

На правах рукописи



Диденко Ксения Андреевна

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТАЦИОНАРНЫХ
ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ**

Специальность 25.00.29

Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2022

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Вопрос о распространении планетарных волн в стратосфере уже давно занимает центральное место в работах по стратосферной динамике в связи с важностью их влияния на среднюю циркуляцию и на распределение озона, а также других химических веществ. В частности, стационарные планетарные волны (СПВ), определяющиеся фиксированной относительно Земли поверхностью постоянной фазы, распространяются с групповыми скоростями, обеспечивая перенос энергии и импульса из тропосферы. Воздействие волн, приходящих снизу из плотной тропосферы и характеризующихся сильной нелинейностью, вызывает аномалии стратосферной циркуляции. Например, взаимодействуя со средним потоком, волны влияют на структуру стратосферного полярного вихря. Впервые важность вопроса, касающегося вертикального распространения волновых возмущений, поставили Д. Г. Чарни и Ф. Д. Дразин в 1961 г. С тех пор изучению этого вопроса уделялось большое внимание, но проводимые теоретические исследования были посвящены в основном задачам в линейной постановке, т.е. использующим теорию возмущений. Тем не менее, исследования показывают, что линейной динамики не достаточно для решения вопросов распространения и генерации волн, так как рост ряда планетарных волн в зимней стратосфере сопровождается сильными нелинейными явлениями. Примером таких явлений является генерация вторичных волн, вызванная нелинейным взаимодействием волн между собой. Такие эффекты наиболее ярко проявляются во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) – сильных термодинамических явлений в зимней полярной стратосфере, влияющих на среднюю атмосферу, вызывающих также значительные изменения в тропосфере. Понимание и успешное моделирование ВСП имеет первостепенное значение для изучения климата Земли и улучшения долгосрочных прогнозов. Несмотря на то, что было предпринято много попыток изучения внезапного стратосферного потепления,

до сих пор нет единого мнения о причинах и прогнозах данного явления, но усиление стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 (СПВ1 и СПВ2) считаются безоговорочными предикторами ВСП. Кроме того, мало внимания уделяется внутренней динамике процесса и, как показано в работах, для исследования предпосылок и развития ВСП нелинейные взаимодействия волн между собой и со средним потоком необходимо анализировать наравне с тропосферно-стратосферными взаимодействиями и такими явлениями как Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), осцилляция Маддена-Джулиана (ОМД) и квазидвухлетнее колебание зонального ветра в экваториальной стратосфере (КДК).

Одним из способов изучения взаимодействия волн со средним потоком, а также взаимодействия волн между собой заключается в исследовании изменчивости возмущенной потенциальной энтропии (ПЭ) – квадрата потенциальной завихренности. Когда свойства планетарной волны меняются, передача энтропии другой волне является необходимым условием для соблюдения требований сохранения волновой активности. При таком подходе исследуют вклад в баланс потенциальной энтропии различных процессов. В ранних работах уравнение баланса было получено в рамках квазигеострофического приближения, но исследования можно проводить с использованием различных типов потенциальной завихренности. Кроме того, баланс возмущенной потенциальной энтропии является одним из инструментов диагностики внезапных стратосферных потеплений в численных моделях.

Целью работы является усовершенствование методов и подходов к исследованию нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн друг с другом и со средним потоком, а также изучение развития таких взаимодействий во время внезапного стратосферного потепления.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

- Разработать новую методику анализа баланса возмущенной ПЭ без использования квазигеострофического приближения;
- Проанализировать вклад различных нелинейных процессов и вертикальных движений в баланс возмущенной ПЭ с использованием результатов численного моделирования атмосферной циркуляции;
- Провести оценки временной эволюции нелинейных взаимодействий в средней атмосфере на разных стадиях ВСП на базе обработки данных реанализов метеорологической информации.

