаграммы опрокидываний планетарных волн, доступные для различных временных промежутков (<https://bit.ly/4f3W3DW> – для расчета аномалий ОВР за каждый месяц, <https://bit.ly/4gaiOrl> – для

визуализации ОВР в течение зимы до ВСП). Диаграммы отображают дни и уровни, на которых наблюдаются ОВР (цветные точки), а также координаты центров опрокидываний, которые визуализируются различными цветами для разных районов.

Для анализа аномалий ОВР использовалась кластеризация центров опрокидываний за каждый календарный месяц с октября по апрель (<https://bit.ly/4f3W3DW>). Кластеры, расположенные в секторе 90° з.д. – 60° в.д., относились к Атлантико-Европейскому (AE) региону, а кластеры в секторе 60° в.д. – 90° з.д. – к Азиатско-Тихоокеанскому (AT). Основной характеристикой для оценки ОВР является количество уровней, вовлеченных в опрокидывания в течение месяца [10]. На основе диаграмм опрокидываний получены отклонения количества опрокидываний от среднегодовое значений (1979–2020 гг.) в отдельных месяцах (<https://bit.ly/3ZmMvOD>). Ранее было показано [10], что максимумы повторяемости ОВР приходятся на ноябрь и декабрь, что делает эти месяцы ключевыми для формирования аномального режима в стратосфере, связанного с ранними и средними ВСП. Для событий второй половины января и начала февраля значимую роль играют процессы не только в ноябре и декабре, но и в январе. Изменчивость количества ОВР значительна в октябре, отмечается тренд их увеличения в AT-регионе (<https://bit.ly/3DbuXxm>).

Таким образом, для каждого события ВСП оценивались аномалии количества ОВР за октябрь – январь в зависимости от даты его начала. Эти данные

позволили более детально изучить влияние аномалий ОВР на подготовку и развитие ВСП (см. разд. 2.1).

На основе диаграмм ОВР выделены **три группы** ВСП (см. разд. 2.2) в зависимости от последовательности проявлений ОВР над АТ- и АЕ-регионами (группы 1–3 в таблице). Помимо этого выделены **четыре типа** опрокидываний в зависимости от их локализации и степени влияния на СПВ (см. разд. 2.3).

Деформация СПВ в периоды ВСП анализировалась на основании суточных карт PV (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7450999>; <https://bit.ly/4fYrC3u>). Данный подход позволил уточнить существующую классификацию по сценариям деформации, включающую расщепление и смещение вихря [5]. Классификация важна для понимания динамики СПВ и ее связи с различными сценариями ВСП. Эти результаты анализируются в разд. 2.2. В работе применен метод композитных усреднений (наложенных эпох) [38] для анализа аномалий циркуляции в тропосфере и стратосфере, соответствующих периодам с разными типами ОВР (разд. 2.3). Мы анализируем температуру воздуха на уровне 1000 и 10 гПа, геопотенциал на уровне 500 гПа, а также аномалии потока волновой активности (вертикальная компонента) на основании уравнения Пламба [39] для 500 гПа в тропосфере и 10 гПа в стратосфере. Все параметры получены на основе суточных данных реанализа ERA5 [40] с 1979 по 2021 г. с пространственным разрешением 1,5°.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Анализ основных закономерностей ОВР для событий ВСП

На графиках (<https://bit.ly/3ZmMvOD>) и в таблице показано, что в 17 зимних сезонах с ранними и средними событиями ВСП аномалии ОВР в октябре чаще фиксируются в АЕ-регионе. Количество ОВР ниже нормы в октябре отмечено только в 1998/99, 2000/01 и 2020/21 гг. В АТ-регионе повышенное количество опрокидываний наблюдалось лишь в четырех зимних сезонах, причем в эти же годы отмечено увеличение их количества и в АЕ-регионе. Этот вывод оказался неожиданным, поскольку рост общего числа ОВР наблюдается преимущественно в АТ-регионе (<https://bit.ly/3DbyXhm>). Логично было бы предположить, что наиболее ранние ВСП должны быть связаны с опрокидываниями волн в АТ-регионе. Однако закономерность оказалась противоположной: аномалии в октябре в АЕ-регионе играют более значимую роль. Примером может служить зима 2021/22 г., когда наблюдался один из наиболее устойчивых СПВ [41], а положительная аномалия ОВР в октябре была зафиксирована в АТ-регионе.

В ноябре ситуация меняется в пользу АТ-региона: в девяти зимних периодах наблюдается повышение количества ОВР в АТ-регионе, а в шести — в АЕ. В 2020–2021 гг. ни в октябре, ни в ноябре

не было зафиксировано повышения количества ОВР в Северном полушарии. Зимой 2000/01, 2005/06, 2018/19 гг. положительные аномалии наблюдались в обоих регионах. Два наиболее ранних ВСП (7.12.1987 г. и декабрь 2000 г.) связаны с аномалиями ОВР в АЕ-регионе в октябре и АТ-регионе в ноябре. В декабре 1987 г. отмечены аномалии в АТ-регионе, а в ноябре 2000 г. — в АЕ и АТ-регионах.

Анализируя декабрь в 15 зимних периодов (за исключением наиболее ранних потеплений), мы обнаружили, что для семи периодов характерно повышение количества ОВР в АТ-регионе, а для восьми — в АЕ-регионе. Лишь в двух случаях (2001 и 2018 гг.) отмечено увеличение количества ОВР по всему Северному полушарию. В январе четыре события связаны с аномалиями в АТ-регионе, столько же — в АЕ-регионе. Данные таблицы показывают, что перед ВСП практически всегда фиксируются те или иные комбинации аномалий ОВР в Северном полушарии. Часто перед ВСП отмечаются аномалии в АЕ-регионе, хотя общее число ОВР здесь заметно ниже, чем в АТ-регионе.

Отметим, что повторяемость ОВР в октябре в АЕ-регионе примерно в три раза ниже, чем в АТ-регионе, и если сравнивать с процессами в АТ-регионе в ноябре — декабре, она может оказаться незначимой [10, рис. 1, 2]. ОВР в октябре, вероятно, могут рассматриваться как предикторы ранних и средних ВСП наряду с наиболее интенсивными процессами ноября — января. Поэтому основное внимание при анализе преобладающих процессов над двумя регионами перед ВСП мы уделили периоду ноябрь — январь. Обнаружено, что в первую половину зимы (например, в 1984, 1987, 1998, 2000, 2001, 2005, 2008, 2012, 2016, 2018 и 2020 гг.), а иногда и январе (2001, 2018 гг.) больше опрокидываний волн в АТ-регионе, чем в АЕ. На рис. 1 (цв. вкладка) представлены центры кластеризации ОВР, где размер кругов отражает вклад этих центров в общее число ОВР.

