

УДК 551.513:551.510.532

СЕЗОННЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ЦИРКУЛЯЦИИ В СТРАТОСФЕРЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ТРОПОСФЕРОЙ И СТРАТОСФЕРОЙ

© 2023 г. Ю. П. Переведенцев^a, *, Н. В. Исмаилов^a, Н. А. Мирсаева^a, В. В. Гурьянов^a, А. А. Николаев^a, К. М. Шанталинский^a

^aКазанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, д. 18, Казань, 420008 Россия

*e-mail: ypereved@kpfu.ru

Поступила в редакцию 10.03.2023 г.

После доработки 12.07.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

На основе данных реанализа ERA5 получены даты весенних и осенних перестроек стратосферной циркуляции на изобарических поверхностях 30, 20 и 10 гПа в широтной зоне 30–90° с.ш. в период 1979–2020 гг. Из 42 случаев весенней перестройки к ранним относятся 10, к средним 15 и поздним 17. Разброс в датах весенних перестроек на поверхности 10 гПа составляет 69 дней. Наиболее часто весенняя перестройка циркуляции происходит сверху вниз, в отдельные годы задержка весенней перестройки на поверхности 30 гПа относительно поверхности 10 гПа достигает 22–25 дней. Осенние перестройки происходят снизу вверх и их сроки на 3-х рассматриваемых уровнях близки между собой. Показана связь сроков весенней перестройки стратосферной циркуляции с солнечной активностью и большими внезапными зимними стратосферными потеплениями. Анализ полей аномалий суточных значений температуры и зональной скорости ветра в слое 1000–1 гПа в период январь–май показал на их существенное пространственно-временное различие в случае ранних и поздних весенних перестроек. Так, очаги положительных аномалий температуры и скорости ветра формируются вначале в верхней стратосфере, а затем смещаются сверху вниз. Рассмотрены взаимосвязи между слоями атмосферы в различные сезоны.

Ключевые слова: стратосферная циркуляция, сезонные перестройки циркуляции, солнечная активность, данные реанализа, аномалии температуры и скорости ветра, корреляция

DOI: 10.31857/S000235152306007X, **EDN:** OQUOEQ

ВВЕДЕНИЕ

Изучению крупномасштабных атмосферных процессов, определяющих общую циркуляцию и термический режим тропосферы и стратосферы, характер взаимодействия между атмосферными слоями, по-прежнему уделяется большое внимание.

Так, в [Гурьянов и др., 2018] дан анализ волновой активности и ее изменений в тропосфере и стратосфере Северного полушария зимой в 1979–2016 гг., выявлена связь осредненных по спектру периодов волн с активностью внезапных стратосферных потеплений (ВСП). По современным представлениям большинство ВСП образуется в результате распространения волновой активности из тропосферы — нижней стратосферы. Однако, как показали модельные расчеты, часть ВСП

могут возникать благодаря внутренним динамическим процессам нелинейного взаимодействия планетарных волн со средним потоком [Baldwin et al., 2019; Pogoreltsev et al., 2015]. В [Переведенцев и др., 2019] рассмотрена пространственно-временная изменчивость температуры воздуха и массовой доли озона от уровня земли до высоты 64 км с использованием данных реанализа ERA-Interim за 1979–2016 гг. Анализ результатов моделирования термодинамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН представлен в [Варгин и Володин, 2016].

Исследования в области моделирования арктического циркумполярного вихря с привлечением эмпирических данных и данных реанализов позволили добиться значительных успехов в понимании влияния стратосферного полярного вихря на циркуляционные процессы в тропосфере [Baldwin et al., 2019; Kidston et al., 2015].

Особую роль в процессах взаимодействия тропосферы и стратосферы играют внезапные стратосферные потепления [Baldwin et al., 2021], которые приводят к деградации стратосферного полярного

Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на IV Всероссийской конференции с международным участием “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, посвященной памяти академика А.М. Обухова (Москва, 22–24 ноября 2022 г.).

вихря (главные ВСП), вызывая его смещение, либо расщепление на два вихря меньшего размера [Ayarzagüena et al., 2019].

Одной из важнейших особенностей стратосферной циркуляции (СЦ) является наличие ее сезонных перестроек — весной зимняя западная циклоническая циркуляция переходит в летнюю антициклоническую, а осенью процесс идет в обратном направлении — восточные потоки заменяются западными. При этом даты перестроек, особенно весенних, испытывают большой межгодовой разброс. Теме сезонных перестроек СЦ посвящен ряд работ [Бакулина и др., 2009; Переведенцев и др., 1999; Тарасенко, 1988]. В более ранних работах по изучению циркуляционных процессов в стратосфере [Педь, 1973; Пчелко, 1959] было показано, что весенние перестройки СЦ с зимнего на летний режим происходят в период с середины марта до первой декады мая. Учитывая большой межгодовой разброс сроков весенней перестройки СЦ, в работе [Бакулина и Угрюмов, 2008] было предложено разделять их на ранние, средние и поздние. Было принято, что дата 5 апреля разделяет сроки ранних и средних перестроек, а 26 апреля — средние и поздние перестройки. В авторской статье [Переведенцев и др., 1999] был рассмотрен характер сезонных перестроек циркуляции на изобарических поверхностях 30 и 10 гПа в 1977–1990 гг. для широтных зон 70–50, 50–35 и 70–35° с.ш.

Исследования весенних и осенних перестроек СЦ имеют и практическое значение, поскольку сроки сезонных перестроек циркуляции в стратосфере используются при долгосрочном прогнозировании погоды в различных регионах Северного полушария (СП) [Бакулина и др., 2009; Гечайте и др., 2016; Савенкова и Погорельцев, 2010].

Цель данной работы — анализ весенних и осенних перестроек стратосферной циркуляции на изобарических поверхностях 30, 20 и 10 гПа в широтной зоне 30–90° с.ш. по данным реанализа ERA5 для 1979–2020 гг.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В качестве исходных данных использовались срочные данные (0, 6, 12, 18 ч.) о полях геопотенциала Северного полушария на изобарических поверхностях 10, 20 и 30 гПа в узлах географической сетки 2.5° широты × 2.5° долготы за 1979–2020 гг., представленные в реанализе ERA5 [Hersbach et al., 2020]. По исходным данным рассчитывались среднесуточные значения геопотенциала в узлах сетки и ежедневные значения индекса зональной циркуляции атмосферы А.Л. Каца (I_3) в широтной зоне 30–90° с.ш. по формуле:

$$I_3 = (H_1 - H_2)/(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (1)$$

где H_1 и H_2 — значения абсолютных геопотенциалов, осредненных вдоль граничных широт φ_1 и φ_2 рассматриваемых зон.