Научная новизна. Исследование волновой активности, в классическом подходе, основывается на обобщенной теореме Элиассена-Пальма, согласно которой анализируются только нелинейные взаимодействия волн со средним потоком. В работе получено новое уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии с учетом слагаемых, отвечающих не только за взаимодействие по типу волна-средний поток, но и за нелинейные взаимодействия по типу волна-волна. Впервые было показано различие в результатах расчета с использованием квазигеострофического приближения и в случае отказа от него, с использованием потенциального вихря Эртеля. Новым результатом также является учет в уравнении баланса ПЭ вклада слагаемых, содержащих вертикальную скорость, что в дальнейшем может быть использовано для более детального изучения нелинейных взаимодействий планетарных волн, и в частности, солнечных тепловых приливов. Впервые было преобразовано уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии с целью оценки вклада адвекции и дивергенции потока ПЭ в изменение волновой активности во время ВСП, сопровождающихся смещением и расщеплением стратосферного полярного вихря.

Научная и практическая значимость работы. Разработанные в рамках диссертационной работы методы и подходы, реализованные в виде программно-математического комплекса, позволили провести анализ нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн во время внезапных

стратосферных потеплений двух типов: со смещением и с расщеплением стратосферного полярного вихря. Исследование особенностей развития разных типов ВСП имеет важное значение как для решения фундаментальных вопросов динамики и энергетики атмосферы, так и для моделирования общей циркуляции. От успехов воспроизведения внезапных стратосферных потеплений в гидродинамических моделях зависит качество сезонных прогнозов состояния стратосферы и погодных условий тропосферы. С точки зрения фундаментальной науки, разработанная новая методология исследования нелинейных волновых взаимодействий позволит существенно продвинуться в понимании природы атмосферных движений, их диагностики.

Методы исследования. В работе используются методы математического моделирования, осуществляется обработка данных реанализов метеорологической информации и результатов численных расчетов с использованием Модели средней и верхней атмосферы (МСВА).

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана новая методика, основанная на отказе от квазигеострофического приближения и учитывающая вертикальные движения в атмосфере, и программный комплекс для анализа нелинейных взаимодействий планетарных волн.
2. Внедрение разработанной методики позволило расширить возможности диагностики нелинейных процессов, ответственных за формирование крупномасштабной волновой структуры в средней атмосфере.
3. Получены новые данные об эволюции различных нелинейных процессов во время событий ВСП, сопровождаемых расщеплением и смещением стратосферного полярного вихря.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов и методики подтверждена проверкой с использованием различных типов данных и расчетно-теоретическими результатами исследований других авторов. Обоснованность основных результатов подтверждается публикациями, а также

выступлениями с докладами на российских и международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 3 в журналах, входящих в базы данных SCOPUS, Web of Science.

Личный вклад автора. Автору принадлежит ведущая роль в определении цели исследования, формулировании задач исследования, проведении численных экспериментов и анализе полученных результатов. Результаты работы представлены в научных публикациях, подготовленных при непосредственном участии автора. Автор лично представляла результаты работы на конференциях и симпозиумах.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах кафедры физики атмосферы СПбГУ, кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ, а также на школах и конференциях: V Научная конференция в Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург, 23-25 мая 2018) – устный доклад; AIS-2018 (Калининград, 3-9 июня 2018) – стендовый доклад; XIII Международная Школа молодых ученых им. А.Г. Колесника (Томск, 9-15 сентября 2018) – устный доклад; CITES'2019 (Москва, 27 мая-6 июня 2019) – стендовый доклад; МСАРД-2019 (Санкт-Петербург, 25-27 июня 2019) – устный доклад; IUGG General Assembly (Монреаль, 8-18 июля 2019) – стендовый доклад; VI Научная конференция в Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского (Санкт-Петербург, 16-18 сентября 2020) – устный доклад; XIV Международная Школа молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника (Томск, 2-4 ноября, 2020) – дистанционное участие; серия открытых лекций в рамках виртуальной академической мобильности РГГМУ (Санкт-Петербург, апрель, 2021) – лекция; МСАРД-2021 (Санкт-Петербург, 29 июня-2 июля 2021) – устный доклад; XXVII Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" (Москва, 5-9 июля 2021) – стендовый доклад; XII