Вклад опрокидываний волн в АЕ-регионе существенно возрастает в ноябре — декабре 2002 г., январе 2003 г., ноябре — декабре 2003 г., ноябре 1986 г., январе 2009 и 2017 гг., а также феврале 2018 г. (рис. 2, цв. вкладка). Максимум количества ОВР для АЕ-региона отмечен в ноябре 1986 г. Примечательно, что в 2002 и 2003 гг. наблюдалось равное количество опрокидываний в обоих регионах, однако больше ОВР произошло в западной части Северного полушария. При увеличении общего вклада опрокидываний в АЕ-регионе всегда регистрируется аномальное их количество (см. таблицу). Таким образом, можно заключить, что ВСП определяется комбинацией аномалий ОВР над АЕ- и АТ-регионами.

2.2. Группировка ВСП по последовательности проявления ОВР над АТ- и АЕ-регионами

Анализ диаграмм ОВР и карт PV за ноябрь — январь позволил классифицировать ВСП на основе преобладающей последовательности ОВР

в АЕ- и АТ-регионах и соответствующих им форм смещения/расщепления СПВ.

Группа 1. Основным критерием для классификации является наличие устойчивых во времени ОВР в АТ-регионе (рис. 3, *а*, цв. вкладка; рис. 1, *б*), которые плавно переходят в ВСП. Характерные для данной группы ОВР ассоциируются с так называемыми канадскими потеплениями [42]. В отдельных случаях ОВР наблюдаются в АЕ-регионе (например, ноябрь 2000 г.), однако происходит смещение СПВ за счет адвекции воздушных масс с низкой завихренностью над Тихим океаном (рис. 3, *б–г*). К этой группе относятся события декабря 1987, 1998, 2001, 2002, 2003, 2012 гг. (с переходом на январь 2013 г.), 2018, 2020, ноябрь 2000 и январь 2001 гг. (см. таблицу).

Для группы 1 наиболее характерно (см. таблицу) смещение СПВ (*D* – три случая), а также *S*-образная деформация и медленное расщепление СПВ (*CSS* – три случая). Такие процессы могут продолжаться в течение 7–10 дней (рис. 3, *б–г*). Исключением является декабрь 2012 г. – январь 2013 г., когда расширение области с низкой завихренностью также происходило со стороны Тихого океана (рис. 3, *в, г*), однако этот процесс длился всего три дня, а деформация СПВ принимала форму «8» (*8FS*) (<https://bit.ly/3VoBb3a>). Непричным для этой группы также является событие декабря 2000 г., когда в период с 13 по 16.12 произошло быстрое расщепление по типу *8FS* за счет двустороннего усиления адвекции с низкой завихренностью в обоих регионах (<https://bit.ly/4ghRqqS>). Однако важно отметить, что ВСП в декабре 2000 г. началось со смещения вихря за счет расширения области антициклона над Тихим океаном.

Обнаружена также промежуточная между *CSS* и *8FS* форма деформации СПВ в событиях февраля 2001 г. и января 2019 г. Скорость и одностороннее направление деформации вихря в этих случаях схоже с *CSS*, однако форма вихря ближе к *8FS*. Этот процесс был обозначен как *8SS*. В целом можно заключить, что для группы 1 характерны смещения СПВ либо медленное расщепление вихря. Такие изменения, как правило, развиваются постепенно, что подчеркивает важность временной динамики адвекции PV для подготовки и реализации ВСП.

Группа 2. Основным критерием выделения этой группы является наличие устойчивых ОВР над АТ-регионом, которые не завершаются ВСП. Вместо этого ВСП начинается с активизации ОВР в АЕ-регионе (рис. 4, *а*, цв. вкладка). К этой группе отнесены события декабря 1984 г. (рис. 4, *б–г*), января 2003, 2006, 2009, 2010, 2017 и февраля 2018 гг. Среди форм деформации СПВ чаще наблюдается быстрое расщепление *8FS* (три случая), которое происходит за два–три дня (рис. 4, *б–г*), а также медленное расщепление *8SS* (два случая). Также отмечены случаи смещения СПВ (*D*) в январе 2006 и 2017 гг. Таблица показывает, что более поздние события с высокой вероятностью относятся к группе 2.

Таким образом, можно сделать вывод, что преобладающее аномальное усиление регулярных ОВР над Тихим океаном приводит к появлению самых ранних событий ВСП. Более поздние события формируются под влиянием усиления ОВР в АЕ-регионе.

Наши результаты подтверждают наличие подготовительного этапа перед возникновением ВСП. Интенсивность ОВР, связанных с этим этапом, значительно варьируется от года к году. Периоды «подготовки», предшествующие ранним и средним событиям ВСП, не являются регулярным процессом с точки зрения климатологии ОВР. Напротив, они, вероятно, отражают последствия аномалий в тропосферно-стратосферном обмене, которые создают условия для возникновения ВСП.

Мы не классифицировали события января 1987, февраля 1989 и декабря 2003 гг. (**группа 3** в таблице). Январю 1987 г. предшествовали аномалии ОВР в АЕ-регионе в ноябре – декабре 1986 г. с последующей активизацией опрокидываний над Азией в конце декабря – январе (<https://bit.ly/3VeJay1>). В ноябре – декабре 2003 г. ОВР преобладали над Азией и Атлантикой (<https://bit.ly/4g9Sft4>); ВСП февраля 1989 г. характеризуется слабыми аномалиями ОВР в АТ-регионе, предшествующими ВСП; его начало связано с ОВР в АЕ-регионе (<https://bit.ly/3OSgIQY>), что сближает его с событиями группы 2.

2.3. Анализ условий циркуляции атмосферы, соответствующих ОВР

Для анализа условий циркуляции, соответствующей периодам ОВР, мы выделили четыре типа опрокидываний, предшествующих событиям ВСП, классифицированных на основании диаграмм.

1. АТ-тип является наиболее часто встречающимся типом ОВР, при котором центры опрокидываний группируются преимущественно над Азией и Тихим океаном (см. рис. 3, *а*).

2. АЕ-тип: центры опрокидываний группируются преимущественно над Атлантикой. Примеры: ноябрь 1986 г. (<https://bit.ly/4gmz08t>), вторая половина декабря 2016 г.

3. АЕ+АТ-тип: происходит одновременное усиление опрокидываний волн над Атлантикой и Тихим океаном с преобладанием опрокидываний над Атлантикой и Европой. Примеры: конец декабря 1984 г. (см. рис. 4, *а*), первая половина января 2017 г., вторая половина января 2003 г., февраль 2018 г.

4. АЕ/АТ-тип: на уровнях низких значений PV регистрируются опрокидывания над Атлантикой, на уровнях высоких значений – над Тихим океаном (<https://bit.ly/3VjaYfH>). Наиболее яркие примеры: декабрь 2002 г., ноябрь 2000 г., декабрь 2020 г.

Для четырех типов ОВР были выбраны даты (<https://bit.ly/49p03xL>), предшествующие началу ВСП. Наибольшую повторяемость среди всех имеют процессы первого типа. Это хорошо согласуется с группировкой ВСП – большая часть ОВР для групп 1, 2 представлена процессами первого типа. Процессы второго и четвертого типов характерны

как для группы 1, так и для группы 2. Третий тип ОВР более характерен для группы 2.