Сроки сезонных перестроек стратосферной циркуляции определялись по годовому ходу ежедневных значений зонального индекса I_3 в указанной широтной зоне. За дату весенней перестройки циркуляции принималась дата устойчивого перехода зонального индекса от положительных значений (зимняя западная циркуляция) к отрицательным значениям (летняя восточная циркуляция).

Необходимо отметить, что во время весенних перестроек, после перехода к восточной циркуляции, довольно часто наблюдается возврат западной циркуляции и далее происходит повторный, уже окончательный, переход к восточной циркуляции. В таких случаях был использован подход, предложенный в работе [Педь, 1973]. Для определения момента перестройки интенсивность и продолжительность восточной циркуляции после первоначального перехода сравнивалась с интенсивностью и продолжительностью западной циркуляции после возврата. Если сумма отрицательных ежедневных значений зонального индекса Каца после первоначальной смены циркуляции по абсолютной величине оказывалась больше суммы положительных значений зонального индекса после возврата, то за дату перестройки принималась дата первоначального перехода к восточной циркуляции, и, наоборот, для осенней перестройки стратосферной циркуляции. Оценка интенсивности и продолжительности возвратной циркуляции позволяет, на наш взгляд, наиболее гибким и корректным способом определять даты сезонных перестроек в случае неустойчивого их осуществления [Переведенцев и др., 1999].

Дополнительно анализировалось вертикальное распределение в слое от 1000 до 1 гПа аномалии температуры воздуха и зональной скорости ветра, рассчитанных для ранних, средних и поздних перестроек в период с 1 января по 31 мая для широтной зоны 60–90° с.ш. по данным реанализа ERA5 (1979–2020 гг.). Для оценки степени взаимосвязанности в поле температуры между уровнями рассчитывались коэффициенты корреляции для внетропической зоны СП для различных сезонов года.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Сравнительный анализ дат весенних (ДВ) и осенних (ДО) перестроек циркуляции в стратосфере показал, что в слое 10–30 гПа весенняя перестройка циркуляции чаще всего происходит сверху вниз (в 29 случаях из 42), что находит свое отражение и в средних многолетних датах: на уровне 10 гПа перестройка осуществляется 18 апреля, на уровне 20 гПа — 19 апреля, на уровне 30 гПа — 23 ап-

Таблица 1. Типы и даты весенних перестроек стратосферной циркуляции на изобарической поверхности 10 гПа в 1979–2020 гг.

Тип перестройки					
Ранняя		Средняя		Поздняя	
год	дата	год	дата	год	дата
1982	5 апреля	1980	7 апреля	1979	3 мая
1985	24 марта	1983	24 апреля	1981	11 мая
1986	21 марта	1988	8 апреля	1984	4 мая
1992	25 марта	1989	25 апреля	1987	6 мая
1994	2 апреля	1991	10 апреля	1990	11 мая
1998	28 марта	1993	16 апреля	1997	28 апреля
2005	13 марта	1995	6 апреля	1999	3 мая
2014	28 марта	1996	10 апреля	2001	14 мая
2015	3 апреля	2000	12 апреля	2002	7 мая
2016	7 марта	2003	16 апреля	2004	30 апреля
		2007	22 апреля	2006	12 мая
		2011	7 апреля	2008	8 мая
		2012	19 апреля	2009	10 мая
		2017	8 апреля	2010	3 мая
		2019	21 апреля	2013	2 мая
				2018	6 мая
				2020	2 мая

реля. Межгодовая изменчивость дат весенних перестроек увеличивается с высотой: величина среднего квадратического отклонения (СКО) составляет 15 дней на уровне 30 гПа, 17 дней на уровне 20 гПа и 18 дней на уровне 10 гПа.

В табл. 1 представлены типы и даты весенних перестроек СЦ на изобарической поверхности 10 гПа.

Сроки весенних перестроек на уровнях 10 и 20 гПа достаточно близки между собой и в 33 случаях из 42 разница в сроках по модулю не превышает 3 дней. Коэффициент линейной корреляции (r) между ДВ на уровнях 10 и 20 гПа составляет $r = 0.97$. Сроки весенних перестроек на уровнях 10 и 30 гПа отличаются сильнее, в отдельные годы разница может достигать 22–25 (1986, 2005, 2014, 2017 гг.) и даже 40 дней (1992 г.). В эти годы весенняя перестройка циркуляции на уровнях 10 и 20 гПа происходила в ранние сроки (2 декада марта – 1 декада апреля), а на уровне 30 гПа еще достаточно долго сохранялся зимний режим циркуляции. Поздние перестройки осуществляются более синхронно на рассматриваемых уровнях; разница в ДВ не превышает 10 дней. Коэффициент линейной корреляции между ДВ на уровнях 10 и 30 гПа составляет $r = 0.84$.

Осенняя перестройка циркуляции в слое 10–30 гПа происходит снизу вверх, что находит свое отражение в средних многолетних значениях ДО: 2 сентября – на уровне 30 гПа, 4 сентября – на уровнях 20 и 10 гПа. Межгодовая изменчивость

дат осенних перестроек уменьшается с высотой: СКО составляет 4 дня на уровне 30 гПа и 3 дня на уровнях 20 и 10 гПа. Сроки осенних перестроек на трех уровнях близки между собой, во всех случаях разница в сроках по модулю не превышает 5 дней. Коэффициент линейной корреляции между ДО на уровнях 10 и 20 гПа составляет 0.87, на уровнях 20 и 30 гПа $r = 0.94$, на уровнях 10 и 30 гПа $r = 0.82$.

Исследовалась также связь между весенними и осенними перестройками циркуляции в стратосфере, однако значимых коэффициентов корреляции между датами весенних и осенних перестроек циркуляции на исследуемых уровнях не обнаружено:

В многолетнем ходе отмечается слабый положительный тренд в датах весенних перестроек (смещение к более поздним перестройкам) и слабый отрицательный тренд в датах осенних перестроек (смещение к более ранним перестройкам), причем на уровне 30 гПа эти тенденции выражены сильнее.

С целью оценки продолжительности летней восточной циркуляции в стратосфере на уровне 10 гПа за длительный период рассчитывались даты весенних и осенних перестроек в период 1961–2020 гг. На рис. 1 представлен многолетний ход продолжительности летней восточной циркуляции, согласно которому наблюдается слабая тенденция его сокращения по линейному тренду. Низкочастотная компонента этого ряда (фильтрация колебаний с периодом менее 10 лет) выделяет квазидвадцатилетние колебания, возможно связанные с солнечной активностью.

Следует отметить, что в рассматриваемом слое стратосферы 30–10 гПа в широтной зоне 30–90° с.ш. наблюдается похолодание во все сезоны года со скоростью $-0.34^\circ\text{C}/10$ лет летом, поэтому происходит сокращение “теплого” периода года в отличие от приземной атмосферы, где происходит увеличение продолжительности летнего периода в условиях потепления климата.