международная конференция "Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений" (с. Паратунка, Камчатский край, 27 сентября-1 октября 2021) – устный доклад; Всероссийская конференция с международным участием "СОБСТВЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА И ДИНАМИКА СРЕДНЕЙ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ" 2021 (Москва, 22-23 ноября 2021) – устный доклад.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, д. ф.-м. н., Ковалю Андрею Владиславовичу за всестороннюю поддержку в период подготовки диссертации. Отдельная благодарность выражается сотрудникам кафедры метеорологических прогнозов РГГМУ и кафедры физики атмосферы СПбГУ за содействие и плодотворные дискуссии. Автор выражает безграничные благодарности учителю и наставнику, д. ф.-м. н., Погорельцеву Александру Ивановичу† за бесценный опыт и знания. А. И. Погорельцев определил основные направления исследований автора, научил самостоятельно ставить научные задачи и искать пути их решения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка используемых сокращений и списка литературы. Объем работы составляет 107 страниц, в том числе 40 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 107 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, представлены проблемы исследования нелинейных взаимодействий планетарных волн, сформулированы цель и задачи. Показана научная и практическая значимость, методы исследования, а также положения, выносимые на защиту, обозначен личный вклад автора и апробация работы.

В **первой главе** рассматривается текущее состояние знаний о волнах в атмосфере, динамике зимней стратосферы, завихренности и различных ее типах, таких как квазигеострофическая потенциальная завихренность и потенциальный вихрь Эртеля, а также о возмущенной потенциальной энтропии. Кроме того, в

этой главе представлено описание используемых в работе данных Модели средней и верхней атмосферы (МСВА) и данных современных реанализов. В **разделе 1.1** представлены основные характеристики волновых движений, их временные и пространственные масштабы. Особое внимание уделяется глобальным или планетарным волнам, которые обусловлены воздействием на планету со стороны небесных тел и неоднородностью свойств поверхности. Распространение глобальных волн один из механизмов, вызывающий аномалии стратосферной циркуляции и поддерживающий стратосферно-тропосферное взаимодействие, поэтому проблема их воспроизведения в численных моделях остается до сих пор актуальной [Held et al., 2002].

В **разделе 1.2** изложены основные представления о динамике, термической и ветровой структуре средней атмосферы и, в частности, стратосферы. Отмечено, что результатом термоветрового баланса является стратосферный полярный вихрь, определены его основные характеристики, роль в динамике и химических процессах атмосферы и причины межгодовой и внутрисезонной изменчивости. Следствием межгодовой изменчивости стратосферного полярного вихря, вызванной стационарными планетарными волнами являются внезапные стратосферные потепления. Во время ВСП полярный вихрь разрушается в течение нескольких дней, что сопровождается потеплением в высоких широтах и обращением знака меридионального температурного градиента, следовательно, западные ветры становятся очень слабыми и даже восточными [Butler et al., 2015]. Несколько моделей объяснения ВСП описаны в данной главе и представлена их классификация.

В **разделе 1.3** показан вывод уравнения завихренности, определены понятия абсолютной, относительной, планетарной и потенциальной завихренности. Значение последней было исследовано в 1930-е гг. [Rossby, 1940] и используется сейчас для описания распространения волн. Два типа потенциальной завихренности, используемые в данной работе – квазигеострофическая потенциальная завихренность и потенциальный вихрь

