



УДК 551. 513

Долговременные изменения внезапных стратосферных потеплений

М. А. Руднева (rudneva@mail.iszf.irk.ru)

О. С. Кочеткова (olgak@mail.iszf.irk.ru)

В. И. Мордвинов (v_mordv@mail.iszf.irk.ru)

Аннотация. Выполнен анализ динамики параметров стратосферных потеплений в Северном полушарии с 1975 по 2013 г. В большинстве случаев стратосферные потепления наблюдались над Азиатско-Тихоокеанским регионом. Потеплениям этого типа соответствовал Тип II стратосферной циркуляции по классификации Ю. Б. Храброва. В целом за весь период с 1975 по 2013 г. устойчивый тренд в температуре или значениях геопотенциала в стратосфере во время потеплений отсутствовал, однако с середины 90-х гг. интенсивность и пространственный масштаб стратосферных потеплений снижались, хотя в отдельные годы, например в 2009 г., потепления были очень мощными.

Ключевые слова. Стратосфера, стратосферное потепление, стратосферный полярный вихрь.

Введение

Внезапное стратосферное потепление (ВСП) представляет собой повышение температуры «взрывного характера» в полярной и субполярной стратосфере зимой в течение нескольких (порядка десяти) суток. ВСП развиваются на высотах от 10 до 50 км, при этом меняется знак меридионального градиента температуры над полушарием, формируется стратосферный антициклон, а зональные ветры могут изменить направление с западного на восточное. Возвращение к нормальному зимнему режиму протекает медленнее, чем развитие потепления.

Исследование внезапных стратосферных потеплений началось в середине прошлого столетия. Впервые стратосферное потепление было зарегистрировано немецким метеорологом Шерхагом в 1952 г. по радиозондовым наблюдениям над Берлином. [4]. Большой интерес представляет изучение изменений ВСП на длительных интервалах времени, сопоставимых с масштабами времени климатических изменений. Однако работ, посвященных изучению этих вариаций, совсем немного. Можно отметить серию работ Погорельцева, посвященных анализу изменений стационарных волн 1 и 2, которые считаются основным фактором, определяющим возникновение ВСП [2].

Одна из причин недостаточного внимания анализу климатических изменений ВСП очевидна – это плохое понимание механизма ВСП и причин, его вызывающих. Исследования концентрировались, в основном, вокруг этой проблемы. Сейчас многие трудности в понимании ВСП преодолены и «климатические» исследования становятся все более актуальными в связи, например, с исследованиями долговременных изменений в верхних слоях атмосферы и в ионосфере. Вторая трудность – техническая. ВСП представляет собой сложное явление, связанное с процессами не только в полярной области, но и в тропиках. Трудно предложить набор параметров, достаточно полно характеризующих особенности этого явления. Как показали наши исследования, для описания ВСП недостаточно анализа только температурных вариаций. Развитие ВСП сопровождается разрушением полярного вихря, поэтому анализ ВСП необходимо дополнять анализом особенностей стратосферной циркуляции. Самое простое – это воспользоваться уже имеющимися методами. Одним из таких уже основательно забытых методов является типизация синоптических процессов. Применительно к стратосферным процессам подобная типизация была предложена Ю. Б. Храбровым [1]. В нашем исследовании мы попытались соединить этот метод исследования с методом анализа температурных вариаций во время ВСП. Основными характеристиками стратосферных потеплений, которые нас интересовали, были интенсивность, продолжительность и место возникновения ВСП. Циркуляцию стратосферы в эти периоды, по Храброву, характеризовало положение полярного вихря. Качественный анализ ВСП был дополнен анализом изменений со временем интенсивности ВСП по данным о величине термических и барических аномалий в период развития ВСП.

Данные и метод

В работе рассмотрены изменения высот геопотенциальных поверхностей и температуры на уровне 10 гПа за период 1975–2013 гг. по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis [5]. На основе этих данных были определены следующие характеристики ВСП: положение термических аномалий, максимальные значения температуры и геопотенциала в период ВСП, а также продолжительность каждого события. Для характеристики циркуляционных процессов в стратосфере во время ВСП была использована типизация Ю. Б. Храброва, основанная на определении секторов, в которых располагаются центры циклонического и антициклонических вихрей на уровне 10 гПа, а также очаги положительных аномалий $H_{500/1000}$, расположенные севернее 60° с. ш. В зависимости от этих параметров аномалии циркуляции в стратосфере делятся на 5 типов:

Тип I: стратосферный циклонический вихрь (СЦВ) находится над атлантическим сектором Арктики между меридианами 0 и 70° з. д., а тихоокеанский, атлантический и азиатский антициклонические центры располагаются в субтропических широтах.