С целью оценки возможного влияния солнечной активности на характер сезонной перестройки СЦ совместно рассматривались многолетний ход дат весенних перестроек стратосферной циркуляции на уровне 10 гПа (в днях от начала года) (рис. 2), в котором с помощью фильтра Поттера была выделена низкочастотная компонента с продолжительностью периода более 10 лет (левая шкала) и показатели солнечной активности – числа Вольфа (правая шкала).

Анализ данных рис. 2 показывает, что наблюдается знакопеременная связь между низкочастотной составляющей в многолетнем ходе сроков весенней перестройки циркуляции в средней стратосфере и солнечной активностью. В период 1979–2004 гг. максимумы и минимумы низкочастотной компоненты весенних перестроек соот-

ветствуют максимумам и минимумам в многолетнем ходе чисел Вольфа: коэффициент линейной корреляции между показателями СЦ и солнечной активности составил $r = 0.70$. Однако, в дальнейшем положительная связь меняется на отрицательную: периоды повышенной солнечной активности соответствуют более ранним весенним перестройкам стратосферной циркуляции и, наоборот. Коэффициент корреляции в период 2005–2020 гг. составил $r = -0.54$.

Подобная знакопеременная связь выявлена также между солнечной активностью и сроками осенней перестройки циркуляции в средней стратосфере. Коэффициент корреляции между датами осенних перестроек и числами Вольфа в период 1979–1998 отрицательный и равен $r = -0.35$, а в период 1999–2020 корреляция становится положительной $r = 0.79$.

На сроки весенних перестроек стратосферной циркуляции оказывают влияние зимние стратосферные потепления, вызванные процессами динамического взаимодействия стратосферы с тропосферой [Бугаева и Рязанова, 1987]. Как известно, в стратосфере примерно дважды за 3 года происходят внезапные стратосферные потепления (ВСП), приводящие к росту температуры и смене направления циркуляции. В данной работе учитывались только сильные зимние стратосферные потепления, во время которых происходила смена стратосферной циркуляции с западной на восточную во внетропических широтах северного полушария и среднесуточные индексы зональной циркуляции Каца на уровне 10 гПа в широтной зоне $30\text{--}90^\circ$ с.ш. становились отрицательными. Соответственно, в качестве даты зимнего стратосферного потепления была взята дата (в днях от начала года) перехода индекса Каца от положительных значений к отрицательным.

Как видно из рис. 3 наблюдается тенденция к более ранним весенним перестройкам при наличии ранних зимних и поздних (финальных) потеплений.

На срок весенней перестройки циркуляции в стратосфере влияет не только время осуществления сильных зимних потеплений, но и их интенсивность. В качестве характеристики интенсивности стратосферного потепления использовалось значение модуля суммы отрицательных ежедневных значений индекса Каца в период осуществления сильного стратосферного потепления. Получено, что с увеличением интенсивности зимнего стратосферного потепления весенняя перестройка происходит в более поздние сроки; коэффициент корреляции между интенсивностью стратосферного потепления и датой весенней перестройки составляет $r = 0.65$ (рис. 4). Привлечение сведений о больших ВСП из работы [Агеева и др., 2017] вполне согласуется с полученным результатом.

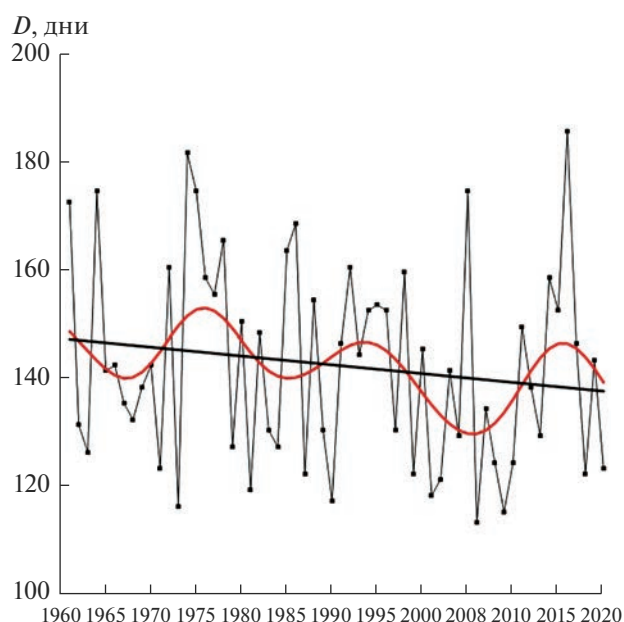


Рис. 1. Продолжительность (в днях) летней восточной циркуляции на уровне 10 гПа.

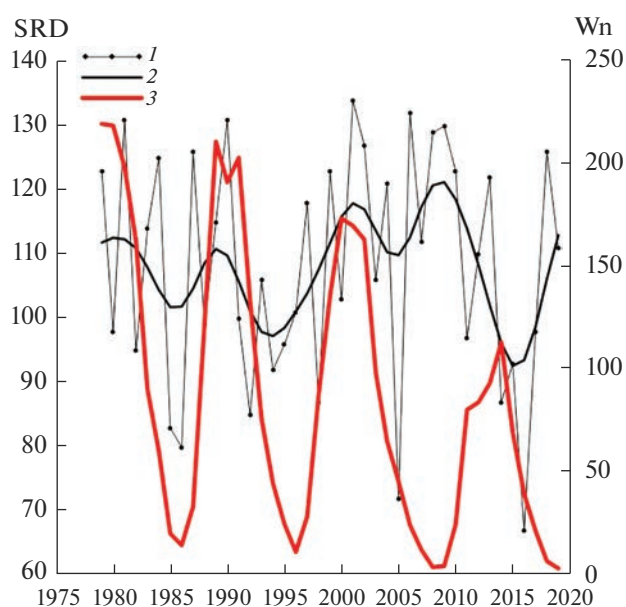


Рис. 2. Даты весенних перестроек циркуляции в стратосфере на уровне 10 гПа (SRD дни от начала года) и числа Вольфа (Wn). 1 — исходный ряд дат весенних перестроек, 2 — низкочастотная компонента с периодом более 10 лет дат весенних перестроек, 3 — числа Вольфа.

