

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра метеорологии и климатологии

**Влияние внезапных стратосферных потеплений на режим  
метеорологических параметров свободной атмосферы**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки   2   курса   215   группы

направления   05.04.05 Прикладная гидрометеорология

  географического   факультета

  Митюковой Елизаветы Игоревны  

Научный руководитель,

  зав. кафедрой, к.г.н. доцент  

  М.Ю.Червяков  

Зав.кафедрой,

  доцент, к.г.н.  

  М.Ю.Червяков  

Саратов 2023

**Введение.** В настоящее время изучению процессов, протекающих в стратосфере, а также их взаимосвязи с циркуляцией в тропосфере, уделяется все большее внимание, поскольку эти процессы имеют тесные связи с изменениями в нижних слоях атмосферы, где формируется погода. Известно, что между тропосферой и стратосферой существуют как радиационные, так и динамические связи, а изменения в стратосфере, которые могут быть вызваны большими изменениями концентрации озона или углекислого газа, вероятно существенно повлияют на температуру у поверхности Земли.

Явление внезапного стратосферного потепления (ВСП) – пример важнейшего динамического зимнего явления, которое связывает стратосферу и тропосферу. В последние годы интерес к изучению событий ВСП существенно возрос. Изучение механизмов этого явления стратосферы необходимо для понимания влияния стратосферных событий на формирование аномалий погоды и климат в тропосфере и их прогнозирование.

Изменение повторяемости этих явлений может иметь глобальные последствия, отражающиеся на погоде в тропосфере в зимнее время года. Со времени открытия ВСП и за всю историю наблюдений было зарегистрировано около 100 явлений ВСП в стратосфере северного полушария, и их повторяемость в зимний период становится все больше.

Для исследования ВСП в настоящее время используются различные методы, в частности данные наземных спектрометрических и радиофизических наблюдений, различные реанализы (например MERRA и NCEP/NCAR), информация со спутников, а так же аэрологическое радиозондирование. Однако метод аэрологического радиозондирования является самым распространенным и системным видом получения метеорологической информации в верхних слоях атмосферы.

В данной работе была предпринята попытка использования данных аэрологического радиозондирования для оценки изменчивости температуры воздуха в стратосфере, а именно для слоев 30, 20 и 10 гПа, а также изменчивости высоты тропопаузы.

Во время ВСП происходит существенное изменение не только динамических факторов атмосферы, но и общего содержания озона. Поэтому одной из важнейших задач курсовой работы являлась оценка изменчивости содержания озона в атмосфере во время ВСП.

Выше изложенное определяет главную цель исследования: оценить возможность использования аэрологических наблюдений для выявления внезапных стратосферных потеплений, изучение взаимосвязи температура средней стратосферы и общего содержания озона в период наблюдаемых ВСП, а также выявление взаимосвязи высоты тропопаузы

### **Основное содержание работы**

#### **1 Идентификация внезапных стратосферных потеплений по температурным данным аэрологического радиозондирования**

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) представляет собой сложное явление, связанное с процессами не только в полярной области, но и в тропиках.

Несмотря на частую повторяемость данного явления, единого мнения среди ученых о нем до сих пор не существует. Одна из причин недостаточного внимания к анализу ВСП – это плохое понимание механизма ВСП, а также и причин, вызывающих данное явление в атмосфере. Вторая трудность имеет технический характер. 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, происходящего в стратосфере.

В метеорологическом словаре дано следующее определение данному явлению: ВСП – это сильное и внезапное повышение температуры «взрывного характера» в полярной и субполярной стратосфере зимой, иногда на  $50^{\circ}$  и более в течение нескольких (порядка десяти) суток. При этом меняется знак меридионального градиента температуры над полушарием, формируется стратосферный антициклон, и общий перенос воздуха меняется с западного на восточный. ВСП возникает в верхней стратосфере, в слоях, располагающихся над уровнем около 24 км, и затем распространяется также и на нижнюю стратосферу. Возвращение к нормальному зимнему режиму протекает медленнее, чем развитие потепления. Следует отличать ВСП данного «взрывного» типа от нормального потепления стратосферы в годовом ходе.