Тип II: СЦВ находится над европейским сектором Арктики между меридианами 0 и 90° в. д., а тихоокеанский максимум смещен к северу, к Берингову проливу.

Тип III: СЦВ над азиатским сектором Арктики между меридианами 90 и 180° в. д.

Тип IV: СЦВ располагается над американским сектором Арктики между меридианами 180° в. д. и 70° з. д.

Тип V: раздвоение стратосферного циклонического вихря. Один центр располагается над евразийской частью полушария, второй – над американской частью.

В типизации Храброва основным объектом анализа являются особенности распределения поля давления, характеризующие конфигурацию полярного вихря. Положение и глубина полярного вихря определяют синоптическую ситуацию в стратосфере, на фоне которой развиваются стратосферные потепления. Для характеристики самих стратосферных потеплений мы использовали собственную типизацию, построенную, в общем, по тем же принципам, что и типизация Храброва, но относительно аномалий поля температуры. В этой типизации мы использовали 8 градаций с долготными интервалами разной ширины (0–90, 0–180, 90–180, 0–270, 0–360, 90–270, 270–180, 270–360° в. д.), что позволило одновременно следить за положением и масштабом температурных аномалий. Качественный анализ ВСП был дополнен количественными расчетами максимальных значений температуры и давления во время ВСП. Полученные характеристики усреднялись затем за пятилетние интервалы. Кроме средних значений за пятилетние интервалы времени рассчитывались максимальные значения температуры и давления. Оценки экстремальных значений в какой-то степени характеризовали степень неустойчивости циркуляции в стратосфере во время ВСП за различные пятилетние интервалы и дополняли расчеты средних значений аномалий температуры и давления во время ВСП. За последовательные пятилетние интервалы рассчитывались и повторяемости различных типов циркуляции по Храброву и типов термических аномалий во время ВСП.

Результаты

Рассмотрим сначала средние за весь период анализа распределения типов циркуляции по Храброву. В табл. 1 представлено распределение форм циркуляции во время ВСП по типам классификации Храброва. Преобладающим является тип II циркуляции (51 %), 22 % случаев относятся к типу I, примерно в равном количестве наблюдаются типы III и V (13 %, 9 %), наиболее редким является IV – всего 5 % случаев.

Таблица 1

Распределение числа случаев различных типов циркуляции по классификации Храброва

	Типы циркуляции по классификации Храброва				
	Тип I	Тип II	Тип III	Тип IV	Тип V
Число случаев	30	71	18	7	12
%	22	51	13	5	9

Таблица 2

Распределение числа случаев ВСП с различной локализацией термических аномалий

	Долготные интервалы, ° в. д.							
	0–90	0–180	90–180	0–270	0–360	90–270	270–180	270–360
Число случаев	3	33	27	22	7	7	10	7
%	3	28	23	19	6	6	9	6

Перейдем теперь к анализу распределений ВСП по предложенной нами типизации. В табл. 2 и на рис. 1 представлено распределение числа случаев ВСП с различной локализацией термических аномалий. Наибольшая повторяемость потеплений отмечается в долготном интервале 0–180° (такая ситуация наиболее вероятна при реализации Типа II из табл. 1). На втором месте по частоте появления – события с меньшим пространственным масштабом, локализованные в секторе 90–180°. Третьими по повторяемости являются крупномасштабные ВСП, охватывающие долготный сектор 0–270°. Относительно редко (7 событий) наблюдались крупномасштабные ВСП, охватывающие всю полярную область полушария, а также локальные атлантические потепления, соответствующие Типу IV из табл. 1.

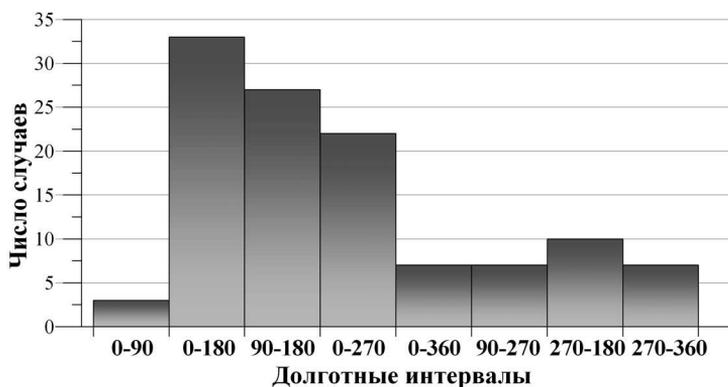


Рис. 1. Число случаев внезапных стратосферных потеплений в различных долготных секторах за период с 1975-го по 2013 г.