Эртеля описаны в разделах 1.3.1 и 1.3.2, соответственно. В разделе 1.4 представлены подходы в исследовании волновой активности и воздействии планетарных волн на средний поток. Традиционный подход, называемый приближением Элиассена-Палма был сформулирован в работе Eliassen and Palm, 1961. Несколько позднее Эндрюс и МакИнтайр обобщили закон сохранения волнового действия для неустановившихся волн при наличии диссипации и источников, предложив обобщенную теорему Элиассена-Палма [Andrews and McIntyre, 1976]. В данной работе был предложен подход позволяющий проанализировать взаимодействия стационарных планетарных волн со средним потоком, то есть влияние волн на зональную циркуляцию, и между собой, основанный на уравнении баланса потенциальной энтропии, являющейся квадратом потенциальной завихренности.

В разделе 1.5 описаны используемые в работе модельные данные и данные современных реанализов. Расчеты проводились для ситуаций, когда наблюдалось или моделировалось сильное внезапное стратосферное потепление. Каждый из используемых типов данных обладает преимуществами. Модельные данные доступны до высот выше уровня мезосферы и в дальнейшем позволят оценить процессы верхней атмосферы. Данные реанализа UK Met Office (УКМО), доступные раз в сутки, позволяют проанализировать стационарные процессы верхней стратосферы. Данные реанализа ERA-5 обновляются каждый час, что в отличие от данных UK Met Office, позволяет исследовать более высокочастотные возмущения во всей стратосфере. В разделе 1.5.1 описана Модель средней и верхней атмосферы (МСВА) [Fröhlich et al., 2003]. Основными рассчитываемыми моделью параметрами являются зональная, меридиональная и вертикальная компоненты скорости, геопотенциал, и температура. Приведены высотно-временные представления амплитуд зональных гармоник в геопотенциальной высоте (м) с волновыми числами $m = 1, 2, 3$; распределения среднего зонального ветра (м/с) и изменения средней зональной температуры. В выбранном члене ансамбля решений для условий Эль-Ниньо ВСП

моделировалось в январе. ВСП предшествует сильное увеличение амплитуд СПВ1 10 января, значительное увеличение амплитуд СПВ2 и 3, а также изменение среднего зонального потока в стратосфере.

В **разделе 1.5.2** описаны данные реанализа ERA-5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [Hersbach and Dee, 2016]. Для исследования и расчетов по данным реанализа ERA5 было решено выбрать 2013 год. В январе 2013 г. наблюдалось сильное (major) событие ВСП. Значительное увеличение амплитуды СПВ1 произошло в начале января 2013 г. В это же время происходило сильное изменение среднего зонального потока в стратосфере, вплоть до обращения направления. Внезапное стратосферное потепление зимой 2012-2013 гг. сопровождалось расщеплением стратосферного полярного вихря.

В **разделе 1.5.3** описаны данные реанализа УКМО Метеорологического бюро Великобритании [Swinbank and O'Neill, 1994]. Данные с 24-часовым временным шагом доступные с 1992 г. содержат трехмерные поля ветра, температуры и геопотенциальной высоты. В работе данные реанализа УКМО использовались для расчетов и анализа нелинейных взаимодействий на уровне 50 км во время ВСП зимой 2012-2013 г., а также во время ВСП зимой 2008-2009 гг., сопровождавшееся расщеплением стратосферного полярного вихря, и зимой 2018-2019 гг., сопровождавшееся смещением стратосферного полярного вихря. Основные выводы первой главы сформулированы в **разделе 1.6**.