На рис. 5 (цв. вкладка) представлены композитные усреднения аномалий температуры на уровнях 1000 и 10 гПа, геопотенциала на уровне 500 гПа, а также аномалий вертикальной составляющей потока волновой активности на двух уровнях: 500 и 10 гПа. Аномалии температуры на 10 гПа демонстрируют четыре характерных состояния стратосферы. Для первого и третьего типов ОВР потепление локализуется в АТ-регионе (рис. 5, *г, о*), а для второго и четвертого — в АЕ-регионе (рис. 5, *и, у*). В первых трех случаях СПВ смещен на территорию Северной Америки и Атлантики, в то время как в четвертом, сопровождающемся расщеплением вихря, одна часть СПВ смещается к Северной Америке, а другая — к Европе. Аномалии температуры (рис. 5, *г, и*) характеризуют наиболее частый сценарий подготовки СПВ к ВСП, тогда как ситуация на рис. 5, *у* способствует более сильному повышению температуры, но встречается реже. На рис. 5, *г*, видно, что повышение температуры над Азией и Тихим океаном начинается еще в субтропиках над Северной Америкой.

Композитные усреднения температуры и геопотенциала в нижней и средней тропосфере демонстрируют дипольные структуры с центрами холода над Сибирью и Северной Америкой (рис. 5). Тропосферный полярный вихрь представлен областями аномально низких значений геопотенциала, смещенными в умеренные широты. В Арктике преобладают повышенные значения геопотенциала в средней тропосфере. Для первых трех типов ОВР основные области холода на уровне поверхности земли локализованы над Сибирью (рис. 5, *а, е, л*), а для четвертого типа — над Северной Америкой (рис. 5, *р*). Это подтверждает, что ранним и средним ВСП предшествует усиление моды «теплая Арктика — холодная Евразия» поздней осенью и в первую половину зимы, возможно, связанное с уменьшением площади морского льда [6]. Заметим, что продемонстрированное в рамках настоящей работы значимое увеличение количества ВСП в первой половине зимы и ранее обнаруженное усиление ОВР в стратосфере [10], возможно, являются следствием изменения тропосферно-стратосферного взаимодействия, вызванного изменением температуры в Арктике.

Положительные аномалии потока волновой активности (ВА) (усиление потока, направленного вверх) на уровне 10 гПа локализованы в областях, соответствующих основным центрам холода в Сибири и над Северной Америкой. Исключение составляет второй тип ОВР, для которого похолодание в Сибири связано с нисходящими потоками из стратосферы в тропосферу (отрицательная аномалия ВА) (рис. 5, *к*). Эти наблюдения хорошо согласуются с анализом отдельных случаев ВСП [43], которые демонстрируют, что их возникновение сопровождается вертикальным взаимодействием между тропосферой и нижней стратосферой. Композитные распределения уточняют, что процессы

подготовки ВСП, начиная с ноября, также сопровождаются интенсивным тропосферно-стратосферным обменом. Усиление холодных эпизодов в тропосфере при этом может быть связано со стратосферными вторжениями [44].

На уровне 500 гПа вертикальный поток ВА представлен аномальным полем с выраженными положительными и отрицательными аномалиями. Общей чертой для всех типов ОВР является наличие аномального потока ВА из тропосферы в районе западного побережья Тихого океана. Однако поле вертикальной компоненты вектора ВА в тропосфере характеризуется сильной изменчивостью. Проведенный усредненный анализ позволяет выделить общие закономерности, но необходимо детальное изучение отдельных случаев.

Анализ паттернов температуры и геопотенциала подтвердил, что увеличение числа ОВР в стратосфере тесно связано с блокирующими процессами в тропосфере. Усиление положительных аномалий геопотенциала четко прослеживается над Северной Европой для случаев со смещением СПВ и над северной частью Тихого океана для событий с расщеплением вихря (см. рис. 5), что согласуется с ранее полученными результатами [13, 14]. Однако взаимосвязь между ВСП и отдельными событиями блокирования оказывается сложной из-за двух ключевых факторов.

Во-первых, для большинства ВСП требуется многонедельное усиление планетарных волн, что подтверждается анализом главных ВСП как в данной работе, так и в предшествующих исследованиях. Тем не менее не каждое продолжительное блокирующее событие приводит к развитию ВСП, так как частота блокировок значительно превышает частоту ВСП [45].

Во-вторых, наши результаты также свидетельствуют, что процессы усиления планетарных волн, связанные с ОВР, отличаются не только продолжительностью, но и необычно широким вертикальным охватом, затрагивая множество уровней потенциальной завихренности. Это позволяет сделать вывод, что определяющую роль в усилении планетарных волн играет не отдельное блокирующее событие, а устойчивая аномальная структура волнового потока в тропосфере средних и высоких широт. Такая конфигурация вызывает закономерное чередование восходящих и нисходящих потоков волновой активности, что существенно усиливает обмен между тропосферой и стратосферой.

Сложность выделения общего волнового потока от отдельных блокирующих событий является известной проблемой [31], и наши результаты подчеркивают ее актуальность для большого числа событий ВСП. Кроме того, схожесть аномалий геопотенциала (см. рис. 5), усиление ОВР над Атлантикой после повышения волновой активности над Тихим океаном, а также их взаимное усиление в отдельные периоды свидетельствуют о последовательном развитии аномалий геопотенциала для обоих типов волн (АТ и АЕ) в рамках длительного взаимодействия стратосферы и тропосферы.

Особое значение для усиления волновой активности имеют блокирующие процессы, которые способствуют смещению и изоляции отдельных частей полярного вихря в тропосфере над Сибирью, Тихим океаном и Западной Атлантикой. Как показано в работе [46], с 2000-х гг. подобные аномалии (см. рис. 5) стали возникать чаще, что связано с блокирующими процессами, смещенными к северу. Это может быть обусловлено арктическим усилением и повышенной неустойчивостью циркуляции в полярной области, вызванной ускоренным потеплением в высоких широтах. Эти изменения, вероятно, способствуют увеличению частоты ранних и средних событий ВСП, что подчеркивает необходимость дальнейшего изучения механизмов волновой активности и ее взаимодействия с блокирующими процессами.

Заключение

В рамках настоящей работы получены новые результаты, которые углубляют наше понимание условий формирования ВСП в последние четыре десятилетия.

1. Главные события ВСП, регистрируемые до середины февраля, стали происходить чаще после 1998 г. Из 19 отобранных событий только четыре произошли до 1998 г. (0,2 событий в год), большая часть ВСП отмечена после (0,6 событий в год), что согласуется с ранее выявленными закономерностями. Значительная доля этих событий связана с усилением ОВР в стратосфере Азиатско-Тихоокеанского (АТ) региона в ноябре и декабре и иногда в январе (10 событий). Остальным событиям также предшествуют периоды аномального опрокидывания волн над АТ-регионом, однако начало событий связано с усилением опрокидывания волн над Атлантикой и Европой (АЕ). Три события характеризуются менее типичными условиями формирования, однако имеют общие черты с описанными событиями и требуют отдельного анализа.