Для анализа долговременных изменений повторяемости различных типов циркуляции по Храброву и различных типов ВСП мы разделили весь период исследования на временные интервалы: 1975–1979, 1980–1984, 1985–1989, 1990–1994, 1995–1999, 2000–2004, 2005–2009, 2010–2013 гг., для каждого из которых построили распределения ВСП по восьми долготным секторам (рис. 2а) и гистограммы типов Храброва (рис. 2, б).

Видно, что до середины 90-х гг. преобладали крупномасштабные события, охватывающие полярную область восточной полушеры. Исключение составила пятилетка 1980–1984 гг., в которой практически все события имели еще больший масштаб и занимали до трех четвертей полярной области полушария. Во второй половине 90-х гг. и до 2005 г. уменьшилась частота появления ВСП, а сами события стали менее масштабными. В последние три пятилетки (2000–2013 гг.) преобладающими стали ВСП в секторе 90–180° и почти не было случаев с атлантическими потеплениями.

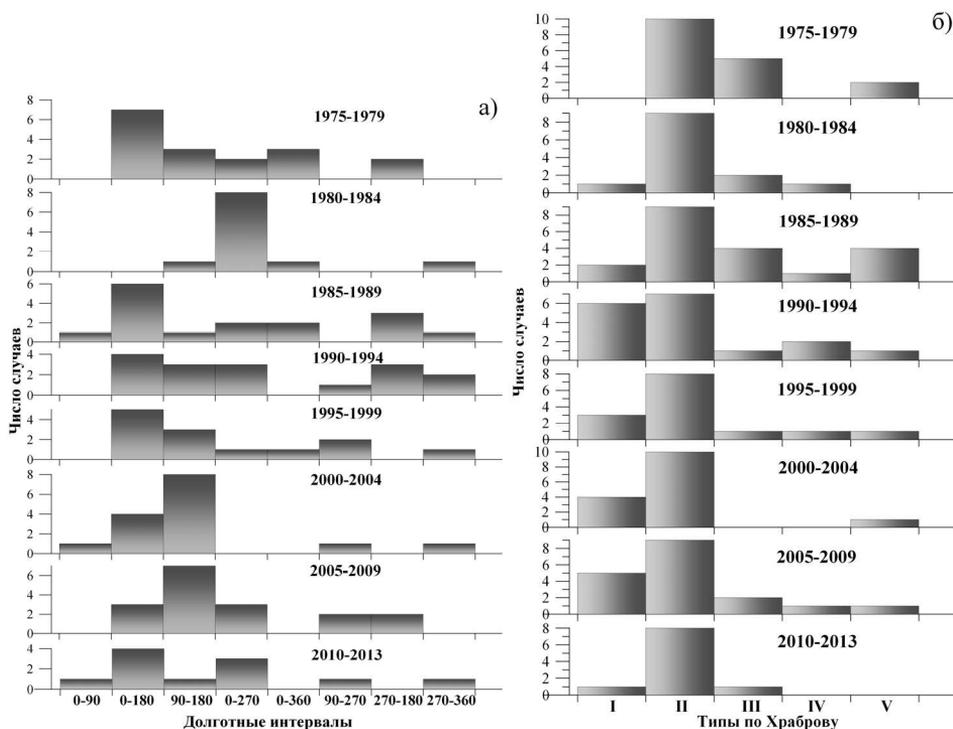


Рис. 2. Распределение за пятилетние периоды с 1975 по 2013 г.: а) местоположения ВСП, б) типов циркуляции по Храброву

По типизации Храброва в течение всего периода преобладающим был тип II, он встречался в половине случаев, и это соотношение сохранялось практически на протяжении всего исследуемого периода. Исключение составила лишь первая половина 90-х гг., когда увеличилась частота появления типа I. Второе место до первой половины 90-х гг. занимал тип III,

затем он сменился типом I. Типы IV и V с середины 90-х гг. встречались гораздо реже, чем в предыдущий период, отмечались либо единичные случаи, либо эти типы отсутствовали совсем.