Во **второй главе** описан метод исследования нелинейных волновых взаимодействий в атмосфере. В первых работах исследование, основанное на изучении вкладов в уравнение баланса возмущенной ПЭ, проводилось в квазигеострофическом приближении, т. е. с использованием квазигеострофической потенциальной завихренности [Smith, 1983]. В **разделе 2.1** показано, что в случае отказа от квазигеострофического приближения, уравнения баланса ПЭ можно получить с использованием потенциального вихря Эртеля P . Для вывода уравнения ПЭ для СПВ1 и СПВ2 рассматривается уравнение возмущения потенциального вихря Эртеля в log-изобарической

системе координат, используется метод генерации вторичных планетарных волн [Pogoreltsev, 2001] и умножается на возмущение P :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_1'^2}}{\partial t} = & -\overline{P_1' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_2')} - \overline{P_1' (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_1' (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_3')} - \\ & - \overline{P_1' (\vec{V}_3' \cdot \vec{\nabla} P_2')} - \overline{P_1' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} \overline{P})} - \overline{P_1' (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_1')} + \overline{P_1' S_1'}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_2'^2}}{\partial t} = & -\overline{P_2' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_2' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_3')} - \overline{P_2' (\vec{V}_3' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \\ & - \overline{P_2' (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} \overline{P})} - \overline{P_2' (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_2')} + \overline{P_2' S_2'}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь уравнение (1) – баланс возмущенной ПЭ для СПВ1 и уравнение (2) для СПВ2. В этих уравнениях S – вклад неадиабатических притоков тепла и/или диссипативных слагаемых, которые не могут быть оценены из наблюдений, \vec{V} – вектор скорости ветра. Черта сверху означает зональное осреднение, а штрихи – возмущения, т.е. отклонения от зонально осредненных значений. В уравнениях (1) и (2) левая часть определяется, как мера изменчивости волновой активности во времени. Первые четыре слагаемых уравнения (1) и первые три слагаемых уравнения (2) в правой части описывают нелинейное взаимодействие по типу волна-волна (вторичные СПВ с зональным волновым числом 2 будут генерироваться в результате нелинейных взаимодействий СПВ1-СПВ3 и в случае самовзаимодействия СПВ1 – слагаемые в уравнении (2), а вторичные СПВ1 – при взаимодействии СПВ1-СПВ2 и СПВ2-СПВ3 – слагаемые в уравнении (1)); далее взаимодействие волны со средним потоком и диссипация, которая не может быть оценена из наблюдений.

В разделе 2.2 осуществлено сравнение двух подходов, использованных в расчете слагаемых в балансе ПЭ. Расчеты проводились на уровнях 30 и 50 км по модельным данным МСВА. Результаты расчета слагаемых демонстрируют различия при использовании квазигеострофического приближения и в случае отказа от него. Наибольшие различия наблюдаются при анализе взаимодействий по типу волна-волна и волна-средний поток на 30 км. Так как потенциальный вихрь Эртеля является более универсальной динамической величиной и

удобным инструментом для анализа процессов тропосферно-стратосферного обмена, дальнейшие результаты этой работы были получены в случае отказа от квазигеострофического приближения.

В разделе 2.3 продемонстрирован вклад вертикальной скорости в слагаемые, отвечающие за нелинейные взаимодействия между СПВ и СПВ со средним потоком. В работе Smith, 1983 было показано, что при выводе уравнений баланса возмущенной ПЭ слагаемыми, содержащими вертикальные скорости (или их возмущения), часто пренебрегают вследствие их малости. В свою очередь, последние исследования демонстрируют, что такие слагаемые могут вносить вклад при нелинейном взаимодействии стационарной планетарной волны с зональным волновым числом m и мигрирующего прилива с зональными волновыми числами $m_t=1$ и 2 , генерируя немигрирующий атмосферный прилив с $m = m_t \pm m$. Генерация немигрирующих атмосферных приливов, приводит к долготным изменениям вертикального ветра в течение суток. Такое изменение в свою очередь влияет на интенсивность излучения гидроксила (OH) и на концентрацию атомарного кислорода (O) [Medvedeva et al., 2019]. Результаты расчета по данным МСВА показывают, что слагаемые, содержащие вертикальную скорость, вносят вклад во взаимодействия по типу волна-волна и волна средний поток. Особенно этот эффект заметен на уровне 30 км, а также до и во время события внезапного стратосферного потепления.