2. Наряду с общепризнанной сложившейся классификацией сценариев деформации СПВ при ВСП (смещение и расщепление вихря) мы предлагаем более широкую классификацию по формам расщепления. Так, обнаружены два типа расщепления СПВ: медленное (декабрь 1987, 1998, 2001, 2018 гг.) при постепенном расширении антициклона АТ-региона и быстрое при одновременном усилении опрокидываний в АЕ- и АТ-регионах (декабрь 1984, январь 2009, декабрь 2000, февраль 2018 гг.). Кроме того, обнаружены смешанные формы, например для февраля 2001, 2010, января 2003 гг.

3. Выдвинуто предположение о природе «подготовительного» этапа ВСП. Периоды «подготовки» событий ВСП, отмечающихся до середины февраля, существенно отличаются от среднемоделетних периодов до середины февраля аномально высоким количеством ОВР и, вероятно, являются следствием аномалий тропосферно-стратосферного обмена в ранний зимний период (октябрь – декабрь).

4. Для рассматриваемых типов опрокидывания волн анализ выявил характерную перестройку полей температуры и геопотенциала с признаками, типичными для блокирующих ситуаций (инверсия меридионального градиента), которая сопровождалась выраженными отрицательными аномалиями приземной температуры. Поэтому увеличение количества ранних и средних главных событий ВСП согласуется с обнаруженными ранее закономерностями усиления отрицательного отклика приземной температуры на блокинг в Северном полушарии и увеличения количества опрокидываний в период подготовки к ВСП в стратосфере (ноябрь – декабрь). Подчеркнем, что необходим дальнейший поиск механизмов, приводящих к изменению основных паттернов циркуляции в поздний осенний – ранний зимний период и их связи с изменением волнового потока между тропосферой и стратосферой.

Важно отметить, что данные о формировании ВСП, используемые в настоящей работе, ограничиваются периодом <50 лет. Для дальнейших исследований представляется целесообразным использовать модельные расчеты и данные реанализа ERA5 начиная с 1940 г. Также необходимо рассмотреть малые события ВСП, которые, несмотря на меньшую амплитуду, могут играть значимую роль в динамике полярного вихря. Эти аспекты остаются за рамками настоящей работы, но их изучение необходимо для более полного понимания механизмов формирования ВСП.

Благодарности. Авторы выражают признательность старшему научному сотруднику отдела физики высоких слоев атмосферы ЦАО П.Н. Варгину за содержательную научную дискуссию и значимые рекомендации, которые существенно способствовали повышению научного уровня и улучшению восприятия текста. Авторы также выражают благодарность двум анонимным рецензентам за работу с текстом статьи и ценные замечания.

Финансирование. Разработка методики оценки ОВР, анализ и интерпретация результатов выполнены при поддержке РФФ (грант № 22-77-10008). Обработка и хранение данных реанализа выполнены с использованием сервера ИОА СО РАН в рамках госзадания, а также частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-947).

Список литературы

1. Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66, N 1. P. 83–109. DOI: 10.1029/jz066i001p00083.
2. McIntyre M.E., Palmer T.N. Breaking planetary waves in the stratosphere // *Nature*. 1983. V. 305, N 5935. P. 593–600. DOI: 10.1038/305593a0.
3. Krupchatnikov V.N., Borovko I.V. Rossby wave breaking and blocking events associated with some atmospheric circulation regimes in the Northern hemisphere