Недостатком предложенных типизаций является их статичность. Долготные интервалы, в которых развивается ВСП или находится центр полярного вихря, предполагаются фиксированными. Во многих случаях это не так, и возможно, эти случаи имеют важное значение для понимания механизма ВСП. Рассмотрим в качестве примера развитие стратосферного потепления в феврале 1988 г. На рис. 3 приведена последовательность синоптических карт, на которых нанесены распределения температуры и давления на уровне 10 гПа. Хорошо видно попеременное «включение» температурных аномалий в различных секторах полушария – над Атлантикой и Восточной Азией. Можно предположить, что причиной периодических переключений является бегущее возмущение с периодом в интервале 15–25 суток. Такой характер развития процессов встречается в 8 % случаев, т. е. достаточно часто, причем в эту категорию были отнесены только самые очевидные случаи последовательного развития потеплений в разных секторах полярной области. Заметим, что наличие квазидвадцатидневной периодичности в стратосфере – факт, хорошо известный [3]. Новым является то, что в основе этой периодичности могут быть бегущие возмущения. Напрашивается предположение, что бегущие возмущения представляют собой нормальные моды. Большой интерес тогда представляет механизм их накачки.

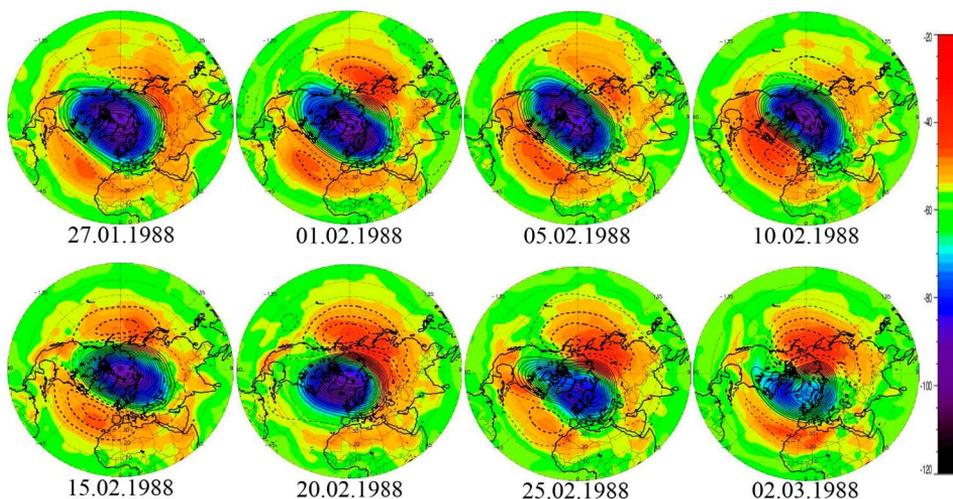


Рис. 3. Изменение термобарического поля на уровне 10 гПа, февраль 1988 г. Заливкой выделены термические аномалии, красный цвет – положительные аномалии, синий цвет – отрицательные аномалии. Изолиниями выделены аномалии барического поля. Сплошные линии – положительные аномалии, штриховые линии – отрицательные аномалии

Следующей задачей был анализ долговременных изменений количественных характеристик ВСП. Объектом анализа выступили максимальная температура и максимальная геопотенциальная высота термических и барических аномалий на уровне 10 гПа во время потеплений. За пятилетние интервалы затем были рассчитаны средние и максимальные значения этих характеристик. На рис. 4 представлены графики долговременных изменений этих характеристик.

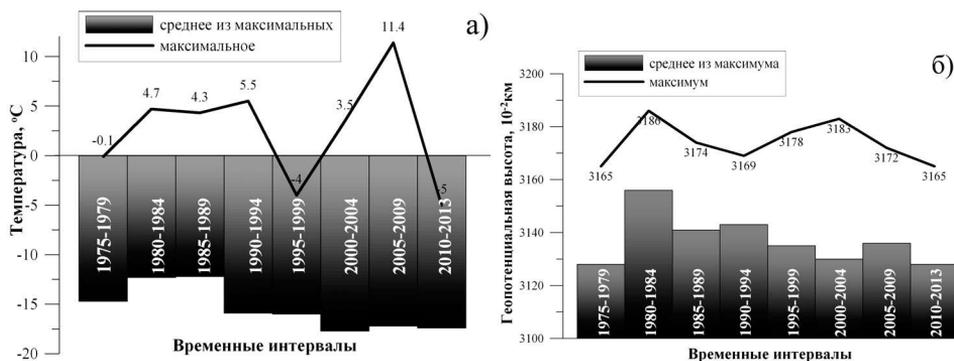


Рис. 4. Изменения со временем температурных характеристик ВСП (а), максимальных значений геопотенциала во время ВСП (б).

За весь период с 1975 по 2013 г. средняя температура в области потеплений составила -18°C , тогда как средняя многолетняя температура в полярной области равна -59°C . 20 января 2009 г. максимальная температура в период ВСП составила $11,4^{\circ}\text{C}$ – это самая высокая температура за весь период. Температура в этот момент превышала среднюю многолетнюю температуру в полярной области на $70,4^{\circ}\text{C}$! В целом за исследуемый период максимальное давление и максимальное давление в день с максимальной температурой изменялись в пределах 3206 – 3077 гПа и 3186 – 3075 гПа соответственно.

