

Циркуляционные структуры в полярной стратосфере Северного полушария во время зим 2019–2021 гг.

Д. С. Хабитуев, Б. Г. Шпынев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия
E-mail: Khabituev@iszf.irk.ru*

Работа посвящена исследованию особенностей циркуляции верхней стратосферы в спокойные и возмущённые периоды. Проводится сравнительный анализ блокирующих свойств полярного стратосферного вихря во время декабря и января 2019–2021 гг. на основе траекторного анализа. В качестве исходных данных использованы данные реанализа European Reanalysis 5-го поколения (ERA5). Для определения внутренней границы полярного вихря используется метод запуска пробных частиц в трёхмерном поле значений скорости ветра, которые формируют замкнутые циркуляционные структуры. Рассмотрены основные различия формирования и динамики таких структур для разных периодов. Показано, что во время развития главной фазы внезапного стратосферного потепления, которое протекало в январе 2021 г., циркуляционная структура вихря разрушается, что способствует значительному «меридиональному» перемешиванию полярной стратосферы. Зафиксировано появление спорадических дополнительных внутренних циркуляционных колец внутри основной структуры полярного вихря. Проведены оценки средней вертикальной скорости перемещения пробных частиц.

Ключевые слова: полярный стратосферный вихрь, внезапные стратосферные потепления, лагранжевы когерентные структуры

Одобрена к печати: 18.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-307-316

Введение

Научный интерес к исследованию циркуляции средней атмосферы в полярных областях остаётся актуальным на протяжении последних десятилетий. Это связано с неполным пониманием процессов, которые развиваются в средней атмосфере во время полярных зим как в Северном, так и Южном полушариях. Глобальную циркуляцию атмосферного газа на высотах стратосферы в эти периоды можно охарактеризовать формированием околополярных вихрей, которые подвержены значительным возмущениям. Строение и динамика полярного вихря в Северном полушарии оказывают значительное влияние на тропосферную погоду. Стратосферным полярным вихрем называется крупномасштабная (планетарная) кольцевая структура западных стратосферных ветров, которые окружают полярную область (Vaugh, Polvani, 2010). В большом количестве работ показано, что при сильном стратосферном вихре в Северном полушарии наблюдаются тёплые зимы с более мягкой погодой, и наоборот, во время слабого вихря наблюдаются более суровые зимы с холодными полярными вторжениями (Варгин и др., 2015; Мордвинов, Латышева, 2013; Douville, 2009). Кроме того, полярный стратосферный вихрь (ПСВ) играет важную роль в формировании озоновых аномалий, выступая в роли динамического барьера и препятствуя поступлению среднеширотных воздушных масс, богатых озоном. Во время сильного вихря в центральной области температура может понижаться до аномально низких значений (ниже $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$), что способствует образованию полярных стратосферных облаков, которые являются источниками хлора, разрушающего озон (Brasseur, Solomon, 2005). Долгое время считалось, что возмущения в атмосфере могут передаваться только снизу вверх. Но с увеличением понимания процессов, которые контролируют глобальную циркуляцию, стало понятно, что происходит взаимное воздействие как тропосферы на стратосферу, так и наоборот. Такие воздействия, как правило, имеют нелинейный характер и приводят к трудностям в моделировании и составлении долгосрочных прогнозов.

Влияние стратосферы не ограничивается стратосферно-тропосферным взаимодействием. С развитием современных диагностических средств активно идёт изучение процессов взаимодействия стратосферы с мезосферой и верхней атмосферой (термосферой и ионосферой). Постоянно растёт количество работ, в которых регистрируется связь волновых возмущений в ионосфере и стратосфере (Goncharenko et al., 2010; Klimenko et al., 2013; Pancheva, Mukhtarov, 2011; Pedatella, 2022; Yasyukevich et al., 2022). Наиболее часто такая связь регистрируется при внезапных стратосферных потеплениях (ВСП), когда слабый полярный вихрь испытывает сильную деформацию. Во время таких процессов область деформации или полного разрушения полярного вихря выступает мощным генератором внутренних гравитационных волн, которые достигают высот термосферы (Harvey et al., 2022; Shpynev et al., 2015).

Формирование устойчивого полярного стратосферного вихря в Северном полушарии завершается в начале календарной зимы (как правило, в конце ноября или в первых числах декабря). Полярный стратосферный вихрь представляет собой глобальную циркуляционную структуру кольцеобразной формы. На всех высотах стратосферы формируется западный перенос, который перемещает огромные массы воздуха с запада на восток. Кольцевая структура вихря играет роль динамического барьера, который препятствует проникновению периферийных (среднеширотных и экваториальных) воздушных масс в центральную область, нарушая глобальную меридиональную циркуляцию Брюера–Добсона (Butchart, 2014). Сила такого динамического барьера зависит от силы ветра внутри ПСВ, его формы и устойчивости. При усилении планетарных волн с волновым числом 1 и 2 происходит сильная деформация кольцевой структуры вихря, что приводит к более слабому потоку и, как следствие, понижению блокирующих свойств ПСВ. Ослабление ПСВ может приводить к разделению вихря на две части и к полному разрушению в дальнейшем. Если в средней стратосфере на высоте 10 гПа (~30 км) происходит изменение направления среднезонального ветра с западного на восточное, то такие события классифицируются как крупные внезапные стратосферные потепления. Если направление циркуляции не меняется, то ВСП классифицируются как слабые. Во время ВСП температура полярной стратосферы резко повышается на десятки градусов.