- based on a climate system model (PlaSim-ICMMG-1.0) // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 611. P. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012015.
4. Baldwin M.P., Ajarzagüena B., Birner T., Butchart N., Butler A.H., Charlton-Perez A.J., Domeisen D.I.V., Garfinkel C.I., Garny H., Gerber E.P., Hegglin M.I., Langematz U., Pedatella N.M. Sudden stratospheric warmings // *Rev. Geophys.* 2021. V. 59, N 1. DOI: 10.1029/2020rg000708.
 5. Зоркальцева О.С., Антохина О.Ю., Антохин П.Н. Долговременная изменчивость параметров внезапных стратосферных потеплений по данным реанализа ERA5 // *Оптика атмосф. и океана.* 2023. Т. 36, № 3. С. 200–208. DOI: 10.15372/AOO20230306; Zorkaltseva O.S., Antokhina O.Yu., Antokhin P.N. Long-term variations in parameters of sudden stratospheric warmings according to ERA5 reanalysis data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N 4. P. 370–378.
 6. Kim B.-M., Son S.-W., Min S.-K., Jeong J.-H., Kim S.-J., Zhang X., Shim T., Yoon J.-H. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea – ice loss // *Nat. Commun.* 2014. V. 5, N 1. DOI: 10.1038/ncomms5646.
 7. Lawrence Z.D., Perlwitz J., Butler A.H., Manney G.L., Newman P.A., Lee S.H., Nash E.R. The remarkably strong arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic oscillation and ozone loss // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2020. V. 125, N 22. DOI: 10.1029/2020jd033271.
 8. Цветкова Н.Д., Варгин П.Н., Лукьянов А.Н., Кирюшов Б.М., Юшков В.А., Хатматов В.У. Исследование химического разрушения озона и динамических процессов в стратосфере Арктики зимой 2019–2020 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2021. № 9. С. 70–83.
 9. Wohltmann I., Gathen P., Lehmann R., Deckelmann H., Manney G.L., Davies J., Tarasick D., Jepsen N., Kivi R., Lyall N., Rex M. Chemical evolution of the exceptional Arctic stratospheric winter 2019/2020 compared to previous Arctic and Antarctic winters // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126, N 18. DOI: 10.1029/2020jd034356.
 10. Антохина О.Ю., Гоцаков А.В., Зоркальцева О.С., Антохин П.Н., Крупчатников В.Н. Опрокидывание волн России в стратосфере. Часть I. Климатология и долговременная изменчивость // *Оптика атмосф. и океана.* 2024. Т. 37, № 5. С. 415–422. DOI: 10.15372/AOO20240509; Antokhina O.Yu., Gochakov A.V., Zorkaltseva O.S., Antokhin P.N., Krupchatnikov V.N. Rossby wave breaking in the stratosphere: Part I – Climatology and long-term variability // *Atmos. Ocean. Opt.* 2024. V. 37, N 4. P. 514–521.
 11. Sun L., Robinson W.A., Chen G. The predictability of stratospheric warming events: More from the troposphere or the stratosphere? // *J. Atmos. Sci.* 2012. V. 69, N 2. P. 768–783. DOI: 10.1175/jas-d-11-0144.1.
 12. Hitchcock P., Haynes P.H. Stratospheric control of planetary waves // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 22. DOI: 10.1002/2016gl071372.
 13. Martius O., Polvani L.M., Davies H.C. Blocking precursors to stratospheric sudden warming events // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36, N 14. DOI: 10.1029/2009gl038776.
 14. Peings Y. Ural blocking as a driver of early – winter stratospheric warmings // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46, N 10. P. 5460–5468. DOI: 10.1029/2019gl082097.
 15. Garfinkel C.I., Feldstein S.B., Waugh D.W., Yoo C., Lee S. Observed connection between stratospheric sudden warmings and the Madden-Julian Oscillation // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39, N 18. DOI: 10.1029/2012gl053144.
 16. Диденко К.А., Погорельцев А.И. Исследование взаимодействий стационарных планетарных волн с использованием модельных данных МСВА // *Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского.* 2020. № 674. С. 166–170.
 17. Holton J.M., Tan H.-C. The Quasi-Biennial Oscillation in the Northern Hemisphere Lower Stratosphere // *J. Met. Soc. Jpn. Ser. II.* 1982. V. 60, N 1. P. 140–148. DOI: 10.2151/jmsj1965.60.1_140.
 18. Okui H., Koshin D., Watanabe S., Sato K. Roles of gravity waves in preconditioning of a stratospheric sudden warming // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2024. V. 129, N 10. DOI: 10.1029/2023JD039881.
 19. Zhang Y., Yi Y., Ren X., Liu Y. Statistical characteristics and long-term variations of major sudden stratospheric warming events // *J. Meteorol. Res.* 2021. V. 35, N 3. P. 416–427. DOI: 10.1007/s13351-021-0166-3.
 20. Варгин П.Н., Кострыкин С.В., Ракушина Е.В., Володин Е.М., Погорельцев А.И. Исследование изменчивости дат весенних перестроек циркуляции стратосферы и объема полярных стратосферных облаков в Арктике по данным моделирования и реанализа // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2020. Т. 56, № 5. С. 1–13. DOI: 10.31857/S0002351520050119.
 21. Hauchecorne A., Claud C., Keckhut P., Mariaccia A. Stratospheric final warmings fall into two categories with different evolution over the course of the year // *Commun. Earth Environ.* 2022. V. 3, N 1. DOI: 10.1038/s43247-021-00335-z.
 22. Baldwin M.P., Dunkerton T.J. The stratospheric major warming of early December 1987 // *J. Atmos. Sci.* 1989. V. 46, N 18. P. 2863–2884. DOI: 10.1175/1520-0469(1989)046%3C2863:tismwoe%3E2.0.co;2.
 23. Manney G.L., Sabutis J.L., Swinbank R. A unique stratospheric warming event in November 2000 // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28, N 13. P. 2629–2632. DOI: 10.1029/2001gl012973.
 24. Mukougawa H., Hirooka T. Predictability of stratospheric sudden warming: A case study for 1998/99 winter // *Mon. Weather Rev.* 2004. V. 132, N 7. P. 1764–1776. DOI: 10.1175/1520-0493(2004)132%3C1764:posswa%3E2.0.co;2.
 25. Manney G.L. The remarkable 2003–2004 winter and other recent warm winters in the Arctic stratosphere since the late 1990s // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, N D4. DOI: 10.1029/2004jd005367.
 26. Naujokat B. The early major warming in December 2001 – exceptional? // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, N 21. DOI: 10.1029/2002gl015316.
 27. Rao J., Garfinkel C.I., Chen H., White I.P. The 2019 new year stratospheric sudden warming and its real – time predictions in multiple S2S models // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2019. V. 124, N 21. P. 11155–11174. DOI: 10.1029/2019jd030826.
 28. Randel W.J., Boville B.A. Observations of a major stratospheric warming during December 1984 // *J. Atmos. Sci.* 1987. V. 44, N 15. P. 2179–2186. DOI: 10.1175/1520-0469(1987)044%3C2179:ooamsw%3E2.0.co;2.
 29. Lu Q., Rao J., Liang Z., Guo D., Luo J., Liu S., Wang C., Wang T. The sudden stratospheric warming in January 2021 // *Environ. Res. Lett.* 2021. V. 16, N 8. P. 084029. DOI: 10.1088/1748-9326/ac12f4.
 30. Coy L., Eckermann S., Hoppel K. Planetary wave breaking and tropospheric forcing as seen in the stratospheric sudden warming of 2006 // *J. Atmos. Sci.* 2009. V. 66, N 2. P. 495–507. DOI: 10.1175/2008jas2784.1.
 31. Nath D., Chen W., Zelin C., Pogoreltsev A.I., Wei K. Dynamics of 2013 sudden stratospheric warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection // *Sci. Report.* 2016. V. 6, N 1. DOI: 10.1038/srep24174.

32. Harada Y., Goto A., Hasegawa H., Fujikawa N., Naoe H., Hirooka T. A major stratospheric sudden warming event in January 2009 // *J. Atmos. Sci.* 2010. V. 67, N 6. P. 2052–2069. DOI: 10.1175/2009jas3320.1.
33. Dörnbrack A., Pitts M., Poole L.R., Orsolini Y.J., Nishii Kazuaki, Nakamura H. The 2009–2010 Arctic stratospheric winter – general evolution, mountain waves and predictability of an operational weather forecast model // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 8. P. 3659–3675. DOI: 10.5194/acp-12-3659-2012.
34. Tyrlis E., Manzini E., Bader J., Ukita J., Nakamura H., Matei D. Ural blocking driving extreme Arctic Sea ice loss, cold Eurasia, and stratospheric vortex weakening in autumn and early winter 2016–2017 // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2019. V. 124, N 21. P. 11313–11329. DOI: 10.1029/2019jd031085.
35. Rao J., Ren R., Chen H., Yu Y., Zhou Y. The stratospheric sudden warming event in February 2018 and its prediction by a climate system model // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123, N 23. DOI: 10.1029/2018jd028908.
36. Steenrod S.D., Rood R.B., Lamich D.J., Rosenfield J.E., Govindaraju R.C. The minor stratospheric warming of January 1989: Results from STRATAN, a stratospheric – tropospheric data assimilation system // *Mon. Weather Rev.* 1992. V. 120, N 1. P. 221–229. DOI: 10.1175/1520-0493(1992)120%3C0221:TMSWOJ%3E2.0.CO;2.
37. Limpasuvan V., Thompson D.W.J., Hartmann D.L. The life cycle of the Northern hemisphere sudden stratospheric warmings // *J. Clim.* 2004. V. 17, N 13. P. 2584–2596. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<2584:tlcotn>2.0.co;2.
38. Boschat G., Simmons I., Purich A., Cowan T., Pezsa A.B. On the use of composite analyses to form physical hypotheses: An example from heat wave – SST associations // *Sci. Rep.* 2016. V. 6, N 1. P. 29599. DOI: 10.1038/srep29599.
39. Plumb R.A. On the three-dimensional propagation of stationary waves // *J. Atmos. Sci.* 1985. V. 42, N 3. P. 217–229. DOI: 10.1175/1520-0469(1985)042%3C0217:ottdpo%3E2.0.co;2.
40. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara Sh., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Bivattini G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez Ph., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
41. Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic stratosphere dynamical processes in the winter 2021–2022 // *Atmosphere.* 2022. V. 13, N 10. P. 1550. DOI: 10.3390/atmos13101550.
42. Labitzke K. Interannual variability of the winter stratosphere in the Northern hemisphere // *Mon. Weather Rev.* 1977. V. 105, N 6. P. 762–770. DOI: 10.1175/1520-0493(1977)105%3C0762:ivotws%3E2.0.co;2.
43. Chen B., Cui H., Qiao F., Zhang Z., Sun X., Gao C., Song Y. Causes of the extreme cold event in December 2023 on Eastern China // *Environ. Res. Commun. IOP Publishing.* 2024. V. 6, N 8. P. 081002. DOI: 10.1088/2515-7620/ad6bf7.
44. Zhang P., Wu Y., Simpson I.R., Smith K.L., Zhang X., De B., Callaghan P. A stratospheric pathway linking a colder Siberia to Barents-Kara Sea ice loss // *Sci. Adv.* 2018. V. 4, N 7. DOI: 10.1126/sciadv.aat6025.
45. Taguchi M. Is there a statistical connection between stratospheric sudden warming and tropospheric blocking events? // *J. Atmos. Sci.* 2008. V. 65, N 4. P. 1442–1454. DOI: 10.1175/2007jas2363.1.
46. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Зоркальцева О.С., Гочаков А.О., Мартынова Ю.В., Мордвинов В.И. Изменение отклика приземной температуры воздуха на колебания повторяемости блокирования в Атлантико-Евразийском секторе в осенне-зимний период // *Метеорол. и гидрол.* 2023. № 11. С. 5–19. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-11-5-19.