Хорошо видно снижение средних значений максимальной температуры и давления во время ВСП с середины 90-х гг. до 2005 г. Этот период с пониженной интенсивностью ВСП согласуется с ранее отмеченным снижением пространственного масштаба событий. Несколько сложнее ведут себя графики максимальных значений температуры и геопотенциала. Снизилась повторяемость мажорных стратосферных потеплений, уменьшилась амплитуда температурных аномалий. Стоит отметить, что в период с 2005 по 2009 г. интенсивность стратосферных потеплений несколько возросла, наибольший вклад в увеличение интенсивности ВСП в этот период внесло рекордное потепление в январе 2009 г.

Выполненный анализ считать полным. К сожалению, использованные нами данные ограничены уровнем 10 гПа, хотя известно, что основные события во время ВСП развиваются на более высоких уровнях. Этот факт необходимо принимать во внимание, так как установлено, что в последние

годы наблюдается перемещение зоны максимальных температурных аномалий вверх.

Заключение

Проведенное исследование показало, что в большинстве случаев стратосферные потепления развиваются над Азиатско-тихоокеанским регионом. Потеплениям этого типа соответствует тип II стратосферной циркуляции по классификации Ю. Б. Храброва. Наиболее редкими событиями являются ВСП над Атлантическим сектором Арктики (тип IV). В целом за весь период с 1975 по 2013 г. устойчивый тренд в температуре или значениях геопотенциала во время ВСП отсутствовал, однако с середины 90-х гг. интенсивность и пространственный масштаб стратосферных потеплений снижались. Кратковременное возрастание интенсивности стратосферных потеплений в 2005–2009-е гг. было обусловлено одним из самых мощных ВСП в 2009 г. Существенную роль в динамике потеплений могут играть бегущие возмущения с периодом примерно 15–25 сут., модулирующие развитие ВСП в разных долготных секторах.

Список литературы

1. Колебания общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды / под ред. Ю. Б. Храброва – Л. : Гидрометеороиздат. 1967. – 299с
2. *Погорельцев А. И.* Климатическая изменчивость динамики стратосферы, наблюдаемая в последние десятилетия / А. И. Погорельцев // Взаимодействие полей и излучения с веществом : тез. докл. XII конф. мол. ученых. – Иркутск, 2013. – С. 7–8.
3. A 20-day period standing oscillation in the northern winter stratosphere / K. Hocke [et al.] // *Ann. Geophys.* – 2013. – Vol. 1589. – P. 755–764.
4. *Scherhag, R.* Die explosionsartige Stratosphirenerwärmung des Spätwinters 1951/52 / R. Scherhag // *Ber. Deut. Wetterdienstes.* – 1952. – P. 51–63.
5. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project / E. Kalnay [et al.] // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1996. – Vol. 77 – P. 437–471.

Long-term changes of sudden stratospheric warmings

M. A. Rudneva, O. S. Kochetkova, V. I. Mordvinov

Annotation. The analysis of the dynamics of parameters of stratospheric warming in the Northern Hemisphere from 1975 to 2013. In most cases, stratospheric warming observed over the Asia-Pacific region. Warming of this type of match type II stratospheric circulation classification U. B. Khrabrov. Overall, for the entire period from 1975 to 2013. Stable trend in temperature or geopotential values in the stratosphere during the warming was absent, but since the mid 90's intensity and spatial scale of the stratospheric warming declined, although in some years, for example, in 2009, warming has been very powerful.

Key words: Stratosphere, stratospheric warming, stratospheric polar vortex.

Руднева Марина'Александровна
аспирант
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
тел.: 89041317030

Rudneva Marina'Alexandrovna
Postgraduate Student
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS
126a, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
p/o box 291
tel.: +79041317030

Кочеткова Ольга Сергеевна
младший научный сотрудник
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова 126а
тел.: 89246056128

Kochetkova Olga Sergeevna
Scientist Researcher
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS
126a, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
p/o box 291
tel.: +79246056128

Мордвинов Владимир Иванович
кандидат физико-математических наук,
доцент
Иркутский государственный университет
664033, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: 89148855272
Институт солнечно-земной физики
СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а
старший научный сотрудник

Mordvinov Vladimir Ivanovich
Ph. D. in Physical-Mathematical Sciences,
Docent
Irkutsk State University
1, Karl Marx st., Irkutsk, 664033
Institute of Solar-Terrestrial Physics
SB RAS
126a, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
p/o box 291
Senior Scientist
tel.: +79148855272