В Северном полушарии ВСП регистрируются в среднем два раза за три года. Однако крупные ВСП со сменой знака скорости ветра являются уникальными явлениями. Самое сильное было зафиксировано в январе 2009 г. (Зуев и др., 2021). В Южном полушарии ВСП регистрируются гораздо реже, а крупное было зафиксировано лишь единожды в 2002 г. (Савельева, 2020; Baldwin et al., 2003). Такая асимметрия подтверждает «волновую» причину ВСП, так как в Южном полушарии в связи с отсутствием крупных материковых масс планетарная волновая активность значительно слабее. За многолетнюю историю наблюдений была обнаружена связь между характером циркуляции полярной стратосферы и квазидвухлетним колебанием (КДК) направления ветра в экваториальной стратосфере, а также такими глобальными процессами, как Южное колебание и Арктическая осцилляция (Варгин и др., 2021; Baldwin, Dunkerton, 1999; Baldwin, O'Sullivan, 1995). Однако, несмотря на то что мы знаем некую вероятность возникновения ВСП, долгосрочный точный прогноз таких событий остаётся за пределами возможности современных численных моделей.

Для проведения комплексного анализа динамики полярной стратосферы важным этапом представляется идентификация границ полярного вихря (оконтуривание). Наиболее простой способ оконтуривания вихря заключается в использовании поля потенциальной завихренности. Такой метод позволяет достаточно точно определить границу ПСВ во время спокойных условий, но приводит к большой неоднозначности во время сильной деформации и филаментации стратосферного потока. В последние годы всё большую популярность набирает метод определения границ ПСВ с помощью метода лагранжевых когерентных структур (ЛКС) (Serra et al., 2017). Он основан на расчёте коэффициентов расхождения траекторий движения пробных (или мнимых) частиц в поле скоростей стратосферного ветра. Для определения ЛКС рассчитывается поле показателей (экспонент) Ляпунова. Максимальные значения этого поля формируют регионы притягивания траекторий, которые естественным образом определяют непреодолимые для пересечения пробных частиц границы. Расчёт показателей Ляпунова для

стратосферных полей ветра позволяет определять границы ПСВ, которые изолируют внутреннюю часть вихря от проникновения периферийного воздуха. Такой подход становится удобным способом оконтуривания ПСВ во время сильной деформации и развития ВСП, однако требует больших вычислительных возможностей и не учитывает поле вертикальных скоростей.

В работе (Shrynev et al., 2019) было проведено исследование ВСП 2013 г. с помощью оригинальной методики траекторного анализа пробных частиц. Такой способ позволил проводить анализ движений стратосферного газа не только в горизонтальной плоскости, но и в вертикальной. Данный способ схож по своей сути с методом ЛКС и расчётом М-функции (Bowman, 1993; Smith, McDonald, 2014), но не требует большой вычислительной мощности. Для определения характера стратосферной циркуляции, как правило, не нужно рассчитывать траектории более чем для 100 частиц. Такое количество вполне достаточно, чтобы частицы, группируясь внутри стратосферного вихря, естественным образом очерчивали ЛКС. Кроме того, использование поля вертикальных скоростей позволяет детектировать области подъёма и опускания стратосферного воздуха. Было показано, что в январе 2013 г. (во время развития главной фазы ВСП) отдельные траектории движения пробных частиц имеют значимую вертикальную компоненту скорости, что свидетельствует о существенном вертикальном «перемешивании» стратосферы во время ВСП. Такие результаты согласуются с концепцией стратосферных «дыр», предложенной в работе (Jadin, 2011).

Структура полярных стратосферных вихрей в 2019–2021 гг.

Настоящее исследование направлено на сравнение циркуляционных процессов, которые протекали в стратосфере Северного полушария зимой 2019/20 и 2020/21 гг. Для данных периодов свойственны кардинально различные циркуляционные сценарии в полярной стратосфере. Зима 2019/20 гг. характеризуется сильным стратосферным полярным вихрем, блокирующие свойства которого привели к падению общего содержания озона в Арктическом регионе до минимальных климатических значений (Petkov et al., 2021). Зимой 2020/21 гг. реализовался совершенно противоположный сценарий. Сильная деформация и последующее разрушение вихря сопровождалось развитием крупного ВСП в январе 2021 г., в результате чего область озонового истощения не смогла сформироваться.