В настоящее время стратосферные потепления подразделяют на слабые, типа «minor», и значительные, или сильные, типа «major». Сильные потепления характеризуются сменой знака меридионального градиента температуры над полушарием и направления зональной стратосферной циркуляции на высоте 10 гПа с западного на восточное. Характерная особенность сильных потеплений состоит также в интенсификации горизонтальных градиентов давления, с которой связаны очень сильные ветры, до 120–200 м/с. Усиление ветра обычно на 8–10 дней предшествует потеплению.

Радиозонд – прибор, поднимаемый на газонаполненной оболочке в атмосферу и снабженный устройствами для измерения одного или нескольких метеорологических параметров (давления, температуры, влажности и др.), а также радиопередатчиком для передачи информации о результатах измерений на станцию наблюдения.

На интернет–портале Университета Вайоминга, США (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) [12] размещен большой

архив результатов радиозондирования, куда оперативно поступает аэрологическая информация со всего мира и является общедоступной.

Возможность визуализировать график изменения температуры с высотой позволила оперативно оценить наличие ВСП, а также наглядно определить ход температуры с высотой.

На основе данных радиозондирования Университета Вайоминга было проведено исследование изменчивости температуры воздуха нижней и средней стратосферы для станций с различными климатическими условиями.

На рисунке 1 представлены графики изменения температуры для нижней и средней стратосферы (30,20 и 10 гПа) в зимний период 2012–2013 г. для станции «Жиганск».

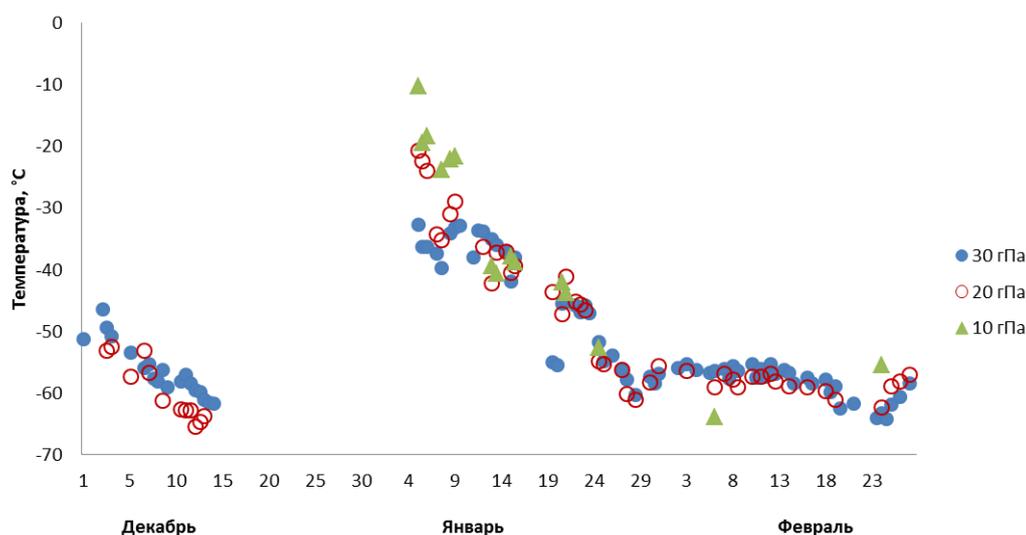


Рисунок 2 – Временная изменчивость температуры на высоте 30, 20 и 10 гПа в зимний период 2012–2013 г. для станции «Жиганск»  
(составлено автором)

Минимальная температура для станции «Жиганск» на уровне 30 гПа составляет  $-64,3^{\circ}\text{C}$ , а на уровне 20 гПа и 10 гПа соответственно  $-65,5^{\circ}\text{C}$  и  $-63,9^{\circ}\text{C}$ . Максимальная температура на уровне 30 гПа составляет  $-32,7^{\circ}\text{C}$ , а на уровне 20 гПа и 10 гПа соответственно  $-20,7^{\circ}\text{C}$  и  $-10,3^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, можно заметить, что значение температуры зимний период на высоте 30, 20 и 10 гПа может существенно изменяться в период ВСП, что возможно увидеть с помощью радиозондирования. На всех графиках отчетливо виден рост температуры перед наблюдаемым максимумом значений температуры на уровнях 30, 20 и 10 гПа, который в целом соответствует дате максимума ВСП.