O.Yu. Antokhina, A.V. Gochakov, O.S. Zorkal'tseva, P.N. Antokhin, V.N. Krupchatnikov, M.F. Artaimonov. **Breaking of Rossby waves in the stratosphere. Part II. Factors leading to sudden stratospheric warmings.**

Based on a developed and adapted method for identifying Rossby wave breaking (RWB), which accounts for the specifics of stratospheric circulation, an analysis of the conditions for the occurrence of major sudden stratospheric warmings (SSWs) in the Northern Hemisphere was conducted. The method relies on examining the geometry of potential vorticity contours in the stratosphere at the 850 K level using ERA5 reanalysis data. It is shown that anomalous RWB processes in November and December play a key role in preparing for the onset of SSWs. Most of the analyzed SSW events are associated with an increase in the number of RWB events in the Asia-Pacific (AP) region in November and December, and occasionally in January. In cases where SSW initiation is linked to RWB over the Atlantic and Europe, it is also preceded by RWB anomalies in the AP region. For the identified types of wave breaking in the stratosphere, atmospheric blocking is characteristic in the troposphere, accompanied by negative near-surface temperature anomalies over Eurasia and/or North America. The increased frequency of early and middle major SSW events aligns with the previously identified trend of enhanced negative temperature responses to atmospheric blocking in the Northern Hemisphere.

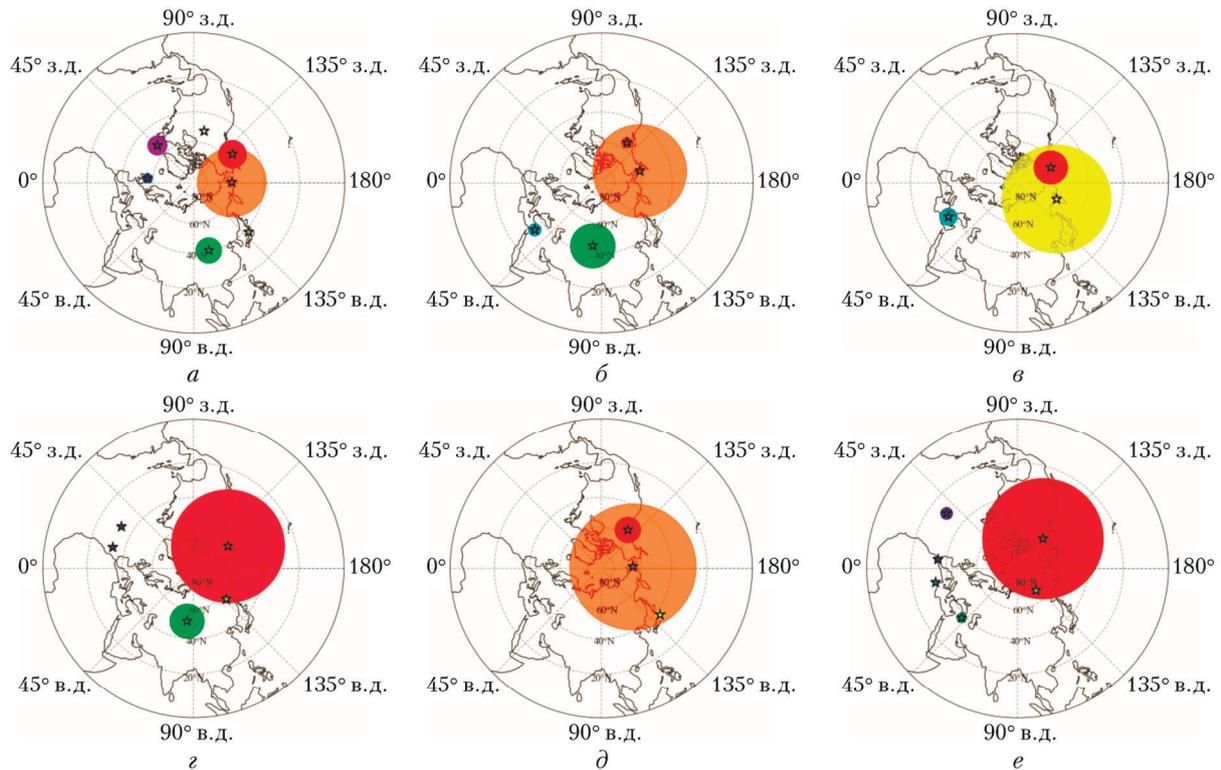


Рис. 1. Соотношение ОВР в центрах при преобладании процессов в АТ-регионе (размер кругов показан в соответствии с процентным вкладом опрокидывания, максимум отмечен в 2012 г. (95%), оранжевый круг), цвета кругов соответствуют цветам кластеров, используемым для диаграмм опрокидываний (<https://bit.ly/4f3W3DW>): ноябрь – декабрь 1984 г. (а); ноябрь – декабрь 1987 г. (б); ноябрь – декабрь 2001 г. (в); ноябрь – декабрь 2008 г. (г); ноябрь – декабрь 2012 г. (д); ноябрь – декабрь 2018 г. (е); звездочкой показан центр кластера