Сильные зимние потепления в стратосфере осуществляются не каждый год, поэтому для оценки связи между сроком весенней перестройки в стратосфере и особенностями стратосферной циркуляции в предшествующий зимний период были вычислены коэффициенты линейной

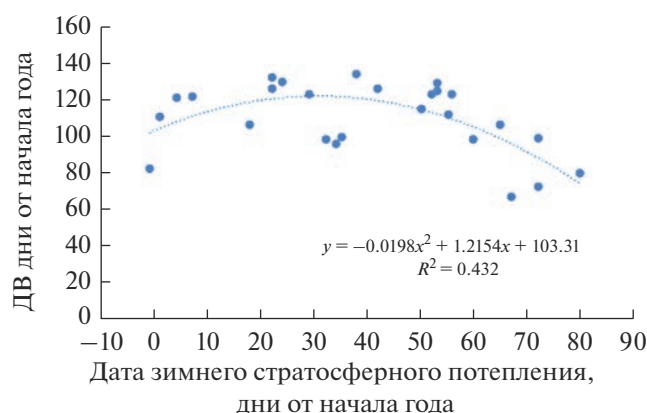


Рис. 3. Зависимость даты весенней перестройки стратосферной циркуляции от даты зимнего стратосферного потепления (10 гПа, 30–90° с.ш.).

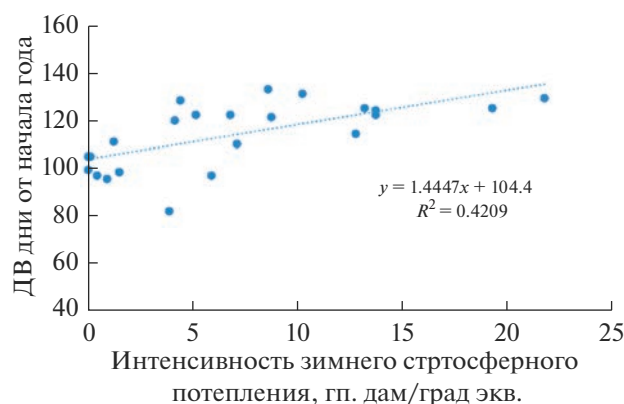


Рис. 4. Зависимость даты весенней перестройки циркуляции в стратосфере от интенсивности зимнего стратосферного потепления (10 гПа, 30–90° с.ш.).

корреляции между датами весенних перестроек и среднесуточными значениями индекса Каца в январе–феврале. Наилучшая связь отмечается со значениями индекса Каца 15 февраля; чем больше интенсивность зональной циркуляции в этот день, тем в более ранние сроки происходит весенняя перестройка в средней стратосфере, коэффициент корреляции составил $r = -0.54$.

В настоящее время принято считать, что тропосфера, стратосфера и мезосфера образуют единую динамическую систему, внутри которой происходит взаимодействие между слоями посредством волнового механизма, с помощью которого возмущения метеорологических полей, обусловленные бароклинностью атмосферы, неоднородным нагревом подстилающей поверхности и орографией, передаются из тропосферы в стратосферу [Холтон, 1979].

Для оценки связи между сроками весенних перестроек стратосферной циркуляции и припо-

верхностной температурой воздуха были рассчитаны коэффициенты корреляции между датами весенних перестроек стратосферной циркуляции на уровне 10 гПа в широтной зоне 30–90° с.ш. и среднemesячными значениями приповерхностной температуры воздуха в узлах географической сетки 1° широты $\times$ 1° долготы Северного полушария. Для объема выборки в 42 года и доверительной вероятности 95% линейный коэффициент корреляции (r) считался значимым, если $|r| > 0.31$.

Анализ пространственного распределения коэффициентов корреляции показал, что в январе–марте над Тихим океаном отмечаются области значимой корреляции — отрицательная корреляция на востоке Тихого океана (у побережья Северной Америки) и положительная корреляция в центральной и западной части Тихого океана. Следует отметить, что схожая локализация наблюдается у Тихоокеанского десятилетнего колебания, для которого характерно увеличение или уменьшение температуры водной поверхности в Тихом океане к северу от 20° с.ш. с периодом 20–30 лет. Во время теплой (положительной) фазы колебания на западе Тихого океана происходит похолодание, на востоке — потепление, для холодной (отрицательной) фазы характерно противоположное распределение температур. Большую часть исследуемого периода 1979–2010 гг. преобладала положительная фаза Тихоокеанского колебания, что возможно, отразилось на механизме формирования весенних перестроек СЦ. На важную роль Тихоокеанской десятилетней осцилляции в динамике атмосферных и гидрологических явлений указано в работе [Мохов, 2021].

Подобная картина отмечается и над Атлантическим океаном — отрицательная корреляция на западе Атлантического океана (у побережья Северной Америки) и положительная корреляция на востоке океана. Однако здесь области значимой корреляции существенно меньше по площади, чем в Тихом океане (возможно из-за меньших размеров Атлантического океана).

Возможно, что особенности распределения приповерхностной температуры в январе–марте влияют на возникновение сильных зимних стратосферных потеплений благодаря волновому взаимодействию тропосферы и стратосферы, которые в свою очередь, оказывают влияние на сроки весенних перестроек стратосферной циркуляции, что требует специального исследования.

Известно, что сезонные перестройки СЦ сопровождаются термобарическими преобразованиями в атмосфере. С целью выявления пространственно-временных различий в полях температуры воздуха и зональной скорости ветра для широтной зоны 60–90° с.ш. и слоями атмосферы (1000–1 гПа) по данным реанализа ERA5 рассчитывались аномалии среднесуточной температуры