В качестве информации для анализа были использованы данные полного вектора скорости ветра, которые доступны в последней версии реанализа European Reanalysis 5-го поколения (ERA5) (Hersbach et al., 2020), а также данные общего содержания озона (ОСО) со спутника Aura/MLS (*англ.* Microwave Limb Sounder) (Waters et al., 2006). На *рис. 1* (см. с. 310) представлен полный вектор горизонтальной скорости ветра Северного полушария на высоте 1 гПа (~50 км) совместно с ОСО по данным спутника Aura/MLS в декабре и январе 2019/20 гг. (см. *рис. 1а*) и 2020/21 гг. (см. *рис. 1б*). Спутник Aura имеет околополярную орбиту и совершает 15 пролётов в сутки, поэтому данные ОСО интерполированы на всё Северное полушарие за одни сутки. Данные скорости ветра представлены для времени 12 UT (*англ.* Universal Time, всемирное время). Видно, что в период формирования вихря в первом случае наблюдаются более чёткие границы струйных течений, в то время как во втором случае поле ветра имеет большую дисперсию. Максимальные значения скорости ветра в ядре струйного течения вихря на левой панели (см. *рис. 1а*) достигают 170 м/с, тогда как на правой панели (см. *рис. 1б*) максимальная скорость не превышает 150 м/с. Во время зимы 2019/20 гг. форма полярного вихря претерпевает максимальные изменения в конце декабря – начале января и имеет практически форму окружности в начале декабря и конце января. Наибольшую деформацию вихрь испытывает в начале января, однако это не приводит к разрушению вихря и в конце января (23-го) замкнутая циркуляционная структура сохраняется, увеличиваясь при этом в размерах.

На правой панели (см. *рис. 1б*) представлен период зимы следующего года: декабрь 2020 г. – январь 2021 г. ПСВ имеет неправильную форму в виде восьмёрки практически

с момента своего формирования в начале декабря 2020 г. Такая форма обусловлена слиянием основного вихря с усилившимся в этот период Алеутским антициклоном (Варгин и др., 2022). Постепенно происходит «разрыв» замкнутого циркуляционного кольца Алеутского антициклона, перетекание энергии основного вихря в периферийное и поворот двойной циркуляционной структуры по часовой стрелке (31 декабря 2020 г.). В дальнейшем периферийная циркуляционная ячейка, которая образовалась над Алеутскими о-вами, становится преобладающей в двойной системе, что приводит к смене направления зонального ветра в средних широтах Евразийского континента с западного на восточное. Разрушение стандартной циркуляционной структуры стратосферы приводит к развитию крупного ВСП в начале января 2021 г. и повышению концентрации озона в полярных областях Северного полушария. Такое состояние циркуляции стратосферы с восточным ветром является неустойчивым, что приводит к полному разрушению вихря и восстановлению западных ветров в конце января.