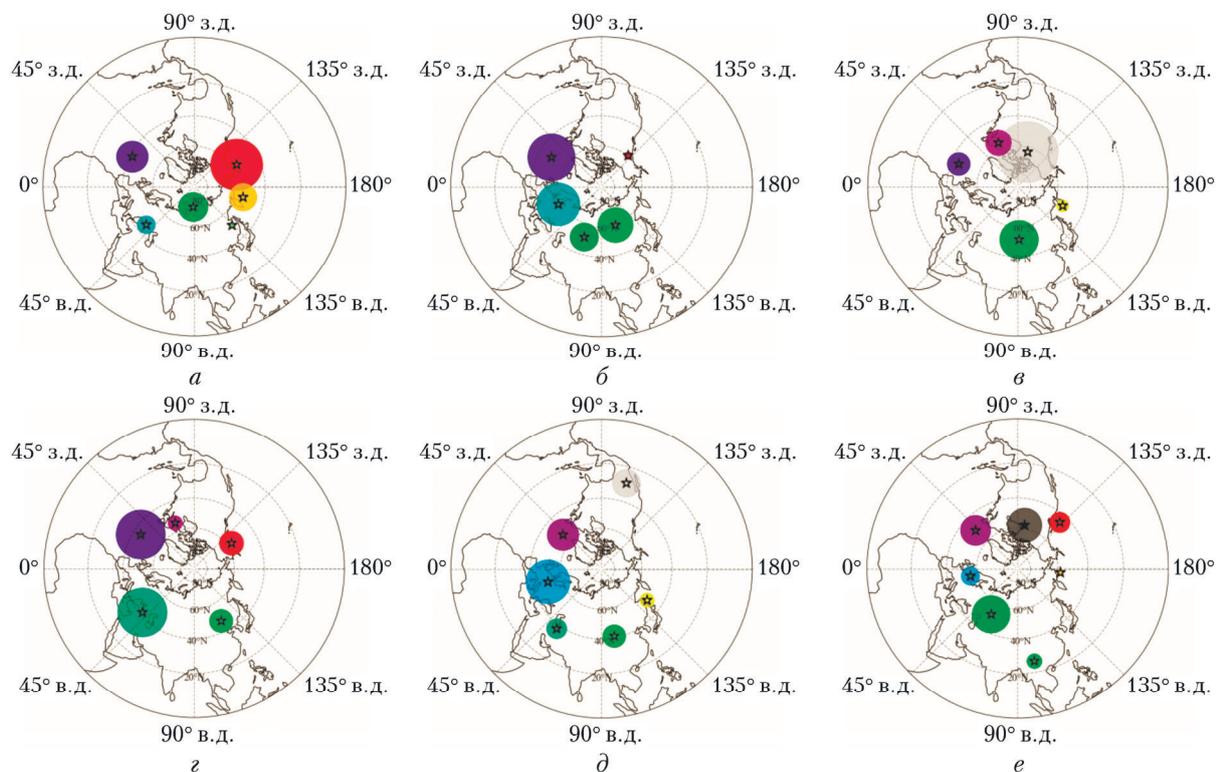


Рис. 2. Соотношение ОВР при преобладании процессов в АЕ-регионе: ноябрь – декабрь 2002 г. (а); январь 2003 г. (б); ноябрь – декабрь 2003 г. (в); ноябрь – декабрь 1986 г. (г); январь 2009 г. (д); январь 2017 г. (е)

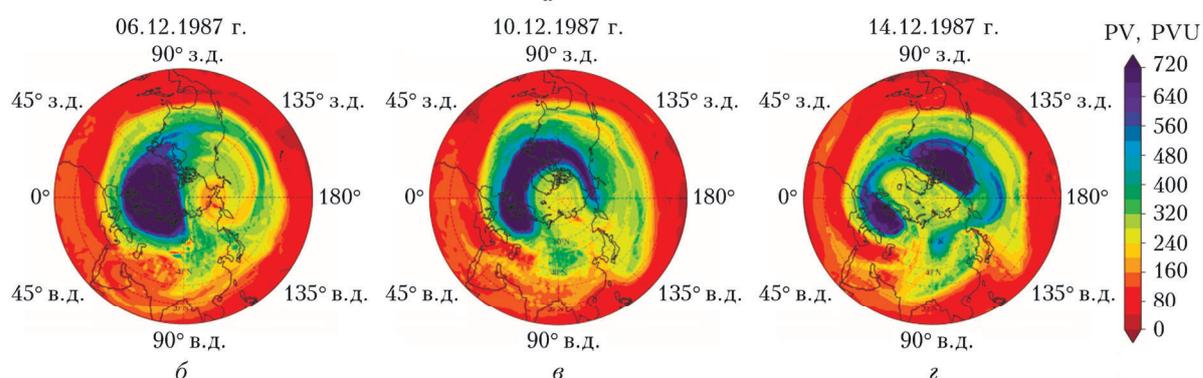
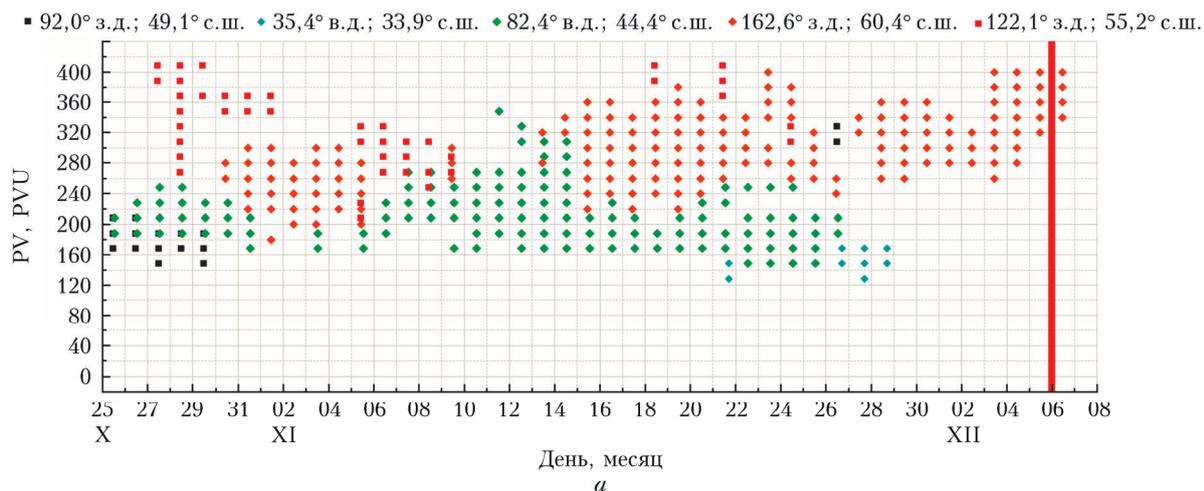


Рис. 3. Диаграмма ОВР в ноябре—декабре 1987 г. (красной линией показана дата возникновения ВСП) (*a*) и карты PV (PVU — единицы измерения PV) для ВСП (*б–з*)