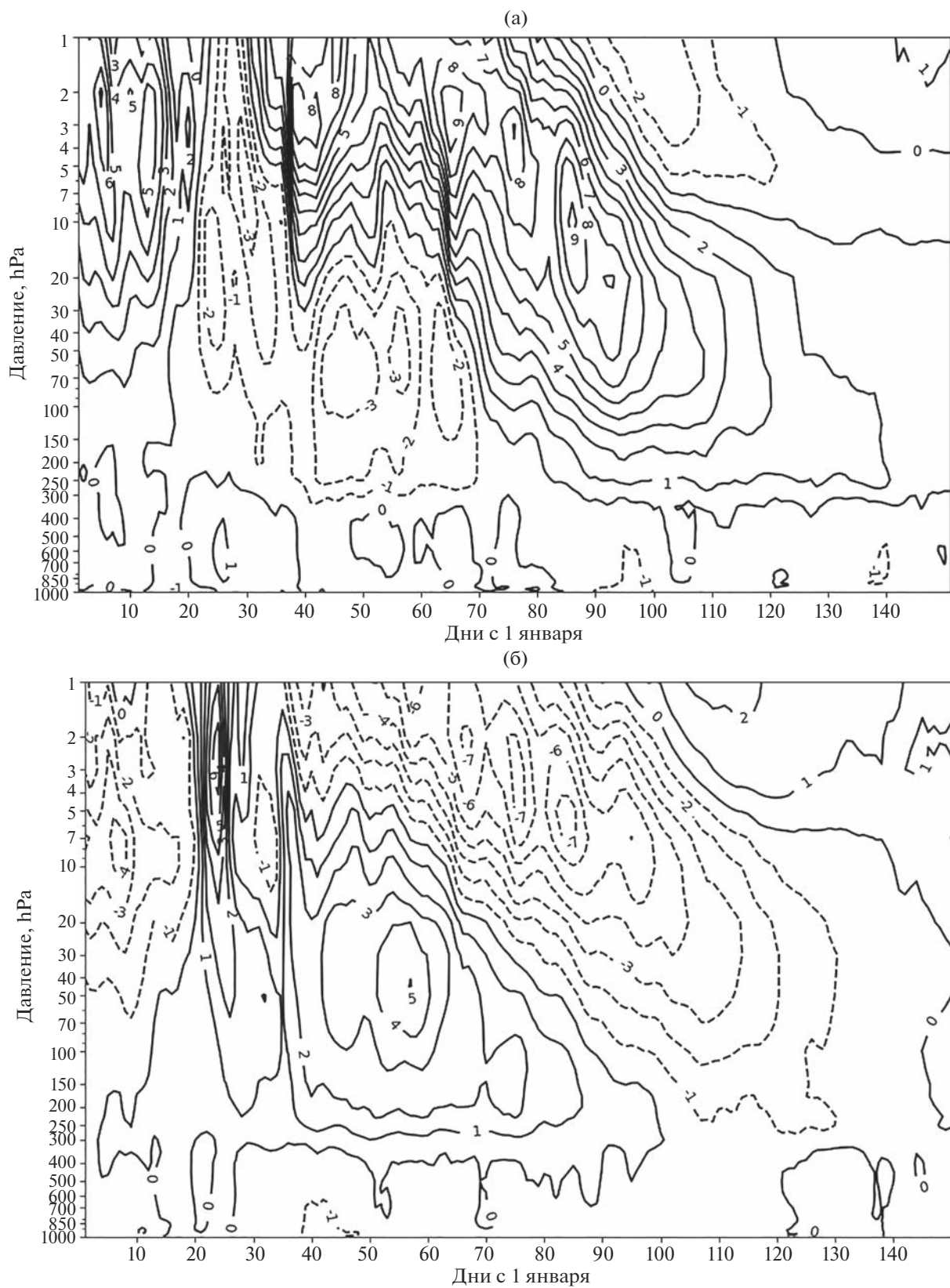


Рис. 5. Распределение в слое 1000–1 гПа в период январь–май (1979–2020 гг.) аномалий температуры ($^{\circ}\text{C}$): а – случай ранних перестроек СЦ; б – поздние перестройки СЦ

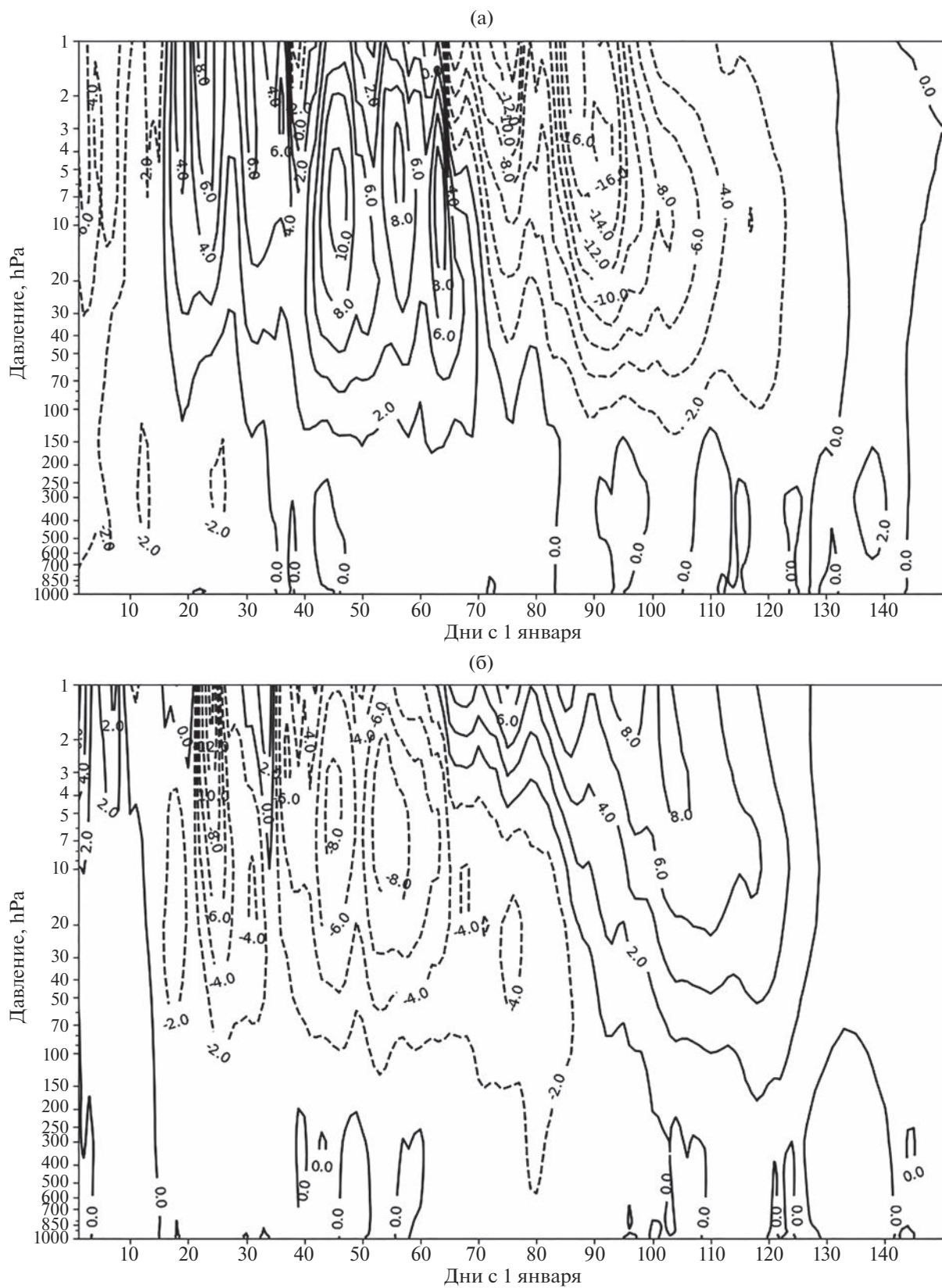


Рис. 6. Распределение в слое 1000–1 гПа в период январь–май (1979–2020 гг.) аномалий скорости ветра (м/с): а – случай ранних перестроек СЦ; б – поздние перестройки СЦ; в – разность композитов поздних и ранних перестроек (точками выделены области со значимостью 95% и более).