## **2 Изменчивость общего содержания озона во время внезапных стратосферных потеплений**

Озон является малой газовой примесью в атмосфере, поглощает ультрафиолетовое излучение. Наибольшая плотность озона наблюдается на высоте около 20—25 км, наибольшая часть в общем объеме — на высоте 40 км. Химические свойства озона обуславливают его сильные окислительные свойства, поэтому в тропосфере озон — загрязнитель воздуха, оказывающий токсичное влияние на здоровье человека и экосистемы.

Общее содержание озона в атмосфере (ОСО) — толщина его слоя, приведенного к нормальному давлению и температуре. Регулярные наблюдения за ОСО ведутся много лет по единообразным, разработанным весьма тщательно методам.

При анализе пространственно-временных вариаций ОСО часто используются базы данных спутниковых измерений на основе приборов TOMS, OMI, а также объединенная база данных, дополненная измерениями на аппаратуре SBUV/SBUV2 – TOMS-SBUV merged total ozone data.

В Общее содержание озона (ОСО) в настоящей работе оценивалось по данным прибора OMI, размещенных на сайте NASA Earth Observations [19] для регионов близких к выбранным станциям радиозондирования.

Для каждого пункта была оценена синхронная изменчивость температуры на уровнях 10, 20 и 30 гПа и ОСО.

На рисунке 2 приведен временной ход температуры и ОСО в зимний период времени 2011-2012 года для изобарических поверхностей 30, 20 и 10 гПа для станции Вилуйск.

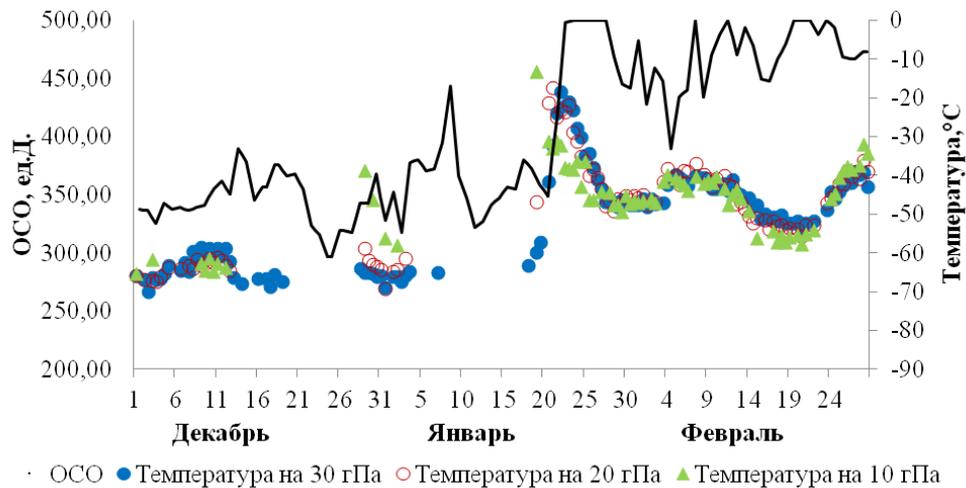


Рисунок 16 - Изменчивость температуры в средней стратосфере и ОСО в 2011-2012 над Вилуйском (составлено автором)

Как видно из графика, временной ход температуры и ОСО во многом совпадают. Это подтверждает и корреляция между ОСО и температурой на изобарической поверхности 30 гПа, график которой представлен на рисунке 3.