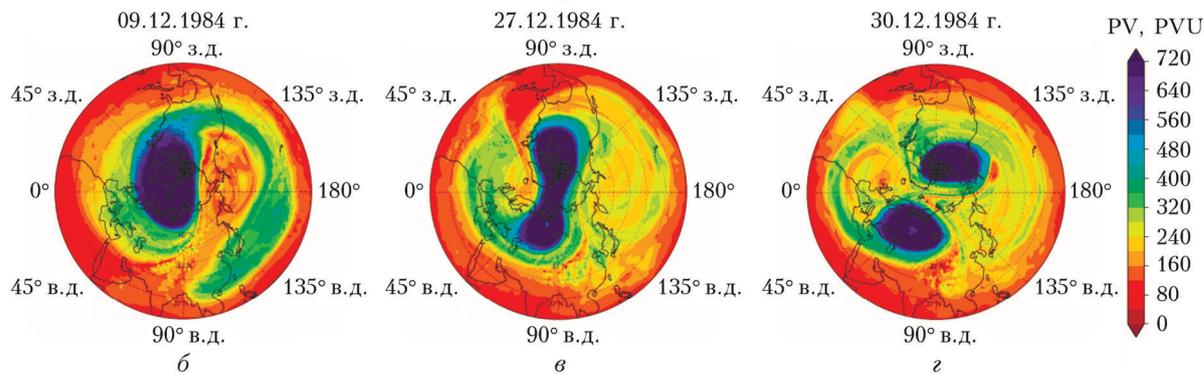
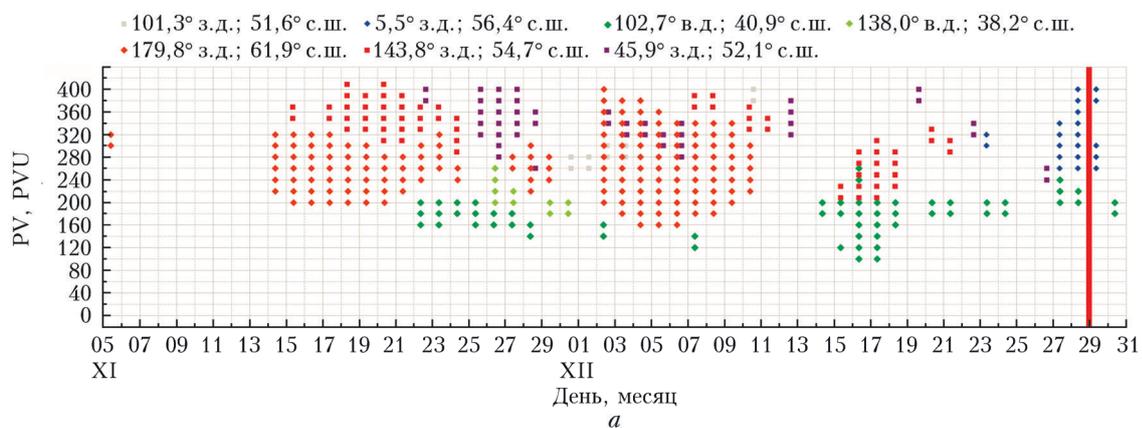


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для ноября—декабря 1984 г.

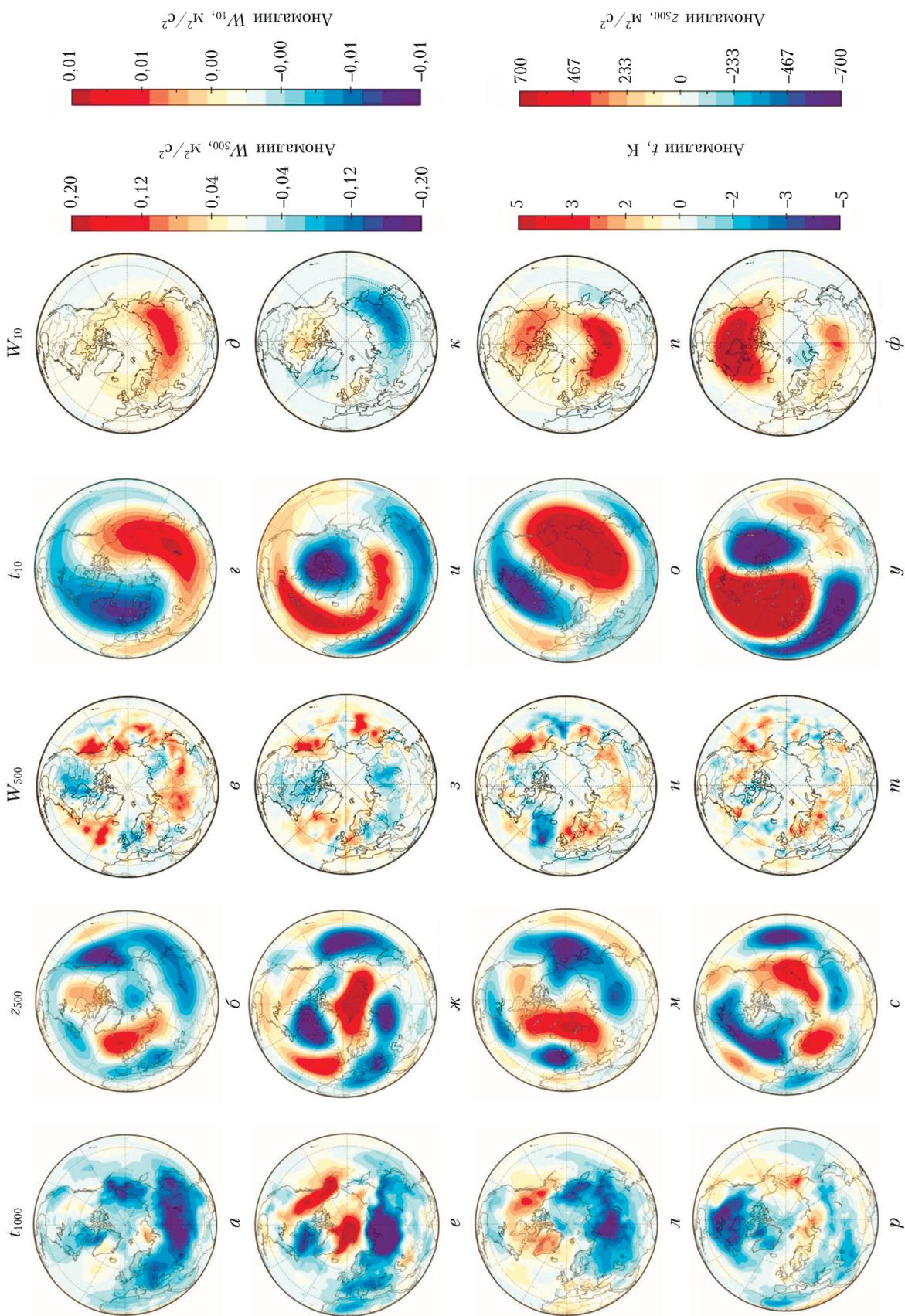


Рис. 5. Аномалии приземной температуры (t_{1000}) (а, е, л, р), температуры в стратосфере (t_{10}) (е, и, о, у) и геопотенциала на 500 гПа (z_{500}) (б, ж, м, с), потока волновой активности на 10 (W_{10}) (д, к, н, ф) и 500 гПа (W_{500}) (в, з, п, т) для ОВР 1-го (а-д); 2-го (е-ж); 3-го (л-н); 4-го (р-ф) типов