(В)

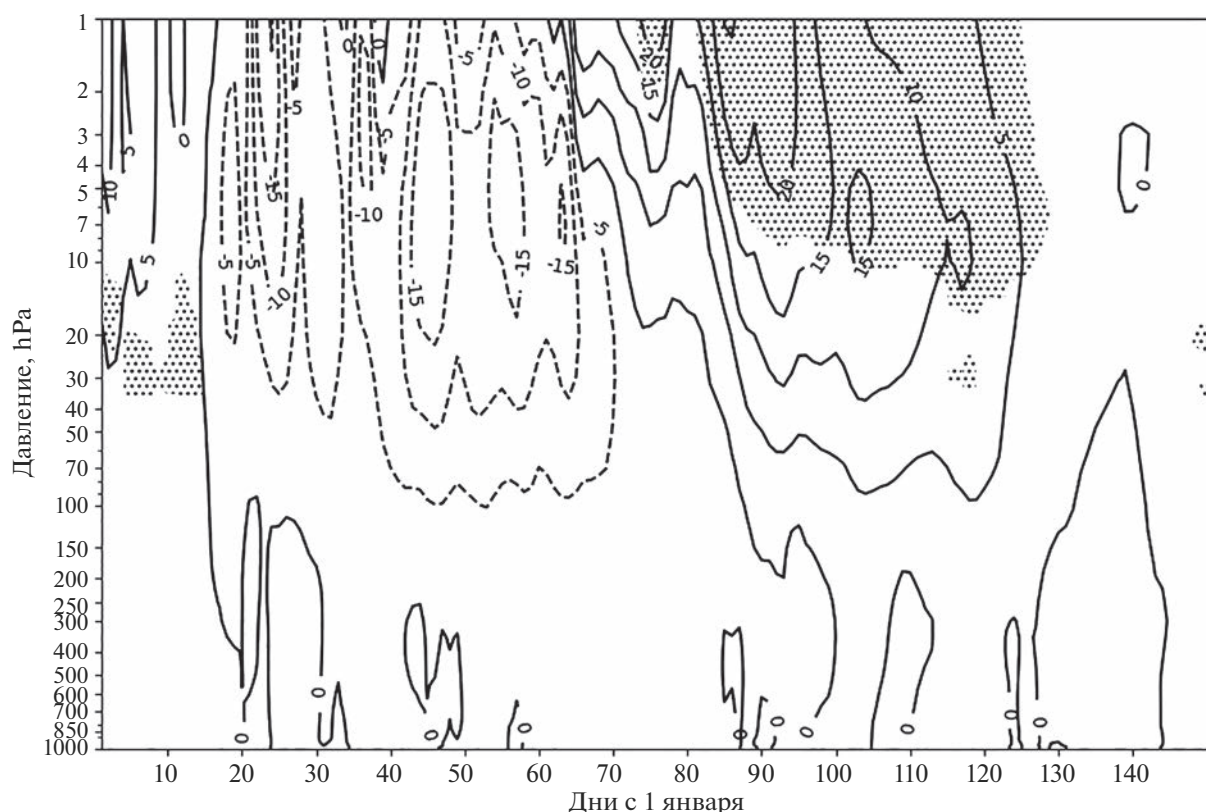


Рис. 6. Окончание

воздуха (Δt) и скорости зонального ветра (Δu) для 3-х типов сезонных перестроек СЦ — ранней, средней и поздней. В качестве временного интервала рассматривался период январь-май (с 1 января по 31 мая). Климатическая норма рассчитывалась за 1991–2020 гг.

Рассмотрим динамику аномалий среднесуточных температур воздуха в слое 1000–1 гПа в период 1 января–31 мая за 42-летний период (1979–2020 гг.) в широтной зоне 60–90° с.ш. В случае ранней перестройки в слое 300–1 гПа с 65 дня от начала года до конца мая возникает аномалия тепла, с максимумом $\Delta t = +9^\circ\text{C}$ в слое 30–4 гПа в последних числах марта (рис. 5а). В случае средних перестроек поле аномалий температуры положительно (Δt достигают до 3°C) во всей толще атмосферы от 1000 до 1 гПа в период 60–150 суток. При этом максимальные значения Δt отмечаются в слое 10–1 гПа. При поздней перестройке СЦ формируется обширный очаг отрицательных температур в период 60–120 суток от начала года (с максимумом $\Delta t = -7^\circ\text{C}$ выше уровня 10 гПа на 85 суток от начала года). Положительная аномалия температуры возникает лишь в слое 10–1 гПа ($\Delta t = 2^\circ\text{C}$) с 95 суток от начала года (рис. 5б). Следует отметить контрастность в поле температуры

в ранние и поздние перестройки СЦ. Если в первом случае формируется обширная область положительных аномалий температуры, то во втором — отрицательных. По своей структуре очаги тепла и холода имеют сходные черты. Таким образом, в случае ранней перестройки СЦ в обширной высотно-временной зоне формируется область повышенных температур (тепла), а при поздней перестройке — область холода. При этом наблюдается смещение зон тепла и холода во времени с более высоких уровней в нижние.

Анализ рассчитанных суточных аномалий зональной циркуляции Δu (м/с) для различных по срокам весенних перестроек СЦ показывает на их существенное различие. В случае ранней перестройки в широтной зоне 60–89° с.ш. в слое 50–1 гПа в феврале формируется очаг положительных аномалий зональной скорости. В начале апреля Δu достигает в слое 20–7 гПа -16 м/с (рис. 6а). В случае средней по срокам перестройки пространственно-временных контрастов в поле зональной скорости ветра не наблюдается. Лишь в слое 10–1 гПа наблюдается смена знака аномалий величины Δu . Однако, начиная, с марта в слое 5–1 гПа появляется зона отрицательных аномалий, которая в период 100–130 суток от начала года проявляется и