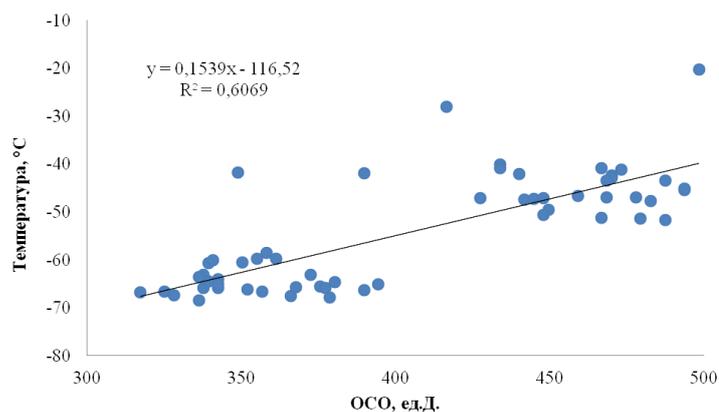


Рисунок 3 - Корреляционная диаграмма связи ОСО и температуры воздуха на высоте 30 гПа в 2011-2012 над Вилуйском (составлено автором)

Корреляция для станции Вилуйск между ОСО и температурой воздуха на изобарической поверхности 30 гПа за зимний период (январь-февраль) 2011-2012 составила 0,78.

Таким образом, в период ВСП может наблюдаться рост ОСО в стратосфере на уровнях 30, 20 и 10 гПа. Однако, происходит это не всегда. Значительно чаще наблюдается более высокие значения ОСО после ВСП.

### **3 Изменчивость высоты тропопаузы во время внезапных стратосферных потеплений**

Согласно определению, данному в метеорологическом словаре, тропопауза - переходной слой между тропосферой и стратосферой. Границы этого слоя часто не различимы отчетливо. Поэтому чаще называют тропопаузой верхнюю поверхность тропосферы, условно принимая за нее тот уровень, на котором вертикальный градиент температуры убывает до  $0,2^{\circ}/100$  м или ниже (и остается столь же низким по крайней мере в вышележащем слое 2 км).

Высота тропопаузы в высоких арктических широтах 8—10 км, в умеренных 10—12 км, над экватором 16—18 км. Зимой тропопауза ниже, чем летом; кроме того, высота тропопаузы колеблется при прохождении циклонов и антициклонов: в циклонах она опускается, в антициклонах поднимается, причем средняя разность высот в Европе 2 км, а в отдельных случаях значительно больше. Средняя температура на уровне тропопаузы над полюсом зимой около  $-65^{\circ}$ , летом около  $-45^{\circ}$ , над экватором весь год около  $-70^{\circ}$  и ниже.

Изменение характеристик тропопаузы косвенно зависит от потоков тепла в тропосфере и нижней стратосфере. Информация об изменении

структуры полярной тропопаузы имеет большое значение в условиях меняющегося климата.

На основе данных радиозондирования, размещенных на сайте Университета Вайоминга, было проведено исследование изменчивости высоты тропопаузы для станций с различными климатическими условиями: «Алдан», «Тобольск», «Витим», «Охотск» и «Магадан».

В ходе работы были проанализированы данные радиозондирования в зимний период (декабрь–февраль) с 2019 по 2023 г., что в целом составило 1620 подъемов радиозондов. Оценивались значения высоты тропопаузы как в ночное (срок 00:00), так и дневное (срок 12:00) время.

Так по данным радиозондирования удалось составить графики временного хода ОСО и высоты тропопаузы. Период, во время которого наблюдалось ВСП отмечен красным цветом.

Рассмотрим другой случай наблюдения за ВСП - зимний период времени 2018-2019 году. На рисунке 4 представлен график временного хода температуры и ОСО в зимний период времени 2018-2019 года для изобарических поверхностей 30, 20 и 10 гПа для станции Алдан.