В целях полного описания выполнения баланса ПЭ в разделе 2.4 представлен метод преобразования уравнений (1) и (2). Окончательно, уравнения баланса принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_1'^2}}{\partial t} = & -\overline{P_1' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_2')} - \overline{P_1' (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_1' (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_3')} - \\ & \overline{P_1' (\vec{V}_3' \cdot \vec{\nabla} P_2')} - \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} (\rho_0 \overline{P_1' \vec{V}_1'}) - \overline{P_1' (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_1')} + \overline{P_1' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_1')} + \overline{P_1' S_1'}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial \overline{P_2'^2}}{\partial t} = & -\overline{P_2' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \overline{P_2' (\vec{V}_1' \cdot \vec{\nabla} P_3')} - \overline{P_2' (\vec{V}_3' \cdot \vec{\nabla} P_1')} - \\ & \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div} (\rho_0 \overline{P_2' \vec{V}_2'}) - \overline{P_2' (\vec{V} \cdot \vec{\nabla} P_2')} + \overline{P_2' (\vec{V}_2' \cdot \vec{\nabla} P_2')} + \overline{P_2' S_2'}. \end{aligned} \quad (4)$$

В преобразованных уравнениях значения левых частей, первых четырех слагаемых уравнения (3) и первых трех слагаемых уравнения (4) в правой части остались неизменными. Далее стоят дивергенция потока, адвективное слагаемое, взаимодействие волны со средним потоком и диссипация.

Аналогично можно получить уравнение баланса для среднего зонального значения потенциальной энстрофии:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \bar{P}^2}{\partial t} = \frac{\bar{P}}{\rho_0} \operatorname{div} (\rho_0 \bar{P} \bar{\vec{V}}) - \bar{P} (\overline{\vec{V}'_1 \cdot \nabla P'_1}) - \bar{P} (\overline{\vec{V}'_2 \cdot \nabla P'_2}) + \bar{P} \bar{S}. \quad (5)$$

В уравнение (5) левая часть представляет изменение среднезональной ПЭ во времени. Ее изменение определяется дивергенцией потока ПЭ – первое слагаемое в правой части, а также взаимодействием СПВ1 и СПВ2 со средним потоком – второе и третье слагаемые, соответственно. Основные выводы второй главы сформулированы в **разделе 2.5**.

В **третьей главе** представлены результаты анализа вкладов слагаемых в уравнения (3)-(5) с использованием данных реанализа ERA-5 для высоты 40 км и данных реанализа UK Met Office для высоты 50 км. Анализ вклада процессов в уравнение возмущенной потенциальной энстрофии на разных стратосферных уровнях проводился для периода 21 декабря 2012 г. – 20 января 2013 г. Для исследования нелинейных взаимодействий во время ВСП с расщеплением стратосферного полярного вихря расчет проводился для января 2009 г., а со смещением для периода 6 декабря 2018 г. – 5 января 2019 г. Кроме того, по данным реанализа UK Met Office были построены широтно-высотные распределения слагаемых, отвечающих за изменение волновой активности, взаимодействия по типу волна-волна и волна-средний поток, дивергенцию и адвекцию.

В **разделе 3.1** проведен детальный анализ выполнения баланса ПЭ на двух стратосферных уровнях. Результаты расчета слагаемых уравнения (5) для среднезональной потенциальной энстрофии показывают, что слагаемые, отвечающие за взаимодействие волны со средним потоком, вносят вклад не

только во время события ВСП, наблюдаемого 10 января, но и за 10 дней до его наступления. Кроме того до события ВСП существенный вклад вносят адвективные слагаемые. На рисунке 1 представлен вклад основных процессов в баланс возмущенной ПЭ.

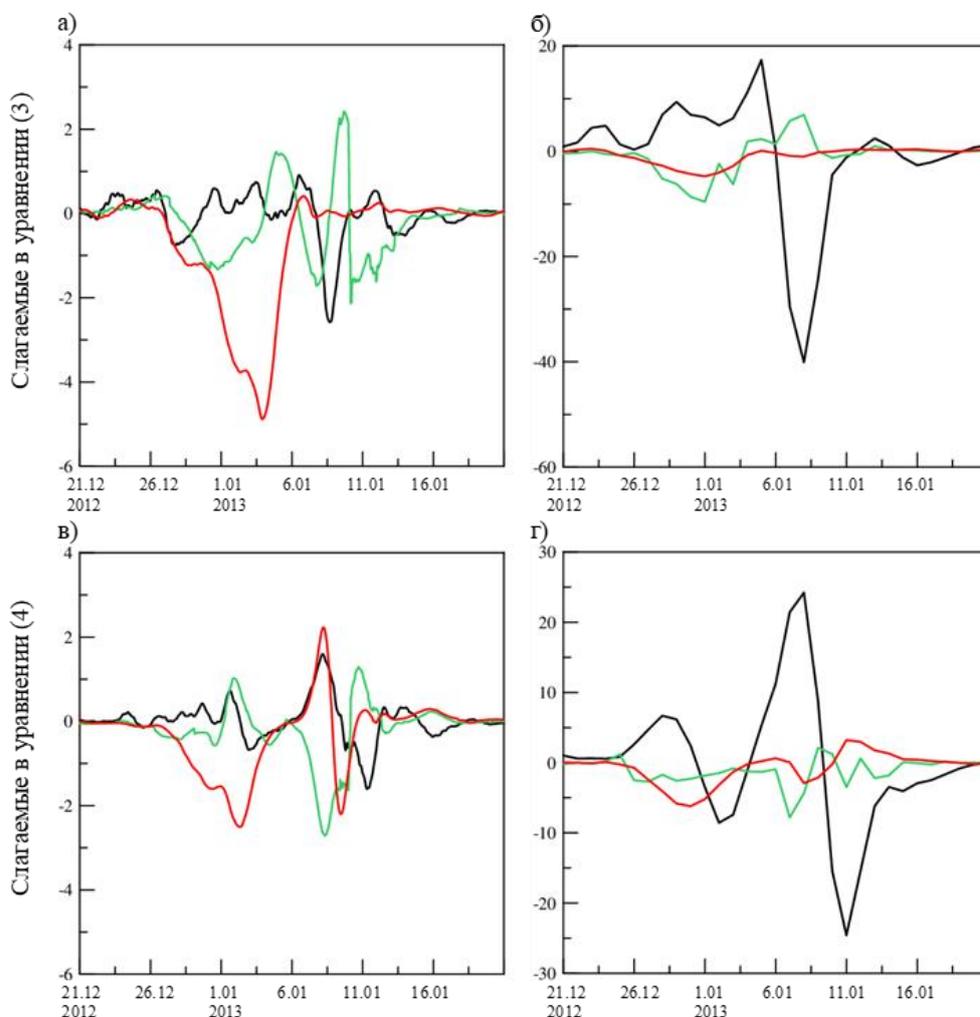


Рисунок 1 – Слагаемые в балансе возмущенной потенциальной энтропии на высоте 40 км по данным ERA-5 – а), в) и на высоте 50 км по данным UK Met Office – б), г) за период 21 декабря 2012 г. – 20 января 2013 г. СПВ1 (верхние панели), СПВ2 (нижние панели): изменение волновой активности во времени – черная, слагаемые, отвечающие за генерацию волны – зеленая, разница между дивергенцией и обменными слагаемыми – красная линии.

Событию ВСП предшествует уменьшение волновой активности СПВ1 и увеличение с последующим уменьшением волновой активности СПВ2 в стратосфере – черные линии на рисунке. Изменения волновой активности обусловлены взаимодействиями по типу волна-средний поток, волна-волна,

дивергенцией и адвекцией потока ПