

УДК 551.51

Долговременная изменчивость параметров внезапных стратосферных потеплений по данным реанализа ERA5

О.С. Зоркальцева^{✉1}, О.Ю. Антохина², П.Н. Антохин^{2*}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

²Институт оптики атмосферы им. В.И. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.;

после доработки 20.12.2022 г.;

принята к печати 25.01.2023 г.

Приведены оценки долговременной изменчивости параметров внезапных стратосферных потеплений (ВСП) с 1979 по 2021 г. В качестве критерия для оценки ВСП были использованы значения среднезональной температуры воздуха на 80° с.ш. и среднезональной скорости ветра на 60° с.ш. на высоте 10 гПа. Главные и слабые ВСП были классифицированы по типам: с разделением полярного вихря и его смещением. Были проведены оценки изменчивости таких параметров ВСП, как количество случаев за зиму, тип ВСП, продолжительность ВСП, дата начала и максимальная температура во время ВСП за последние 42 года. Выявлено, что не наблюдается трендовых изменений, а присутствует колебание перечисленных параметров в высокоширотной стратосфере.

Ключевые слова: внезапное стратосферное потепление, стратосфера, методы идентификации стратосферных потеплений, динамика атмосферы; sudden stratospheric warming, stratosphere, methods for identifying stratospheric warmings.

Введение

Данные спутникового и радиозондового мониторинга показывают, что с середины XX в. наблюдается увеличение температуры в тропосфере, а в стратосфере, напротив, средняя глобальная температура уменьшается. В первую очередь эти изменения связаны с увеличением концентрации парниковых газов и истощением стратосферного озона [1]. На фоне глобальных изменений остается открытым вопрос об изменчивости нелинейных процессов, таких как блокирующие антициклоны в тропосфере и внезапные стратосферные потепления (ВСП). Стратосферная внетропическая циркуляция в зимний период характеризуется сильными западными ветрами, образующими мощный полярный вихрь (ПВ). Эта циркуляция в стратосфере Арктики обычно один или несколько раз за зиму нарушается в связи с распространяющимися вверх волнами из тропосферы (например, [2]) или с внутренними динамическими процессами в стратосфере — нелинейными

взаимодействиями волн с зональной циркуляцией в верхней стратосфере [3, 4]. Экстремальное взаимодействие волн со средним потоком может привести к резкому ослаблению стратосферного полярного вихря и быстрому нагреву полярной стратосферы, называемому ВСП [5, 6]. Эффекты главных ВСП можно обнаружить во всей толще атмосферы [7–11]. Поскольку ВСП являются следствием стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия, сведения о состоянии стратосферы могут способствовать более точной долгосрочной предсказуемости тропосферной динамики [12].

Согласно определению Всемирной метеорологической организации (ВМО) выделяют два типа событий ВСП: главные потепления в середине зимы, характеризующиеся обращением зональной циркуляции, и слабые, или минорные, потепления с ограниченными изменениями циркуляции [13]. По критерию ВМО ВСП считается главным, если среднезональные значения зональной компоненты скорости ветра на 60° с.ш. становятся отрицательными и наблюдается значительный рост температуры воздуха вдоль 80° с.ш. на высоте 10 гПа. В последнее десятилетие предложены различные методы идентификации ВСП, основанные на морфологии полярного вихря: со смещением (Displacement, D), при котором

* Ольга Сергеевна Зоркальцева (meteorologist-ka@yandex.ru); Ольга Юрьевна Антохина (Antokhina@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (arn@iao.ru).

ВП смещается от полюса, и с расщеплением (разделения) ВСП (Split, S), когда ПВ разделяется на две части [14–16]. Последние 10–15 лет активно обсуждается необходимость совершенствования определения ВСП. Подробный анализ и сопоставление методов идентификации ВСП проведены в работе [17].

Методы идентификации ВСП различаются не только данными, выбранными для анализа (температура, геопотенциал, зональный ветер, завихренность), но и способами обработки данных (аномалии, тенденции), а также рассматриваемым районом полярной стратосферы (заданной широтой или средним значением параметров в полярной шапке), вертикальным уровнем (между 50 и 10 гПа) и типом события (главные, слабые, финальные потепления, смещение ПВ, расщепление ПВ). Периоды главных потеплений идентифицируются всеми методами с небольшими временными сдвигами порядка нескольких дней. Затруднения в классификации возникают в случаях со сложной вертикальной и пространственной структурой параметров атмосферы во время ВСП, для которых характерны признаки как смещения, так и расщепления ПВ. Например, ВСП в январе 2021 г. [18, 19] или ВСП 2014, 2015 гг., которое по классификации ВМО относилось к слабым (не наблюдалось изменения направления ветра), но было продолжительным и оказало значительное влияние на озоновый слой и тропосферную динамику [20].

Отметим, что используемое определение главных ВСП было предложено ВМО в 1970-х гг. В настоящее время активно обсуждается необходимость его совершенствования [15]. Безусловно, для адекватной оценки такого сложного явления, как ВСП, ежегодно демонстрирующего разнообразные особенности, необходимо рассматривать каждый случай в индивидуальном порядке. Однако нужны характеристики, которые позволили бы обобщать, сравнивать и анализировать тенденции для всех случаев ВСП за прошедшие годы на единой шкале. Возможно, наиболее приемлемым в этом случае окажется подход, учитывающий основные параметры ВСП по разным классификациям. В данной работе проведен детальный анализ каждого случая ВСП с 1979 по 2021 г. с применением критерия ВМО и учетом типа разрушения ПВ как для главных, так и для слабых ВСП.

Помимо большого разнообразия методов оценки ВСП, есть мнения, что и разные архивы данных (ERA, JRA-55 и NCEP-NCAR) могут включать временные задержки в обнаружении одного и того же события и разную частоту возникновения ВСП [14]. Однако более детальный анализ показал, что результаты идентификации ВСП слабо чувствительны к выбору реанализа [17]. В рамках настоящей работы все расчеты выполнены по данным реанализа ERA5.