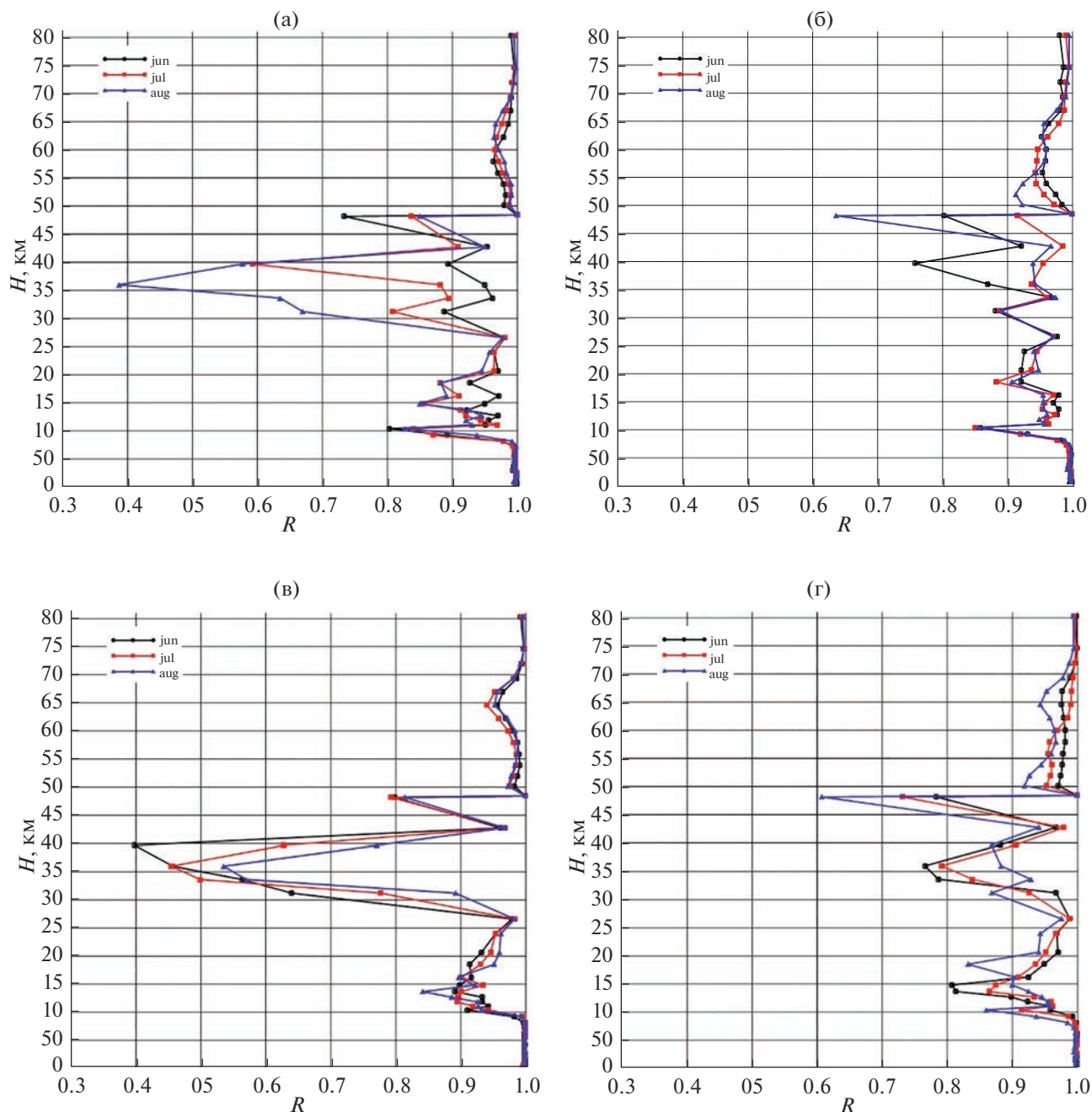


Рис. 7. Профиль коэффициента корреляции температуры соседних уровней во внетропической зоне СП.

в слое 100–1 гПа ($\Delta u = -4$ м/с). При поздней перестройке СЦ в толще 100–1 гПа формируется картина распределения Δu противоположная обстановке в случае ранней перестройки. Так, в период 20–80 сут в стратосфере преобладают очаги отрицательной аномалии u , достигающие на уровне 10 гПа значения -8 м/с. Однако, начиная с 70 суток от начала года, начиная с верхних уровней (с 1 гПа) с задержкой на более низких уровнях формируется область с положительными значениями Δu , достигающими на уровне 4 гПа 8 м/с (рис. 6б). На рис. 6в представлены разности между компо-

зитами поздних (рис. 6б) и ранних (рис. 6а) перестроек. Области значимых (t -тест, 95%) разностей выделены точками. Основные области значимых разностей соответствуют их положительным значениям, что соответствует положительным Δu для поздних перестроек и отрицательным Δu для ранних перестроек в верхней (с середины марта по апрель) и средней (первая половина января) стратосфере. Первое может быть объяснено восстановлением западной циркуляции после главных ВСП в январе–феврале.

Для оценки степени вертикальной взаимосвязанности между слоями атмосферы рассчитывались коэффициенты корреляции (r) между температурой соседних уровней для внетропической зоны СП от уровня земли до 80 км для всех месяцев 4-х сезонов — зимы, весны, лета и осени. Как видно из рис. 7, в весенние месяцы корреляция между соседними уровнями в слое 0–26 км тесная ($r > 0.8$), высокие значения величины r в слое 50–80 км ($r > 0.9$), однако в слое 26–43 км, где происходят весенние перестройки, связи между соседними уровнями ослабевают, особенно в мае. На уровне 36 км величина r в мае понижается до значения 0.39. Следует отметить, что и во все летние месяцы в слое 26–43 км наблюдается уменьшение r (в июне на уровне 40 км $r = 0.4$). Весенние и летние вертикальные профили величины r имеют внешнее сходство, особенно для мая и июня. В осенний период связи в поле температуры ослабевают под стратопазой (в ноябре $r \sim 0.6$ на уровне 47 км). Связи между соседними уровнями с 10 до 45 км достаточно тесные (r изменяется от 0.76 до 0.98). Структура связей более сложная в слое 10–30 км, так как осенняя перестройка СЦ начинается снизу. В зимние месяцы картина наиболее однородная. Между соседними уровнями коэффициенты корреляции высокие ($r > 0.8$) и лишь под стратопазой в декабре r понижается до 0.64. Корреляционные связи значимы, т.к. во всех случаях $r > 0.3$ (при данном объеме выборки значимыми с вероятностью 95% являются все коэффициенты $r \geq 0.31$).

В целом, как это видно из рис. 7, наиболее сложной структурой связей в поле температуры между соседними уровнями отличается весенний период, что связано с перестройками стратосферной циркуляции.