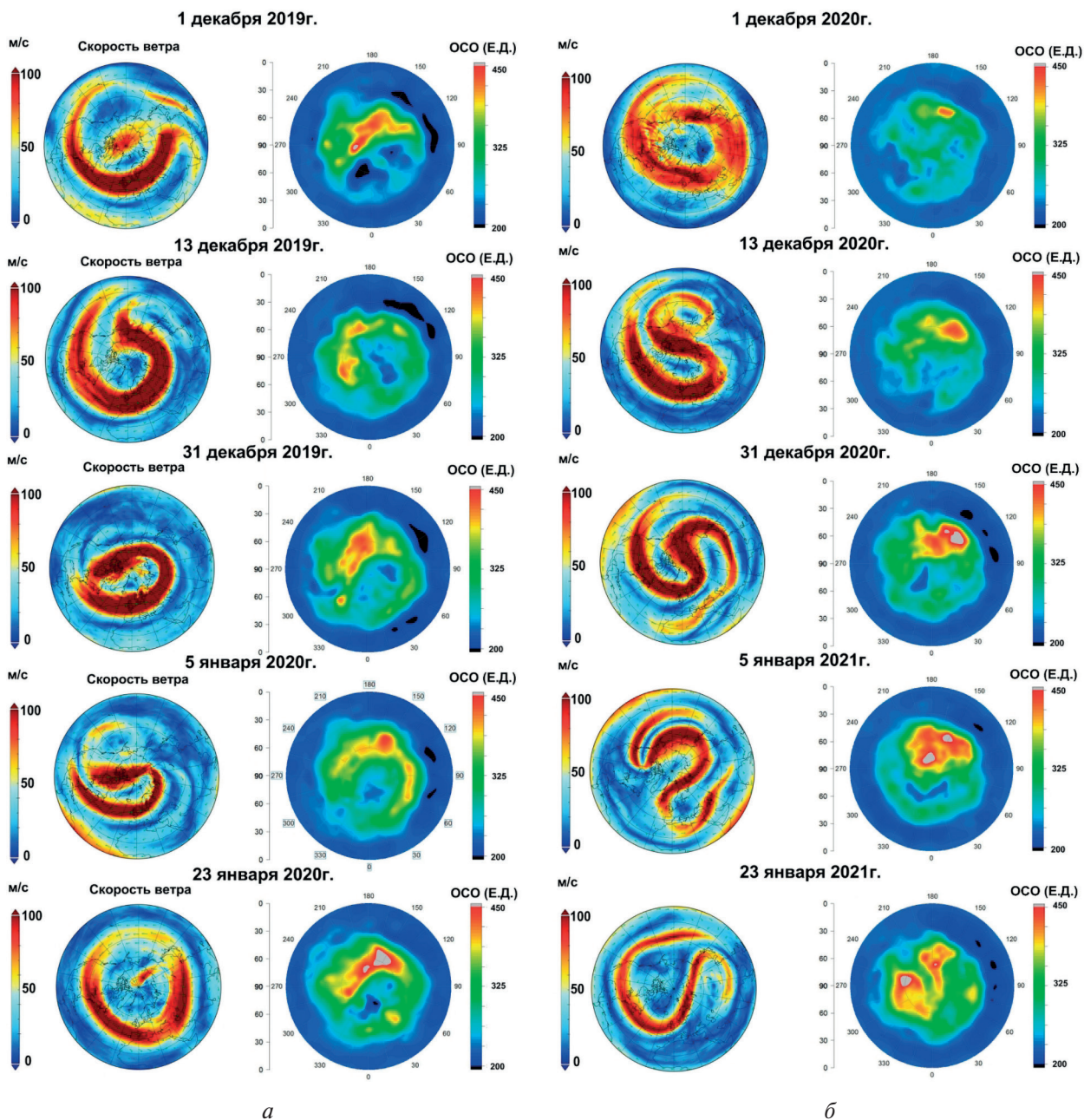


Рис. 1. Скорость ветра на уровне давления 1 гПа (~50 км) по данным ERA5 и ОСО по данным спутника Aura/MLS в Северном полушарии для зимы 2019/20 гг. (а) и 2020/21 гг. (б)

Лагранжевые когерентные структуры в стратосфере в 2019–2021 гг.

Для более детального анализа пространственного перемещения стратосферного газа в полярной области был применён траекторный анализ. Методика такого анализа заключается в расчёте траектории перемещения пробной частицы относительно начального положения. Расчёт смещения каждой частицы изначально проводится в декартовой системе отсчёта по трём осям X , Y , Z . Затем выполняется перевод из декартовых координат в сферическую систему координат, где учитывается уменьшение зонального перемещения частицы с увеличением широты. Вертикальное смещение по оси Z рассчитывается в координатах давления и переводится в метрическую систему в конечной точке пути. Большое количество одновременно запущенных частиц приводит к тому, что частицы, группируясь внутри стратосферного вихря, естественным образом очерчивают его границы, т. е. формируют ЛКС.

Вследствие ограничений, связанных с компьютерной мощностью, количество пробных частиц в эксперименте составляет 100. Такое количество достаточно для определения ЛКС. Пробные частицы в нулевой момент времени расположены симметрично относительно Северного полюса в поясе между 60 и 80° с. ш. с шагом в 2° по широте и 36° по долготе. Следующее положение каждой пробной точки рассчитывается через 6 ч. Перемещение происходит по всем трём осям трёхмерного пространства. Нулевой момент времени соответствует времени 1 декабря 00:00 UT на высоте 1 гПа (~ 50 км). На *рис. 2* (см. с. 312) показано положение пробных частиц в различные моменты времени после запуска для зимы 2019/20 гг. (левая панель) и 2020/21 гг. (правая панель). Рассмотрим более детально левую панель *рис. 2*. Видно, что к 13 декабря частицы начинают формировать замкнутую структуру, площадь которой составляет порядка 5 млн км². Красным цветом показаны замкнутые траектории движения пробных частиц. Хотя мы и не проводим расчёт показателей Ляпунова для определения ЛКС в явном виде, будем называть замкнутые траектории, по которым циркулируют пробные частицы, ЛКС. По характеру возмущений и времени жизни ЛКС можно судить о степени проницаемости границы ПСВ во время зимней циркуляции стратосферы. Чёткие границы ЛКС формируются к 31 декабря 2019 г. Особенно интересно, что формируется дополнительное внутреннее кольцо циркуляции. Образование такого кольца говорит о существовании дополнительного внутреннего барьера. Дополнительное кольцо разрушается уже к 5 января (т. е. через 5 сут) и поэтому, очевидно, не приводит к сегментации в области пониженного содержания озона. Однако в случае более долгого времени жизни дополнительные внутренние ЛКС, вероятно, могут приводить к усилению эффекта истощения озона и образованию озоновой дыры. Отметим, что за пределами главного кольца циркуляции находятся только три точки во все моменты времени, что свидетельствует о том, что ЛКС зимой 2019/20 гг. была сильным аттрактором и контролировала 97 % всех запущенных пробных частиц. Момент разрушения ЛКС остался за пределами исследования в связи с недоступностью данных ERA5 в свободном доступе в настоящий момент.

Рисунок 2б (правая панель) показывает положение пробных частиц после запуска с аналогичными стартовыми условиями во время зимы 2020/21 гг. Видно, что к 13 декабря формируется замкнутая циркуляционная структура большей площади порядка 6 млн км². Также отметим, что, как и в предыдущую зиму, формируется дополнительное внутреннее циркуляционное кольцо с большей площадью и менее чёткими границами. Дальнейшее развитие стратосферной циркуляции протекает по следующему сценарию. В конце декабря 2020 г. начинается «вытекание» частиц из ЛКС. В начале января данная когерентная структура полностью разрушается с перемещением пробных частиц в экваториальную область Тихого океана и среднеширотную область Атлантического океана. Пробные частицы за 5 сут перемещаются на расстояния порядка 10^4 км, причём траектории имеют высокий меридиональный градиент. К концу января частицы с меньшей скоростью «возвращаются» в полярную зону и группируются вокруг новых циркуляционных ячеек. Первая формируется в районе Гренландии, вторая — на северо-востоке Евразии.