Частота, период возникновения в течение зимнего сезона, продолжительность главных ВСП — важные показатели динамики полярной стратосферы. Некоторые модельные исследования предска-

зывают увеличение частоты главных ВСП в будущем [21–23]. Однако в работах [24, 25] показано, что оценка частоты ВСП зависит от климатической модели. В [25] предсказывают сдвиг дат начала ВСП ближе к середине зимы. Оценки долговременной изменчивости ВСП, представленные разными исследователями, часто оказываются противоречивыми и, как правило, зависят от временной выборки. Например, авторы [26] обнаружили отрицательную тенденцию в интенсивности как главных, так и слабых ВСП начиная с 1979 г. В [27], оценивая параметры ВСП с 1958 по 2019 г., получили, что интенсивность и продолжительность главных событий ВСП увеличились вследствие увеличения амплитуды планетарных волн в стратосфере. В публикации [28] было показано, что частота ВСП в 1998–2010 гг. выросла примерно в два раза по сравнению с 1957–1998 гг. Это подтверждает исследование [29]. В [30] было установлено, что нет статистически значимых изменений динамики стратосферного вихря в течение XXI в., но даты начала ВСП сместились с января на февраль. Ретроспективная оценка частоты событий ВСП на основе вариаций Североатлантического колебания у поверхности земли (САК, англ. NAO) с 1850 г. показала, что восстановленный временной ряд частот ВСП с 1850 по 2014 г. не имеет долговременных тенденций [31]. Таким образом, в современных исследованиях можно обнаружить несколько точек зрения на изменчивость ВСП в зависимости от временного масштаба, на котором она рассматривается. Несмотря на многочисленные исследования, проведенные за последние десятилетия, вопрос о причинах (механизмах) изменчивости ВСП остается открытым.

Цель данной работы — оценка параметров и долговременной изменчивости ВСП с 1979 по 2021 г. Временной интервал был выбран в связи с началом регулярного мониторинга высоких слоев атмосферы искусственными спутниками Земли. До середины 1970-х гг. наблюдения стратосферы осуществлялись по редкой сети наземных станций радиозондирования. Несмотря на значительные успехи современных моделей, которые используются для ассимиляции данных в реанализах, для исследования верхних слоев атмосферы целесообразно использовать наблюдения после 1970-х гг.

Данные и методы

Для изучения динамики стратосферы использовался климатический архив ECMWF ERA5 [32]. В соответствии с критериями ВСП, установленными ВМО, мы анализируем такие параметры, как среднезональная температура воздуха вдоль 80° с.ш., скорость среднезонального ветра на 60° с.ш. на высоте 10 гПа, на сетке 2,5 × 2,5°.

На рис. 1 представлены среднесуточные зонально усредненные значения зонального ветра (U) вдоль 60° с.ш. и температуры (T) на 80° с.ш. на высоте 10 гПа во время ВСП: главное (a) и слабое (b),

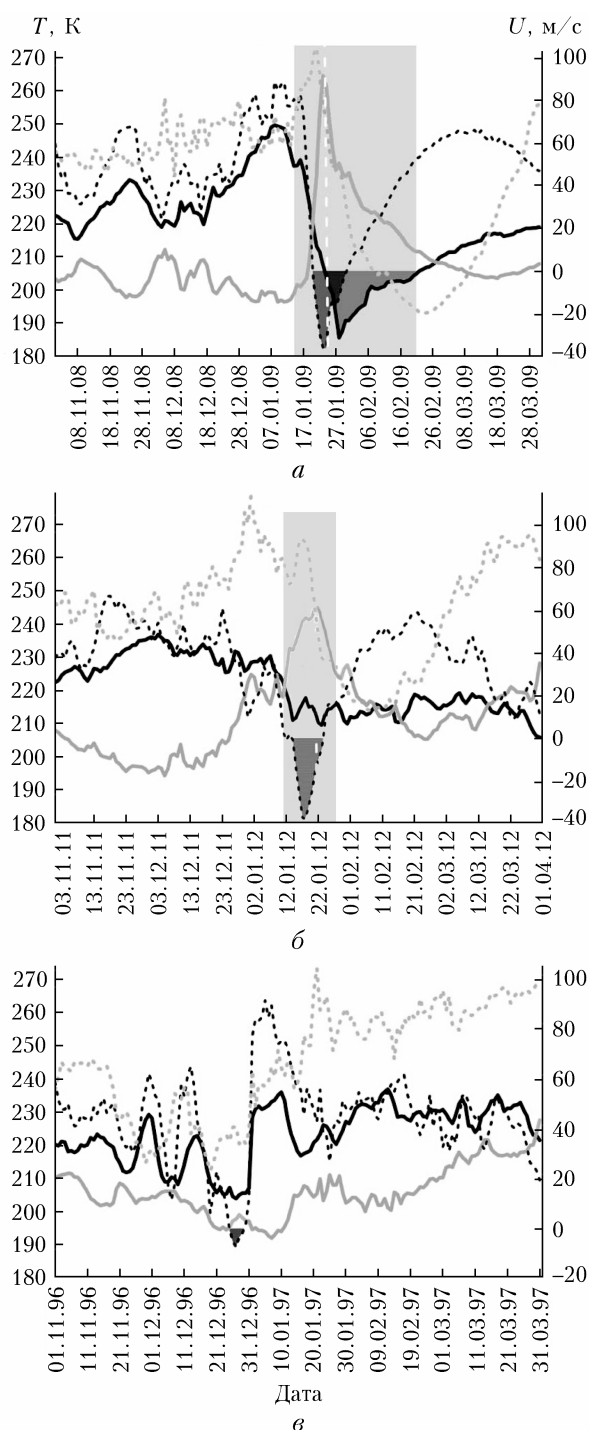


Рис. 1. Вариации среднезональной температуры воздуха вдоль 80° с.ш. на высотах 10 гПа (серая сплошная кривая) и 1 гПа (серая пунктирная) и среднезональной скорости зональной компоненты ветра на 10 гПа (черная сплошная) и 1 гПа (черная пунктирная): *a* – зима 2008/2009 г.; *б* – 2011/2012 г.; *в* – 1996/1997 г.

случай без ВСП (*в*). Видно, что в зимний период 2008–2009 гг. наблюдался один эпизод ВСП. За дату начала ВСП принимался день с резким (более 5 K/сут) повышением температуры (18.01.2009 г.), за дату окончания – день, когда наблюдался либо

реверс ветра с восточного на западный (в случае главных ВСП), либо понижение температуры более 3 K/сут (в случае слабых ВСП); за центральную дату ВСП принимался день с максимальной температурой, в зимний период 2008/2009 г. центральная дата ВСП – 23.01.2009 г. ($264,1 \text{ K}$). Серыми прямоугольниками показана продолжительность ВСП. В соответствии со стандартными критериями ВМО зимой 2011/2012 г. зарегистрировано одно слабое потепление, поскольку на высоте 10 гПа не было обращения зональной циркуляции. В течение рассматриваемого периода наблюдались зимы без ВСП, как, например, в 1996/1997 г. (рис. 1, *в*). Подобный анализ был проведен для каждой зимы с 1979 по 2021 г.

Для каждого события ВСП были дополнительно рассмотрены вариации U и T на уровне 1 гПа ($\sim 45 \text{ км}$). Разработан архив графиков U и T за каждый зимний сезон (можно найти по ссылке <https://doi.org/10.5281/zenodo.7454265>). Все случаи ВСП были разбиты на главные и слабые, для каждого события были определены дата начала, максимума (центральная дата), окончания и максимальная температура в центральную дату ВСП. Также для всех главных ВСП был определен тип: *D* – смещение ПВ; *S* – расщепление ПВ; *F* – финальное ВСП (на 31 марта не наблюдалось окончание восточного реверса зонального ветра либо не отмечалось падение температуры). Типы *D*, *S* выделялись на основе синоптического анализа карт потенциальной завихренности на изэнтропической поверхности 850 K . (Карты для анализа доступны по ссылке: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7450999>.) Данный подход является субъективным, однако, если случаев для анализа не много, то он практически лишен ошибок. Основным критерием для выделения событий типа *S* было наличие двух замкнутых изолиний в диапазоне $650\text{--}750 \text{ PVU}$ (ед. потенциальной завихренности).

Результаты

По указанным в предыдущем разделе критериям была составлена таблица. С 1979 по 2021 г. наблюдалось 28 эпизодов слабых ВСП и 30 главных, повторяемость главных ВСП составляет 0,71 случая в год. Средняя максимальная температура для главных ВСП превышает температуру для слабых ВСП всего на $2,8 \text{ K}$. ВСП начинаются чаще всего в конце января, длительность главных ВСП в среднем три недели, слабых – две.

На рис. 2 приведены примеры распределения полей потенциальной завихренности (ПЗ) при разных типах ВСП. Как описано в [33], ПЗ можно выразить как произведение завихренности (локальная скорость вращения воздушных частиц) и статической устойчивости (вертикальный градиент потенциальной температуры). ПЗ сохраняется в адиабатическом потоке без трения и применяется как

Параметры ВСП с 1979 по 2021 г.

Тип	Начало	Окончание	Центральная дата	T_{\max} , К	Тип	Начало	Окончание	Центральная дата	T_{\max} , К
<i>Главные ВСП</i>					<i>Слабые ВСП</i>				
<i>D</i>	18.02.1980	16.03.1980	01.03.1980	254,8	<i>S</i>	22.01.1981	25.02.1981	05.02.1981	257,2
<i>D</i>	19.02.1984	20.03.1984	03.03.1984	250,6	<i>S</i>	21.01.1982	03.02.1982	28.01.1982	250,5
<i>S</i>	29.12.1984	15.01.1985	01.01.1985	247,8	<i>D</i>	27.01.1983	02.02.1983	29.01.1983	244,4
<i>F</i>	11.03.1985	30.03.1985	27.03.1985	237,0	<i>D</i>	22.02.1983	05.03.1983	26.02.1983	254,6
<i>F</i>	14.03.1986	31.03.1986	21.03.1986	251,8	<i>D</i>	13.02.1986	20.02.1986	18.02.1986	240,7
<i>D</i>	16.01.1987	14.02.1987	18.01.1987	240,5	<i>D</i>	03.02.1990	28.02.1990	12.02.1990	249,6
<i>S</i>	06.12.1987	25.12.1987	10.12.1987	239,2	<i>S</i>	17.01.1991	14.02.1991	28.01.1991	249,0
<i>S</i>	29.02.1988	27.03.1988	14.03.1988	241,6	<i>D</i>	10.01.1992	30.01.1992	19.01.1992	250,0
<i>S</i>	06.02.1989	13.03.1989	13.02.1989	245,5	<i>D</i>	02.02.1993	12.03.1993	09.03.1993	237,5
<i>F</i>	23.03.1992	31.03.1992	25.03.1992	242,6	<i>D</i>	28.12.1993	10.01.1994	31.12.1993	232,3
<i>D</i>	13.12.1998	28.12.1998	16.12.1998	246,4	<i>F</i>	06.03.1994	30.03.1994	28.03.1994	246,9
<i>S</i>	20.02.1999	15.03.1999	27.02.1999	248,8	<i>D</i>	23.01.1995	15.02.1995	30.01.1995	250,8
<i>D</i>	11.03.2000	25.03.2000	15.03.2000	242,4	<i>D</i>	17.01.2000	14.02.2000	09.02.2000	237,2
<i>S</i>	30.01.2001	18.02.2001	02.02.2001	238,5	<i>S</i>	07.12.2000	26.12.2000	21.12.2000	231,2
<i>D</i>	22.12.2001	10.01.2002	29.12.2001	247,5	<i>D</i>	13.02.2002	03.03.2002	19.02.2002	241,6
<i>S</i>	14.01.2003	22.01.2003	17.01.2003	243,6	<i>D</i>	27.12.2002	08.01.2003	01.01.2003	241,6
<i>D</i>	17.12.2003	14.01.2004	27.12.2003	239,5	<i>D</i>	30.12.2006	10.01.2007	03.01.2007	233,2
<i>F</i>	19.02.2005	24.03.2005	15.03.2005	236,5	<i>D</i>	03.02.2007	10.02.2007	06.02.2007	230,4
<i>S</i>	03.01.2006	05.02.2006	24.01.2006	247,4	<i>D</i>	21.01.2008	30.01.2008	25.01.2008	249,3
<i>D</i>	21.02.2007	08.03.2007	04.03.2007	241,8	<i>D</i>	04.02.2008	10.02.2008	06.02.2008	239,9
<i>D</i>	22.02.2008	05.03.2008	23.02.2008	254,2	<i>D</i>	29.01.2011	05.02.2011	02.02.2011	231,5
<i>S</i>	18.01.2009	06.02.2009	23.01.2009	264,1	<i>S</i>	11.01.2012	05.02.2012	21.01.2012	245,2
<i>S</i>	20.01.2010	09.02.2010	01.02.2010	238,2	<i>S</i>	05.02.2014	13.02.2014	09.02.2014	240,8
<i>S</i>	04.01.2013	27.01.2013	12.01.2013	241,6	<i>F</i>	22.03.2015	31.03.2015	26.03.2015	248,9
<i>F</i>	14.03.2014	31.03.2014	17.03.2014	254,0	<i>D</i>	26.01.2016	17.02.2016	09.02.2016	251,0
<i>F</i>	04.03.2016	30.03.2016	07.03.2016	256,7	<i>F</i>	22.02.2017	09.03.2017	27.02.2017	251,3
<i>D</i>	27.01.2017	09.02.2017	01.02.2017	251,0	<i>D</i>	02.02.2020	12.02.2020	06.02.2020	233,2
<i>S</i>	05.02.2018	28.02.2018	18.02.2018	246,8	<i>F</i>	15.03.2020	31.03.2020	24.03.2020	254,6
<i>D</i>	24.12.2018	21.01.2019	08.01.2019	235,9					
<i>D</i>	01.01.2021	16.01.2021	05.01.2021	250,1					
Среднее	29.01	19.02	06.02	246,5		28.01	13.02	04.02	243,7
Ср. прод.		21 день					14 дней		

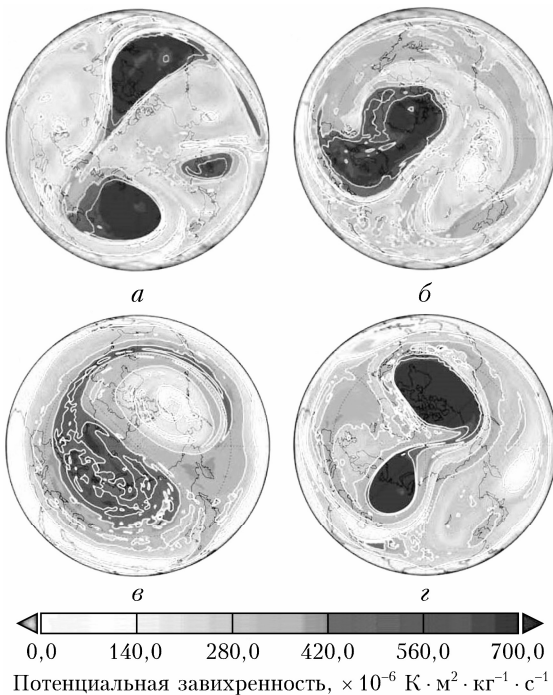


Рис. 2. Пространственное распределение потенциальной завихренности во время главных ВСП типа *S* 25.01.2009 г. (*a*); типа *D* 26.03.2015 г. (*б*); типа *F* 2.02.1991 г. (*в*) и слабого ВСП типа *S* 24.01.2012 г. (*г*)

трассер движения воздушных масс, а также широко используется в исследованиях, связанных со стратосферой и стратосферно-тропосферными обменами [34].

Рис 2, *a* показывает пример ВСП с расщеплением ПВ (*S*). Видно, что ПВ разбивается на два отдельных вихря, смещенных в умеренные широты, над полюсом в это время преобладает антициклоническая завихренность. Тип смещения *D* представлен на рис. 2, *б*, также видно смещение ПВ в более низкие широты, но в отличие от типа *S* ПВ сохраняет один центр. Финальные потепления (*F*), наблюдающиеся в конце зимнего периода, похожи на тип *D*, но, как правило, ПВ в этом случае ослаблен (см. рис. 1, *в*). Отдельно хочется отметить случаи слабых ВСП типа *S* (рис. 2, *г*). Многие исследователи выделяют тип *D* только для главных ВСП [13–16]. В настоящее время считается, что тип *S* приводит к быстрой реакции тропосферной циркуляции (несколько дней), тогда как во время ВСП типа *D* время реакции тропосферы на событие может увеличиваться до 1–2 недель [35]. Поскольку наши дальнейшие исследования будут направлены на изучение отклика тропосферы на различные типы ВСП, мы считаем важным выделение типов *S* и *D* не только в периоды главных, но и в периоды слабых ВСП.

Отметим, что не все ВСП можно однозначно отнести к типу *D* или *S*. Иногда от полярного вихря «откалывалась» незначительная часть воздушной массы, которая сохранялась достаточно длительное время, а основная масса вихря смещалась из полярных широт, т.е. присутствовали признаки как *S*-, так и *D*-типа. К таким ВСП можно отнести случаи в феврале 1981 г., в феврале 1999 г., в декабре 2000 г., в феврале 2001 г., в январе 2006 г., в феврале 2010 г., в феврале 2014 г. и в январе 2021 г. (<https://doi.org/10.5281/zenodo.7450999>).

Вариации числа случаев главных и слабых ВСП за каждый зимний период представлены на рис. 3. С 1979 по 2021 г. не прослеживается долговременной тенденции в общем числе случаев как главных, так и слабых ВСП. Заметно продолжительное отсутствие главных ВСП с 1993 по 1998 г., а с 1996 по 1998 г. не наблюдалось и слабых ВСП. Этот «провал» в стратосферной циркуляции отмечался и другими исследователями, также была замечена взаимосвязь долговременной изменчивости ВСП с тропосферной циркуляцией в этот период [31]. Стоит заметить, что авторы [36] исследовали повто-

ряемость блокирования в Западной Сибири, которые обнаружили минимум повторяемости, совпадающий со снижением активности ВСП. Максимальные значения среднезональной температуры на 80° с.ш. во время ВСП отмечались в зимние периоды 1984/1985 и 2008/2009 г. Вариации максимальной температуры также не имеют долговременных тенденций за последние 42 года.

Как было отмечено выше, средняя продолжительность главных ВСП составляет три недели. Рис. 3 показывает, что эта величина в среднем не изменилась за прошедшие годы. Однако главные ВСП с 1979 по 2021 г. демонстрируют тенденцию к более раннему началу. Аппроксимация линейным трендом указывает на то, что средняя дата начала ВСП к 2021 г. сдвинулась на конец января, т.е. на 10 дней раньше, чем в конце прошлого века. Статистическая значимость данного утверждения невысока, поскольку мы видим, что разброс в датах начала ВСП составляет около 120 дней. На рис. 4 отчетливо заметно «сужение» диапазона дат начала ВСП, по крайней мере, в последнее десятилетие.

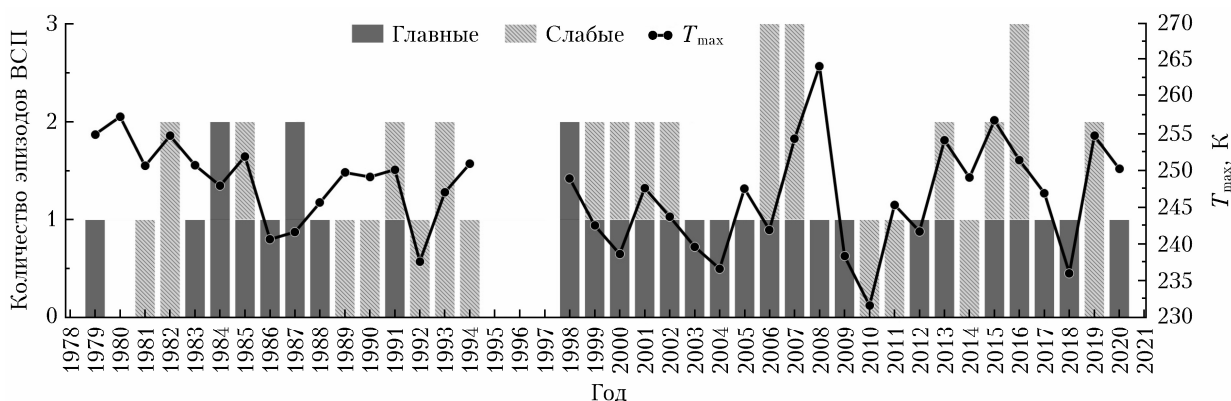


Рис. 3. Долговременные изменения количества главных, слабых ВСП и значений T_{\max} во время ВСП. По оси x отмечены зимние периоды с ноября по март следующего года (например, «1979» – зимний период с ноября 1979 г. по март 1980 г.)

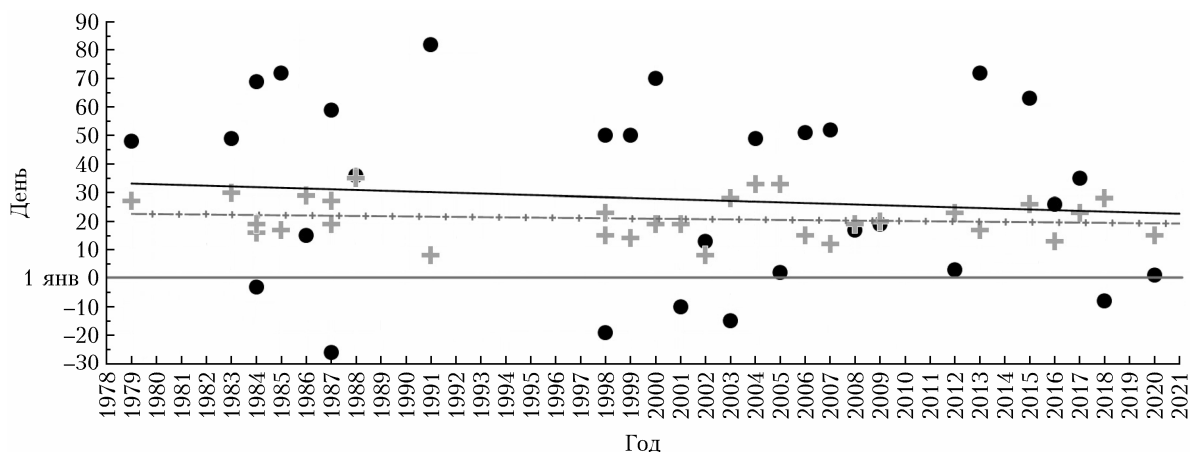


Рис. 4. Долговременные изменения дат начала (точки) и продолжительности (крестики) главных ВСП

Таким образом, основные параметры ВСП за последние четыре десятилетия не имеют ярко выраженных и статистически значимых тенденций несмотря на глобальные климатические изменения, в том числе в стратосфере [1]. Однако в вариациях количества ВСП и дат их начала прослеживаются долговременные колебания. Подобные колебания видны, если рассмотреть критерии ВСП (T и U в высокоширотной стратосфере) за каждый день в течение всего рассматриваемого периода (рис. 5).

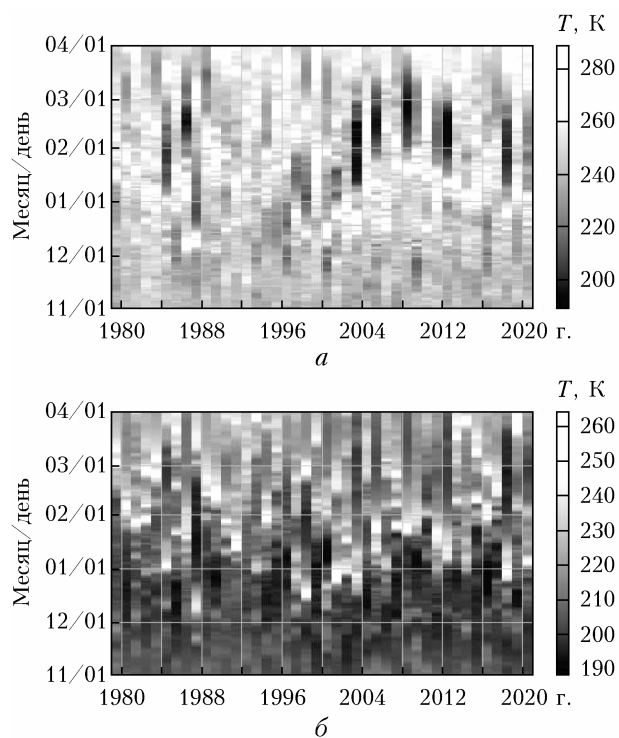


Рис. 5. Диаграммы вариаций среднезональной температуры вдоль 80° с.ш. на высоте 1 (а) и 10 гПа (б) в январе

На рис. 5 представлены диаграммы вариаций T вдоль 80° с.ш. на высотах 10 и 1 гПа (диаграммы для U см. по ссылке <https://doi.org/10.5281/zenodo.7485158>). На уровне 1 гПа отчетливо прослеживается «провал» 1990-х гг., отсутствуют экстремальные состояния ПВ. С 1988 по 2000 г. температура на 80° с.ш. не опускалась ниже 215 К и не поднималась выше 275 К. После 2000 г., в период активизации ВСП, видно, что наблюдалась «раскачка» амплитуды значений среднезональной температуры (от 190 до 290 К). Интересной особенностью является и смещение минимальных температур на 1 гПа по сезонам года. С начала 2000-х гг. они наблюдались в конце декабря и начале января, в 2010-х гг. они отмечались в начале февраля и к 2020 г. сместились к началу января, при этом периодам пониженных температур всегда предшествуют периоды повышенных. Похожие временные вариации демонстрируют и значения среднезонального ветра на 60° с.ш.

На изобарической поверхности 10 гПа, где непосредственно диагностируют ВСП, долговременные колебания температуры и ветра также присутствуют (рис. 5, б), но выражены менее четко, чем на 1 гПа. Видно, что первая половина зимы холодная, вторая — теплая, что согласуется с датами ВСП (средняя дата начала — 29 января).

Длительное отсутствие главных ВСП хорошо прослеживается на диаграмме среднезонального ветра на 60° с.ш. в виде отсутствия отрицательных значений U_{mean} на усредненных за весь зимний период графиках (рис. 6). Средние (T_{mean}) и минимальные (T_{min}) значения температуры на уровне 10 гПа за каждый зимний период (рис. 7) демонстрируют долговременную тенденцию к понижению, а максимальные температуры тенденции не имеют, что согласуется с рис. 2. На высоте 1 гПа основной вклад в динамику средней температуры вносят вариации минимальной температуры. Как уже было отмечено выше, «раскачка» амплитуды температурных вариаций начинается с 2000-х гг., что отчетливо видно и на рис. 7. Вариации средних, максимальных и минимальных значений U на высотах 1 и 10 гПа выглядят более согласованными (рис. 6), чем вариации T . Заметны долговременные

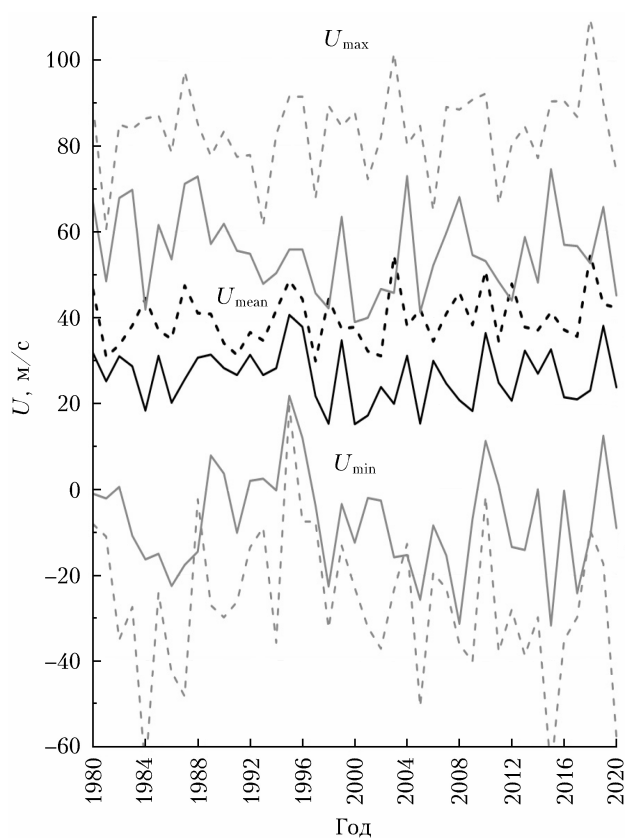


Рис. 6. Вариации среднезональной скорости ветра вдоль 60° с.ш. на высотах 10 гПа (сплошная кривая) и 1 гПа (пунктирная кривая), усредненные с ноября по март

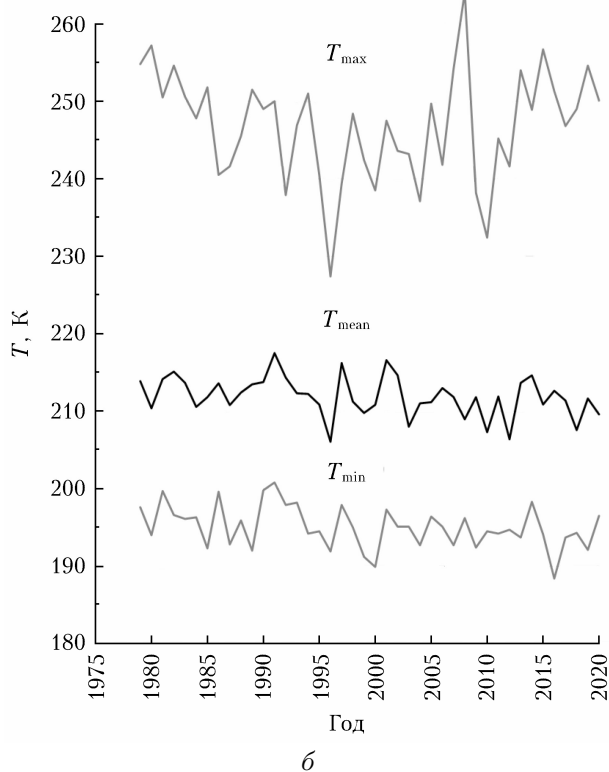
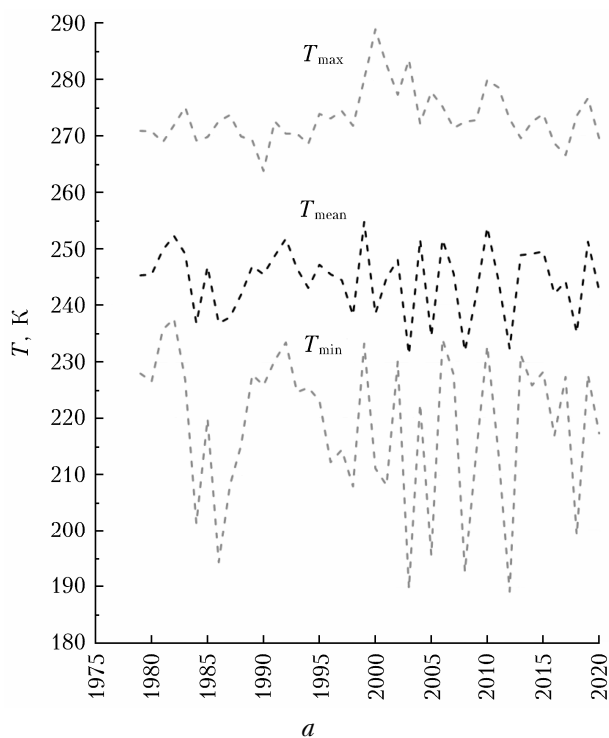


Рис. 7. Вариации среднезональной температуры вдоль 80° с.ш. на высотах 1 (а) и 10 гПа (б), усредненные с ноября по март

колебания U (см. рис. 5) с существенным ростом минимальных U в 1990-е гг., что связано с отсутствием ВСП.

Заключение

Вопрос о долговременных тенденциях экстремальных состояний стратосферы является значимым, поскольку накоплено немало свидетельств влияния динамики ПВ в стратосфере на погодные условия в тропосфере. В настоящей работе был проведен детальный анализ каждого случая внезапных стратосферных потеплений с 1979 по 2021 г. Проведена классификация ВСП на главные и слабые с использованием определения ВМО. Для каждого ВСП были определены тип деформации стратосферного полярного вихря в ходе ВСП (смещение или расщепление), дата начала и окончания и день с максимальным значением температуры в средней и верхней стратосфере. Анализ долговременной изменчивости перечисленных параметров показал, что, несмотря на изменения фоновых условий в стратосфере, параметры ВСП не имеют значимых тенденций. Это может быть обусловлено слишком высокой степенью изменчивости ВСП, не позволяющей с помощью линейной аппроксимации обнаружить значимые изменения. Поэтому в дальнейшем мы будем расширять подходы к анализу экстремумов.

Существуют разные подходы к оценке долговременных тенденций параметров ВСП, которые позволяют сделать различные выводы: 1) количество ВСП снижается [26]; 2) не изменяется [30, 31]; 3) увеличивается [27–29]. Основная причина противоречивых выводов состояла в выборе периода для анализа и параметров ВСП. На основе полученных в данной работе результатов, а также предыдущих исследований [31] было установлено, что 1990-е гг. стали периодом «затишья» как для циркуляции стратосферы, так и, по-видимому, для тропосферно-стратосферных взаимодействий. С начала 2000-х гг. увеличилась амплитуда колебаний стратосферных параметров, что в целом согласуется с тропосферными процессами в этот период, но общая многолетняя изменчивость ВСП не имеет существенных тенденций.

Отдельно хочется отметить, что в настоящем исследовании обнаружены случаи расщепления ПВ во время слабых потеплений. Расщепление ПВ приводит к быстрой реакции тропосферной циркуляции (несколько дней), тогда как во время смещения ПВ время реакции тропосферы на ВСП может увеличиваться до 1–2 недель. Большинство исследователей выделяют тип деформации ПВ только во время главных ВСП, что может приводить к недооценке стратосферного влияния в периоды слабых ВСП. Изменчивость ВСП – проявление межгодовой изменчивости динамики стратосферы Арктики, изучение механизмов которой является актуальной задачей.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-77-10008).

Список литературы

1. IPCC, 2021: Summary for Policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution

- of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
2. *Andrews D., Taylor F., McIntyre M.* The influence of atmospheric waves on the general circulation of the middle atmosphere // *Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A.* 1987. P. 693–705.
 3. *Scott R., Polvani L.* Internal variability of the winter stratosphere. Part I: Time independent forcing // *J. Atmos. Sci.* 2006. V. 63. P. 2758–2776.
 4. *Позорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н.* Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // *Геоматизм и аэрономия.* 2014. Т. 54, № 3. С. 387–403. DOI: 10.7868/S0016794014020163.
 5. *Matsumo T.* A dynamical model of the stratospheric sudden warming // *J. Atmos. Sci.* 1971. V. 28, N 8. P. 1479–1494. DOI: 10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0.CO;2.
 6. *Baldwin M., Ayarzagüena B., Birner T., Butchart N., Butler A., Charlton-Perez A., Domeisen D., Garfinckel C., Garny H., Gerber E., Hegglin M., Lange-matz U., Pedatella N.* Sudden stratospheric warmings // *Rev. Geophys.* 2021. V. 58. P. e2020RG000708. DOI: 10.1029/2020RG000708.
 7. *Маричев В.Н., Бочковский Д.А.* Лидарные исследования термического режима стратосферы над Томском за 2012–2015 гг. // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 1. С. 28–37. DOI: 10.15372/AOO20180105.
 8. *Zorkaltseva O.S., Vasilyev R.V.* Stratospheric influence on MLT over mid-latitudes in winter by Fabry-Perot interferometer data // *Ann. Geophys.* 2021. V. 39. P. 267–276. DOI: 10.5194/angeo-39-267-2021.
 9. *Medvedeva I.V., Semenov A.I., Pogoreltsev A.I., Tartarnikov A.V.* Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 187. P. 22–32. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.02.005.
 10. *Koval A.V., Chen W., Didenko K.A., Ermakova T.S., Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Toptunova O.N., Wei K., Yarusova A.N., Zarubin A.S.* Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events // *Ann. Geophys.* 2021. V. 39. P. 357–368. DOI: 10.5194/angeo-39-357-2021.
 11. *Варгин П.Н., Кирюшов Б.М.* Внезапное стратосферное потепление в Арктике в феврале 2018 г. и его влияние на тропосферу, мезосферу и озоновый слой // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 2. С. 41–56.
 12. *Sigmond M., Scinocca J., Kharin V., Shepherd T.* Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings // *Nat. Geosci.* 2013. V. 6, N 2. P. 98–102. DOI: 10.1038/ngeo1698.
 13. *WMO: Implementation of the WMO-IQSY STRAT-WARM PROGRAMME.* 1964. V. 13, N 4. P. 200–205. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=6525 (last access: 13.11.2019).
 14. *Charlton A., Polvani L.* A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks // *J. Clim.* 2007. V. 20. P. 449–469. DOI: 10.1175/JCLI3996.1.
 15. *Butler A., Seidel D., Hardiman S., Butchart N., Birner T., Match A.* Defining sudden stratospheric warmings // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96. P. 1913–1928. DOI: 10.1175/bams-d-13-00173.1.
 16. *Choi H., Kim B., Choi W.* Type classification of sudden stratospheric warming based on pre- and post warming periods // *J. Clim.* 2019. V. 32, N 8. P. 2349–2367. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0223.1.
 17. *Palmeiro F., Barriopedro D., Ricardo G., Calvo N.* Comparing sudden stratospheric warming definitions in reanalysis data // *J. Clim.* 2015. V. 28, N 17. P. 6823–6840. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0004.1.
 18. *Wright C., Hall R., Banyard T., Hindley H., Krisch I., Mitchell D., Seviour W.* Dynamical and surface impacts of the January 2021 sudden stratospheric warming in Novel Aeolus Wind Observations, MLS and ERA5 // *Weather Clim. Dynam.* 2021. V. 2. P. 1283–1301. DOI: 10.5194/wcd-2-1283-2021.
 19. *Варгин П.Н., Гурьянов В.В., Лукьянов А.Н., Вязанкин А.С.* Динамические процессы стратосферы Арктики зимой 2020–2021 г. // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2021. Т. 57, № 6. С. 651–664.
 20. *Manney G., Lawrence D., Santee M., Read W., Livesey N., Lambert A., Froidevaux L., Pumphrey H., Schwartz M.* A minor sudden stratospheric warming with a major impact: Transport and polar processing in the 2014/2015 Arctic winter // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 7808–7816. DOI: 10.1002/2015GL065864.
 21. *McLandsress C., Shepherd T.* Impact of climate change on stratospheric sudden warmings as simulated by the Canadian Middle Atmosphere Model // *J. Clim.* 2009. V. 22. P. 5449–5463. DOI: 10.1175/2009JCLI3069.1.
 22. *Bell C., Gray L., Kettleborough J.* Changes in Northern Hemisphere stratospheric variability under increased CO₂ concentrations // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2010. V. 136. P. 1181–1190. DOI: 10.1002/qj.633.
 23. *Воробьева В.В., Володин Е.М.* Исследование структуры и предсказуемости первой моды изменчивости в стратосфере на основе климатической модели ИВМ РАН // *Метеорол. и гидрол.* 2018. № 11. С. 41–48.
 24. *Mitchell D., Charlton-Perez A., Gray L.* The nature of Arctic polar vortices in chemistry–climate models // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2012b. V. 138. P. 1681–1691. DOI: 10.1002/qj.1909.
 25. *Ayarzagüena B., Langematz U., Meul S.* The role of climate change and ozone recovery for the future timing of major stratospheric warmings // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. P. 2460–2465. DOI: 10.1002/grl.50477.
 26. *Zhang L., Chen Q.* Analysis of the variations in the strength and position of stratospheric sudden warming in the past three decades // *Atmos. Ocean. Sci. Lett.* 2019. V. 12. P. 147–154. DOI: 10.1080/16742834.2019.1586267.
 27. *Zhang Y., Ren Y.* Statistical characteristics and long-term variations of major sudden stratospheric warming events // *J. Meteor. Res.* 2021. V. 35, N 3. P. 416–427. DOI: 10.1007/s13351-021-0166-3.
 28. *Kuttippurath J., Nikulin G.A.* comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 17. P. 8115–8129. DOI: 10.5194/acp-12-8115-2012.
 29. *Manney G.K., Kruger J.L., Sabutis S.A., Pawson S.* The remarkable 2003–2004 winter and other recent warm winters in the Arctic stratosphere since the late 1990s // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. D04107. DOI: 10.1029/2004JD005367.
 30. *Mitchell D., Charlton-Perez A., Gray L.* Characterizing the variability and extremes of the stratospheric polar vortices using 2D moment analysis // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 8. P. 1194–1213. DOI: 10.1175/2010JAS3555.1.

31. Domeisen D. Estimating the frequency of sudden stratospheric warming events from surface observations of the North Atlantic Oscillation // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2019. V. 124, N 3. P. 180–3194. DOI: 10.1029/2018JD030077.
32. 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., Biavati 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. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
33. Hoskins J., McIntyre M., Robertson A. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* V. 111. P. 877–946. DOI: 10.1002/qj.49711147002, 1985.
34. Millán L., Manney G., Lawrence D. Reanalysis inter-comparison of potential vorticity and potential-vorticity-based diagnostics // *Atmos. Chem. Phys.* 2021. V. 21. P. 5355–5376. DOI: 10.5194/acp-21-5355-2021.
35. White I., Garfinkel C., Cohen J., Jucker M., Rao J. The impact of split and displacement sudden stratospheric warmings on the troposphere // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126. DOI: 10.1029/2020JD033989.
36. Antokhina O., Antokhin P., Devyatova E., Martynova Y. 2004–2016 wintertime atmospheric blocking events over Western Siberia and their effect on surface temperature anomalies // *Atmosphere.* 2018. V. 9, N 72. DOI: 10.3390/atmos9020072.

O.S. Zorkal'tseva, O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin. **Long-term variability of parameters of sudden stratospheric warmings according to ERA5 reanalysis data.**

This paper is devoted to assessing the long-term variability of the parameters of sudden stratospheric warmings (SSW) from 1979 to 2021. The values of the mean zonal air temperature at a latitude of 80°N and zonal average wind speed at 60°N at altitudes of 10 hPa are used as a criterion for estimating the SSW. Major SSWs are classified according to their types – with split of the polar vortex (PW) and with PW displacement. Estimates are made of the variability of such SSW parameters as the number of events per winter, SSW type, SSW duration, start date, and maximal temperature during SSW over the past 42 years. No trend changes are found, but oscillatory behavior of the parameters is observed in the high-latitude stratosphere.