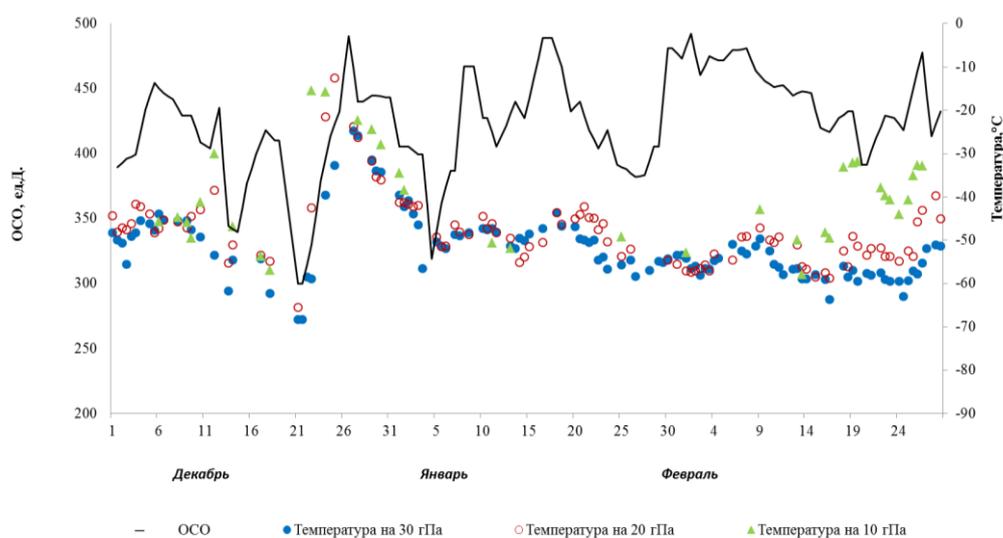


Рисунок 4 - График временного хода температуры и ОСО в зимний период времени 2018-2019 года для изобарических поверхностей 30, 20 и 10 гПа для станции Алдан (составлено автором)

Как видно из графика, в конце декабря происходит существенный рост температуры и ОСО, что указывает о возникновении ВСП. В целом потепление продолжалось в течении 10 дней, максимальное значение температуры для 10 гПа составило  $-15,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рисунке 5 представлен график временного хода высоты тропопаузы и ОСО в зимний период времени в 2018-2019 году для станции Алдан.

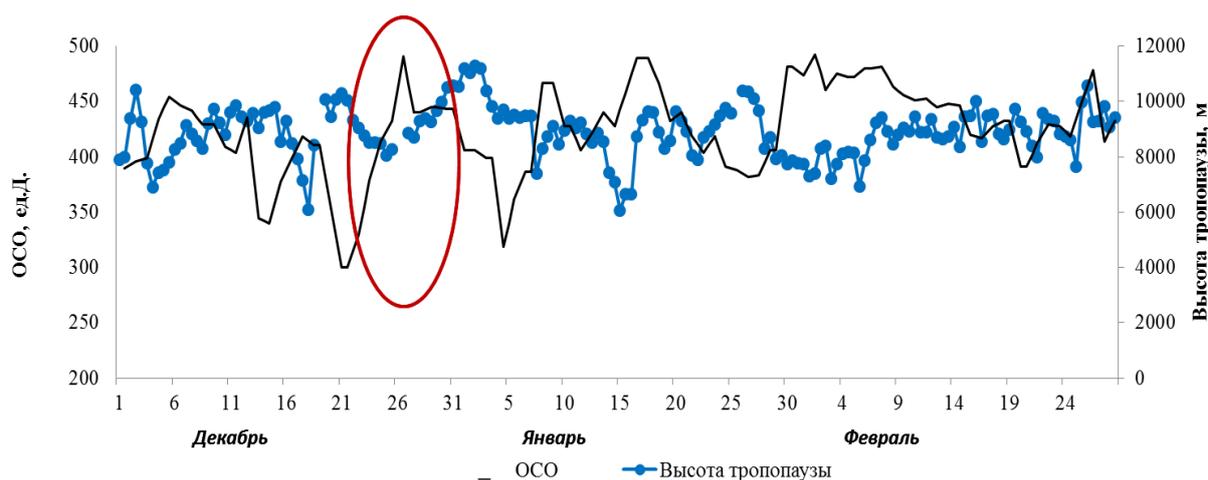


Рисунок 5 - Изменчивость высоты тропопаузы и ОСО в 2018-2019 над станцией Алдан (составлено автором)

Как видно из графика, временной ход высоты тропопаузы и ОСО практически не совпадают, в период с декабря по середину февраля отмечается небольшая противофаза во временном ходе. Также в период ВСП отчетливо прослеживается падение значений высоты тропопаузы с 10000 м до 8000 м, и данное падение продолжалось в течении нескольких дней. Корреляция между ОСО и высотой тропопаузы представлен на графике, который изображен на рисунке 6.