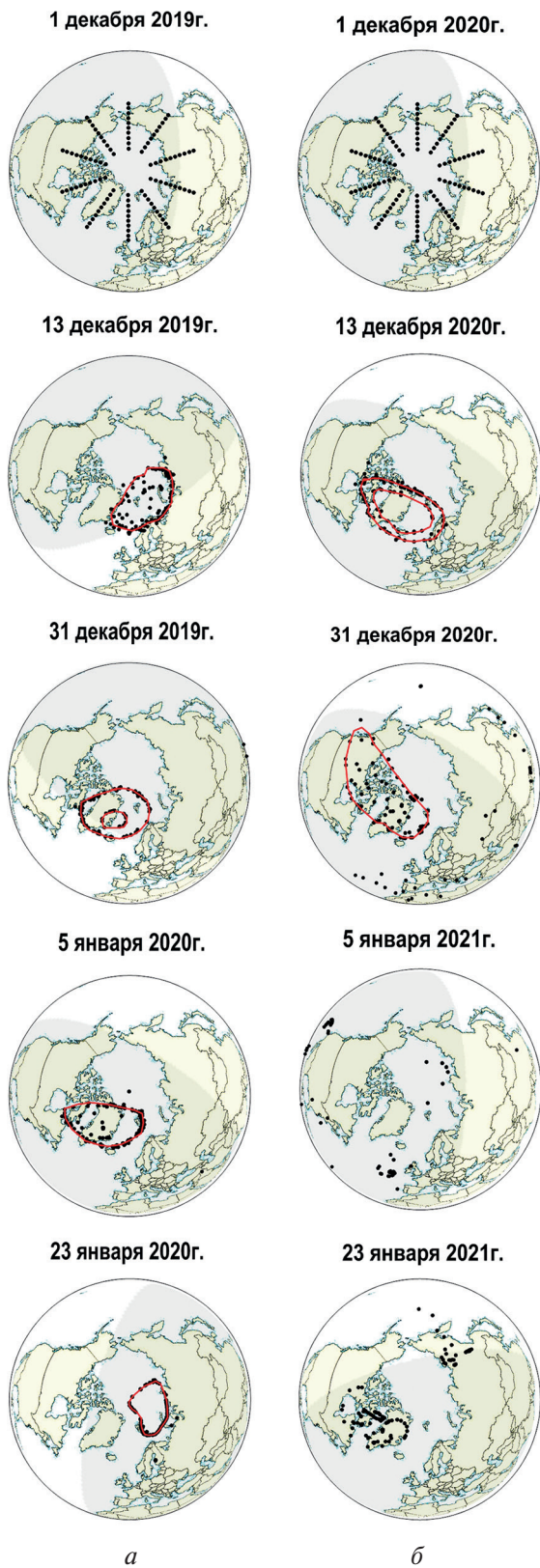


Рис. 2. Замкнутые циркуляционные структуры в верхней стратосфере для зимы 2019/20 гг. (а) и 2020/21 гг. (б)

Данные реанализа ERA5 дают полный вектор скорости ветра, включая вертикальную компоненту скорости в координатах давления (Па/с). Это позволяет отслеживать не только горизонтальные перемещения пробных частиц, но и их перемещение по высоте. Мы провели оценку средней скорости ансамбля запускаемых частиц. На рис. 3 (см. с. 313) представлен график средней скорости запускаемых частиц в рассматриваемые периоды. Видно, что амплитуда колебаний средней вертикальной скорости для зимы 2020/21 гг. значительно выше, чем для зимы 2019/20 гг. Синяя кривая показывает в среднем положительное направление вертикальной скорости до 38-го дня эксперимента, т. е. идёт подъём стратосферного газа в мезосферу, а далее меняет знак, и на протяжении января преобладает поток, направленный вниз. Во время зимы 2020/21 гг. положительное направление скорости сохраняется практически весь декабрь и январь. Максимальная вариация вертикальной скорости наблюдается во время ВСП в начале января 2021 г. (красная кривая). Максимальные отрицательные значения средней вертикальной скорости также фиксируются в этот период (36-й день с начала эксперимента), что свидетельствует об опускании стратосферного газа на внутренней границе ПСВ во время ВСП. Интересным результатом представляется корреляция красной кривой с моментами максимального (сизигийного) лунного прилива. Видно, что в моменты полнолуния и новолуния вертикальная скорость имеет максимальную амплитуду колебаний. Подобный результат был получен в работе (Shpynev et al., 2015) для периода января 2013 г., когда протекало сильное ВСП. Можно предположить, что во время сильного ПСВ, когда вихрь имеет замкнутую структуру и наблюдается сильный ветер в ядре струйного течения, гравитационный лунный прилив не проявляется, так как

не может «раскачать» крупномасштабную структуру вихря. Однако когда вихрь слабый, т. е. в моменты ВСП, слабое гравитационное воздействие прилива Луны способно оказать воздействие на динамику ПСВ. Основные гармоники гравитационного лунного прилива имеют частоты 27,55 сут (главная месячная волна) и 13,66 сут (двухнедельная волна), и такие волны регистрируются в стратосфере и мезосфере (Pertsev, Dalin, 2010). Вариации вертикальной скорости на рис. 3 имеют длину волны с близким периодом.