Рассмотрение профилей r рассчитанных между уровнем 1000 гПа и всеми вышележащими во внетропической зоне показывает об ослаблении связей в поле температуры между уровнями с высотой. При переходе тропопазы r становится отрицательным, что свидетельствует о противоположном характере процессов в тропосфере и стратосфере. Так, в сентябре $r = -0.8$ на высоте 25 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных реанализа для периода 1979–2020 гг. получены количественные показатели сезонных перестроек стратосферной циркуляции на изобарических поверхностях 30, 20 и 10 гПа в широтной зоне 30–90° с.ш. Показано, что весенняя перестройка циркуляции чаще всего происходит сверху вниз, что находит свое отражение в средних многолетних значениях дат перестроек: 18 апреля на уровне 10 гПа, 19 апреля на уровне 20 гПа и 23 апреля на уровне 30 гПа. Осенняя перестройка циркуляции в стратосфере про-

исходит снизу вверх: средняя многолетняя дата осенней перестройки на уровне 30 гПа 2 сентября, на уровне 20 и 10 гПа 4 сентября. Выявлена корреляционная зависимость дат поздних весенних перестроек от наличия больших ВСП. Показано, что в период 1979–2004 гг. максимумы и минимумы весенних перестроек соответствуют максимумам и минимумам в многолетнем ходе чисел Вольфа. Рассмотрены различия между суточными аномалиями в полях температуры и зонального ветра в периоды ранних и поздних перестроек. Анализ вертикальных корреляционных связей в поле температуры воздуха показал, что в весенний период их структура более сложная, что, по-видимому, обусловлено процессом весенней перестройки СЦ.

Особенности связи режимов сезонных перестроек в стратосфере с поведением приземной температуры воздуха оценивались в рамках проекта РНФ 22-27-20080.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Мохов И.И., Зуева Н.Е. Внезапные стратосферные потепления: статистические характеристики и влияние на общее содержание NO_2 и O_3 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 5. С. 545–555.
- Бакулина Е.А., Дунаева Е.А., Угрюмов А.И. Связь весенних перестроек циркуляции в стратосфере с характером процессов в тропосфере в марте-июне // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 29–37.
- Бакулина Е.А., Угрюмов А.И. Весенние перестройки циркуляции в стратосфере в 1958–2003 годах // Ученые записки РГГМУ. 2008. Вып. 5. С. 25–32.
- Бугаева И.В., Рязанова Л.А. Особенности стратосферных процессов в 20-м и 21-м циклах солнечной активности // Труды ЦАО. 1987. Вып. 166. С. 61–66.
- Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 152. № 1. С. 3–18.
- Гечайте И., Погорельцев А.И., Угрюмов А.И. Волновое взаимодействие стратосфера–тропосфера как предвестник аномальных похолоданий в восточной части Балтийского региона // Ученые записки РГГМУ. 2016. Вып. 43. С. 129–139.
- Гурьянов В.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Переведенцев Ю.П. Волновая активность и ее изменения в тропосфере и стратосфере Северного полушария зимой в 1979–2016 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 2. С. 133–146.
- Мохов И.И. Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с Тихоокеанской десятилетней осцилляцией // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 2. С. 183–188.
- Педь Д.А. Смена типов циркуляции циркумполярного вихря в стратосфере // Труды Гидрометцентра СССР. 1973. Вып. 15. С. 26–35.
- Переведенцев Ю.П., Исмагилов Н.В., Шанталинский К.М. Сезонные перестройки циркуляции в средней

- стратосфере // Метеорология и гидрология. 1999. № 6. С. 18–27.
- Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Васильев А.А., Гурьянов В.В. Термический режим в тропосфере, стратосфере и нижней мезосфере Северного полушария в 1979–2016 гг. // Метеорология и гидрология. 2019. № 8. С. 5–20.
- Пчелко И.Г. Об образовании и эволюции летнего стратосферного антициклона в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 1959. № 12. С. 3–9.
- Савенкова Е.Н., Погорельцев А.И. Межгодовая и климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы // Ученые записки РГМУ. 2010. Вып. 11. С. 53–62.
- Тарасенко Д.А. Структура и циркуляция стратосферы и мезосферы Северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 287 с.
- Холтон Дж.Р. Динамическая метеорология стратосферы и мезосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 224 с.
- Ayarzagüena B., Palmeiro F.M., Barriopedro D., Calvo N., Langematz U., Shibata K. On the representation of major stratospheric warmings in reanalyses // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 9469–9484. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9469-2019>
- Baldwin M., Birner T., Brasseur G., Burrows J., Butchart N., Garcia R., Geller M., Gray L., Hamilton K., Harnik N., Hegglin M., Langematz U., Robock A., Sato K., Scaife A. 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere // Meteorological Monographs. 2019. V. 59. P. 27.1–27.61. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHIS-D-19-0003.1>
- Baldwin M., Ayarzagüena B., Birner T., Butchart N., Butler A., Charlton-Perez A., Domeisen D., Garfinkel C., Gamy H., Gerber E., Hegglin M., Langematz U., Pedatella N. Sudden Stratospheric Warmings. // Rev. Geophys. 2021. V. 58. e2020RG000708. <https://doi.org/10.1029/2020RG000708>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // QJR Meteorol Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049.
- Kidston J., Scaife A., Hardiman S., Mitchell D., Butchart N., Baldwin M., Gray L. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather // Nature Geoscience. 2015. V. 8. P. 433–440. <https://doi.org/10.1038/ngeo2424>
- Pogoreltsev A., Savenkova E., Aniskina O., Ermakova T., Chen W., Wei K. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere-troposphere coupling during northern winter // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015. V. 136. P. 187–200. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.008>

Seasonal Variations in Stratospheric Circulation and Interactions between the Troposphere and the Stratosphere

Y. P. Perevedentsev^{1, *}, N. V. Ismagilov¹, N. A. Mirsaeva¹, V. V. Guryanov¹, A. A. Nikolaev¹, and K. M. Shantalinsky¹

¹Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlevskaya St., Kazan, 420008 Russia

*e-mail: ypereved@kpfu.ru

Based on the data of the ERA5 reanalysis, the dates of spring and autumn rearrangements of the stratospheric circulation on isobaric surfaces of 30, 20 and 10 gPa in the latitude zone of 30–90° C. in the period 1979–2020 were obtained. Of the 42 cases of spring restructuring, 10 belong to the early, 15 to the middle and 17 to the late. The spread in the dates of spring rearrangements on the surface of 10 hPa is 69 days. Most often, the spring restructuring of the circulation occurs from top to bottom, in some years, the delay of spring restructuring on the surface of 30 gPa relative to the surface of 10 gPa reaches 22–25 days. Autumn perestroika takes place from the bottom up and their terms at the 3 levels under consideration are close to each other. The relationship between the timing of the spring restructuring of the stratospheric circulation with solar activity and large sudden winter stratospheric warming is shown. Analysis of the fields of anomalies of daily temperature values and zonal wind velocity in the 1000–1 hPa layer in the period January–May showed their significant spatio-temporal difference in the case of early and late spring perestroika. Thus, foci of positive anomalies of temperature and wind speed are formed initially in the upper stratosphere, and then shifted from top to bottom. The interrelations between the layers of the atmosphere in different seasons are considered.

Keywords: stratospheric circulation, seasonal changes in circulation, solar activity, reanalysis data, temperature and wind speed anomalies, correlation