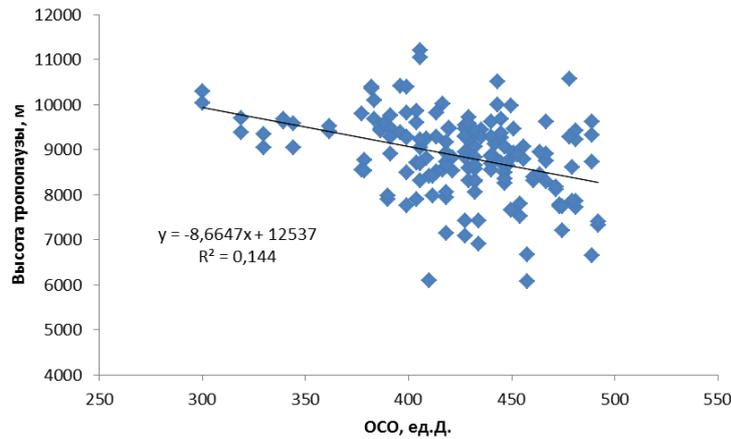


Рисунок 6 - Корреляционная диаграмма связи ОСО и высоты тропопаузы в 2018-2019 над станцией Алдан (составлено автором)

Корреляция для станции Алдан между ОСО и высотой тропопаузы за зимний период (январь-февраль) 2018-2019 составила -0,4.

Таким образом, в период ВСП может наблюдаться устойчивое в течении нескольких суток падение значений высоты тропопаузы. Однако, происходит это не всегда. Значительно чаще наблюдается изменение колебаний высоты тропопаузы уже после ВСП, особенно если значения температуры во время ВСП были достаточно высокими длительное время на всех трех изобарических поверхностях 30, 20 и 10 гПа. После такого мощного ВСП временной ход высоты тропопаузы приобретает обратный характер, он становится синхронным с временным ходом ОСО. Эта особенность ВСП «ломать» нормальный обратный ход ОСО с высотой тропопаузы приводит к снижению корреляции до значений, близких к 0.

**Заключение.** Таким образом, данные по температуре, которые получены с помощью аэрологического радиозондирования атмосферы, позволяют детектировать в средней стратосфере ВСП, а так же проследивать изменения температуры во время ВСП на различных уровнях.

Во время ВСП отмечался рост ОСО. Корреляция между температурой средней стратосферы и ОСО в среднем составила 0,76. С помощью расчета коэффициентов кросс-корреляции удалось выяснить, что запаздывание резкого увеличения ОСО во время ВСП по сравнению с температурой составляет 0-2 дня для 30 гПа, 2-4 дня для 20 гПа и 3-5 дней для 10 гПа.

Таким образом, содержание озона в средней стратосфере, которое зависит от положения и формы полярного вихря, является индикатором крупномасштабных атмосферных процессов в Северном полушарии, приближающихся сильных стратосферных потеплений.

Полученные результаты свидетельствуют об общем характере изменений озона в ряде зим с внезапными стратосферными потеплениями. Причина этих изменений связана, вероятно, с общими особенностями эволюции полярных вихрей и развития планетарных волн.

Результаты, полученные на основе радиозондирования атмосферы, по временному ходу высоты тропопаузы свидетельствует о влиянии ВСП на значения высоты тропопаузы. ВСП может приводить к устойчивому в течении нескольких суток падению значений высоты тропопаузы, а также к изменению колебаний высоты тропопаузы уже после ВСП, особенно если значения температуры во время ВСП были достаточно высокими длительное время на всех трех изобарических поверхностях 30, 20 и 10 гПа.