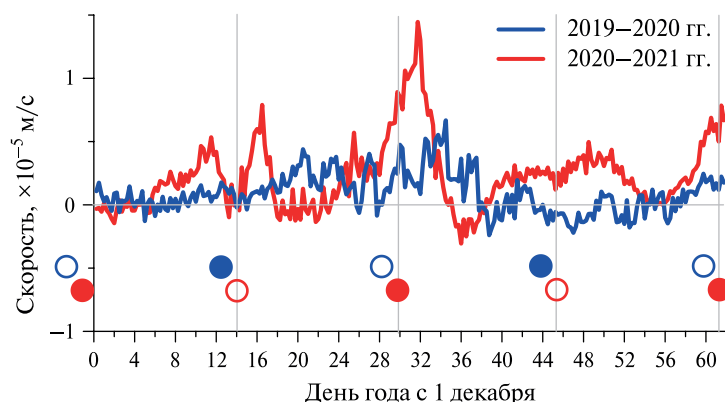


Рис. 3. Средняя вертикальная скорость ансамбля 100 пробных частиц. Кружками отмечены моменты максимального воздействия лунного прилива

Выводы

В работе проведён сравнительный анализ динамики когерентных циркуляционных структур в верхней стратосфере Северного полушария для зимы 2019/20 и 2020/21 гг. На основе траекторного анализа пробных частиц установлено, что ЛКС во время спокойного состояния стратосферной циркуляции играет роль устойчивого динамического барьера на протяжении декабря 2019 г. и января 2020 г. Во время развития крупного ВСП (январь 2021 г.) ЛКС распадается и траекторный анализ показывает перемещение стратосферного газа в средние широты. К концу января 2021 г. происходит «возвращение» пробных частиц в полярную область и группировка их в районе Гренландии (70 % частиц) и над северо-востоком Евразии (30 % частиц). Меридиональный перенос, который возникает во время ВСП, свидетельствует о разрушении динамического барьера ПСВ, и происходит «перемешивание» воздуха полярной стратосферы. Интересным результатом становится образование дополнительных внутренних колец циркуляции внутри ПСВ, которые имеют период жизни порядка недели. Оценка средней вертикальной скорости пробных частиц показала общее преобладание направленного вверх потока во время декабря 2019 г. Большую часть января 2020 г. вертикальная скорость имеет отрицательный знак. В январе 2021 г. смена знака наблюдается лишь в течение нескольких дней в начале месяца с преобладанием положительного направления в течение всех остальных дней. Во время слабого ПСВ зимой 2020/21 гг. максимальные амплитуды колебаний совпадают с максимальной силой лунного прилива (новолуние и полнолуние). Во время сильного ПСВ зимой 2019/20 гг. такой корреляции не наблюдается. В ходе дальнейших исследований планируется расширить количество исследуемых периодов для увеличения статистики и валидации полученных результатов.

Работа посвящается памяти моего научного руководителя Шпынева Бориса Геннадьевича. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-77-10008

Литература

1. Варгин П. Н., Володин Е. М., Карпечко А. Ю., Погорельцев А. И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // Вестн. Российской акад. наук. 2015. Т. 85. № 1. С. 39–46. DOI: 10.7868/S0869587315010181.
2. Варгин П. Н., Гурьянов В. В., Лукьянов А. Н., Вязанкин А. С. Динамические процессы стратосферы Арктики зимой 2020–2021 г. // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 651–664. DOI: 10.31857/S0002351521060109.
3. Зуев В. В., Савельева Е. С., Павлинский А. В. Анализ динамики арктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в январе 2009 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67. № 2. С. 134–146. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-134-146>.

4. *Мордвинов В. И., Латышева И. В.* Теория общей циркуляции атмосферы, изменчивость крупномасштабных движений. М.: Изд-во ИГУ, 2013. 193 с.
5. *Савельева Е. С.* Динамика антарктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в 2002 г. // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33. № 1. С. 50–55. DOI: 10.15372/AOO20200107.
6. *Baldwin M. P., Dunkerton T. J.* Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. P. 30937–30946.
7. *Baldwin M. P., O'Sullivan D.* Stratospheric effects of ENSO-related tropospheric circulation anomalies // *J. Climate*. 1995. V. 4. P. 649–667.
8. *Baldwin M. P., Hirooka T., O'Neil A., Yoden S.* Major stratospheric warming in the Southern Hemisphere in 2002: Dynamical aspects of the ozone hole split // *SPARC Newsletter*. 2003. V. 20. P. 24–26.
9. *Bowman K.* Large-scale isentropic mixing properties of the Antarctic polar vortex from analyzed winds // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. P. 23013–23027. DOI: 10.1029/93JD02599.
10. *Brasseur G., Solomon S.* *Aeronomy of the Middle Atmosphere*. Springer, 2005. 646 p.
11. *Butchart N.* The Brewer-Dobson circulation // *Reviews of Geophysics*. 2014. V. 52. P. 157–184. DOI: 10.1002/2013RG000448.
12. *Douville H.* Stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere winter climate variability // *Geophysical Research Letters*. 2009. V. 36. No. 18. Article L18703. DOI: 10.1029/2009GL039334.
13. *Goncharenko L. P., Chau J. L., Liu H.-L., Coster A. J.* Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere // *Geophysical Research Letters*. 2010. V. 37. No. 10. Article L10101. DOI: 10.1029/2010GL043125.
14. *Harvey V. L., Randall C. E., Bailey S. M. et al.* Improving ionospheric predictability requires accurate simulation of the mesospheric polar vortex // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. V. 9. DOI: 10.3389/fspas.2022.1041426.
15. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
16. *Jadin E. A.* Stratospheric “wave hole” and interannual variations of the stratospheric circulation in late winter // *Natural Science*. 2011. V. 3. No. 4. P. 259–267. DOI: 10.4236/ns.2011.34033.
17. *Klimenko M. V., Klimenko V. V., Koren'kov Yu. N. et al.* Modeling of response of the thermosphere-ionosphere system to sudden stratospheric warmings of years 2008 and 2009 // *Cosmic Research*. 2013. V. 51. No. 1. P. 54–63. DOI: 10.1134/S001095251301005X.
18. *Pancheva D., Mukhtarov P.* Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. V. 73. No. 113. P. 1697–1702. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.006.
19. *Pedatella N.* Ionospheric variability during the 2020–2021 SSW: COSMIC-2 observations and WACCM-X simulations // *Atmosphere*. 2022. V. 13. No. 3. Article 368. DOI: 10.3390/atmos13030368.
20. *Pertsev N., Dalin P.* Lunar semimonthly signal in cloudiness: lunar-phase or lunar-declination effect? // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2010. V. 72. P. 713–717. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.03.013.
21. *Petkov B., Vitale V., Di Carlo P. et al.* The 2020 Arctic ozone depletion and signs of its effect on the ozone column at lower latitudes // *Bull. Atmospheric Science and Technology*. 2021. V. 2. Article 8. DOI: 10.1007/s42865-021-00040-x.
22. *Serra M., Sathe P., Beron-Vera F., Haller G.* Uncovering the Edge of the Polar Vortex // *J. Atmospheric Sciences*. 2017. V. 74. No. 11. P. 3871–3885. DOI: 10.1175/JAS-D-17-0052.1.
23. *Shpynev B. G., Churilov S. M., Chernigovskaya M. A.* Generation of waves by jet stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015. V. 136. P. 201–215. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.005.
24. *Shpynev B. G., Khabituев D. S., Chernigovskaya M. A., Zorkaltseva O. S.* Role of winter jet stream in the middle atmosphere energy balance // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 188. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jastp.2019.03.008.
25. *Smith M. L., McDonald A. J.* A quantitative measure of polar vortex strength using the function M // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2014. V. 119(10). P. 5966–5985. DOI: 10.1002/2013JD020572.
26. *Waters J. W., Froidevaux L., Harwood R. S. et al.* The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2006. V. 44. P. 1075–1092. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873771.
27. *Waugh D. W., Polvani L. M.* Stratospheric polar vortices // *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry*. Geophysical Monograph Ser. 2010. V. 190. P. 43–57. <https://doi.org/10.1029/GM190>.
28. *Yasyukevich A. S., Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G. et al.* Features of Winter Stratosphere Small-Scale Disturbance during Sudden Stratospheric Warmings // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Article 2798. DOI: 10.3390/rs14122798.

The circulation structures in the polar stratosphere of the Northern Hemisphere during the 2019–2021 winters

D. S. Khabituev, B. G. Shpynev

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk 664033, Russia

E-mail: Khabituev@iszf.irk.ru

This work is devoted to the study of the upper stratosphere circulation features in quiet and disturbed periods. A comparative analysis of blocking properties of the polar stratospheric vortex during December and January 2019–2021 is carried out. ERA5 reanalysis data and Aura-MLS satellite data are used. To determine the inner boundary of the polar vortex, the method of launching test particles in a three-dimensional field of wind speed values is used, forcing the particles to form closed circulation structures. The focus of this work is to determine the differences in the dynamics of the stratospheric vortex under quiet and disturbed conditions. It is shown that during the development of the main phase of a sudden stratospheric warming similar to the one occurred in January 2021, the circulation structure of the vortex is destroyed. This vortex disruption contributes to significant “meridional” mixing of the polar stratosphere. Estimates of average vertical velocity of movement of the test particles are made.

Keywords: polar stratospheric vortex, sudden stratospheric warming, Lagrangian coherent structures

Accepted: 18.09.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-307-316

References

1. Vargin P. N., Volodin E. M., Karpechko A. Yu., Pogoreltsev A. I., Stratosphere troposphere interactions, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2015, Vol. 85, No. 1, pp. 56–63, DOI: 10.1134/S1019331615010074.
2. Vargin P. N., Lukyanov A. N., Vyzankin A. S., Guryanov V. V., Dynamic processes of the arctic stratosphere in the 2020–2021 winter, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, No. 6, pp. 568–580, DOI: 10.1134/S0001433821060098.
3. Zuev V. V., Savelieva E. S., Pavlinsky A. V., Analysis of the Arctic polar vortex dynamics during the sudden stratospheric warming in January 2009, *Arctic and Antarctic Research*, 2021, Vol. 67, No. 2, pp. 134–146 (in Russian), <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-134-146>.
4. Mordvinov V. I., Latysheva I. V., *Teoriya obshchei tsirkulyatsii atmosfery, izmenchivost' krupnomasshtabnykh dvizhenii* (Theory of general atmospheric circulation, variability of large-scale movements), Irkutsk: Izd. IGU, 2013, 193 p. (in Russian).
5. Savelieva E. S., Dynamics of the Antarctic polar vortex during the 2002 sudden stratospheric warming, *Optika atmosfery i okeana*, 2020, Vol. 33, No. 1, pp. 50–55 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20200107.
6. Baldwin M. P., Dunkerton T. J., Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, pp. 30937–30946.
7. Baldwin M. P., O’Sullivan D., Stratospheric effects of ENSO-related tropospheric circulation anomalies, *J. Climate*, 1995, Vol. 4, pp. 649–667.
8. Baldwin M. P., Hirooka T., O’Neil A., Yoden S., Major stratospheric warming in the Southern Hemisphere in 2002: Dynamical aspects of the ozone hole split, *SPARC Newsletter*, 2003, Vol. 20, pp. 24–26.
9. Bowman K., Large-scale isentropic mixing properties of the Antarctic polar vortex from analyzed winds, *J. Geophysical Research*, 1993, Vol. 98, pp. 23013–23027, DOI: 10.1029/93JD02599.
10. Brasseur G., Solomon S., *Aeronomy of the Middle Atmosphere*, Springer, 2005, 646 p.
11. Butchart N., The Brewer-Dobson circulation, *Reviews of Geophysics*, 2014, Vol. 52, pp. 157–184, DOI: 10.1002/2013RG000448.
12. Douville H., Stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere winter climate variability, *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, No. 18, Article L18703, DOI: 10.1029/2009GL039334.
13. Goncharenko L. P., Chau J. L., Liu H.-L., Coster A. J., Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere, *Geophysical Research Letters*, 2010, Vol. 37, No. 10, Article L10101, DOI: 10.1029/2010GL043125.

14. Harvey V. L., Randall C. E., Bailey S. M. et al., Improving ionospheric predictability requires accurate simulation of the mesospheric polar vortex, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2022, Vol. 9, DOI: 10.3389/fspas.2022.1041426.
15. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., The ERA5 global reanalysis., *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2020, Vol. 146, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
16. Jadin E. A., Stratospheric “wave hole” and interannual variations of the stratospheric circulation in late winter, *Natural Science*, 2011, Vol. 3, No. 4, pp. 259–267, DOI: 10.4236/ns.2011.34033
17. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Koren’kov Yu. N. et al., Modeling of response of the thermosphere-ionosphere system to sudden stratospheric warmings of years 2008 and 2009, *Cosmic Research*, 2013, Vol. 51, No. 1, pp. 54–63, DOI: 10.1134/S001095251301005X.
18. Pancheva D., Mukhtarov P., Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, Vol. 73, No. 113, pp. 1697–1702, DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.006.
19. Pedatella N., Ionospheric variability during the 2020–2021 SSW: COSMIC-2 observations and WACCM-X simulations, *Atmosphere*, 2022, Vol. 13, No. 3, Article 368, DOI: 10.3390/atmos13030368.
20. Pertsev N., Dalin P., Lunar semimonthly signal in cloudiness: lunar-phase or lunar-declination effect? *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, Vol. 72, pp. 713–717, DOI: 10.1016/j.jastp.2010.03.013.
21. Petkov B., Vitale V., Di Carlo P. et al., The 2020 Arctic ozone depletion and signs of its effect on the ozone column at lower latitudes, *Bull. Atmospheric Science and Technology*, 2021, Vol. 2, Article 8, DOI: 10.1007/s42865-021-00040-x.
22. Serra M., Sathe P., Beron-Vera F., Haller G., Uncovering the Edge of the Polar Vortex, *J. Atmospheric Sciences*, 2017, Vol. 74, No. 11, pp. 3871–3885, DOI: 10.1175/JAS-D-17-0052.1.
23. Shpynev B. G., Churilov S. M., Chernigovskaya M. A., Generation of waves by jet stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2015, Vol. 136, pp. 201–215, DOI: 10.1016/j.jastp.2015.07.005.
24. Shpynev B. G., Khabituев D. S., Chernigovskaya M. A., Zorkaltseva O. S., Role of winter jet stream in the middle atmosphere energy balance, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, Vol. 188, pp. 1–10, DOI: 10.1016/j.jastp.2019.03.008.
25. Smith M. L., McDonald A. J., A quantitative measure of polar vortex strength using the function M , *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, Vol. 119(10), pp. 5966–5985, DOI: 10.1002/2013JD020572.
26. Waters J. W., Froidevaux L., Harwood R. S. et al., The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura satellite., *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, pp. 1075–1092, DOI: 10.1109/TGRS.2006.873771.
27. Waugh D. W., Polvani L. M., Stratospheric polar vortices, *The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry. Geophysical Monograph Ser.*, 2010, Vol. 190, pp. 43–57, <https://doi.org/10.1029/GM190>.
28. Yasyukevich A. S., Chernigovskaya M. A., Shpynev B. G. et al., Features of Winter Stratosphere Small-Scale Disturbance during Sudden Stratospheric Warmings, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 2798, DOI: 10.3390/rs14122798.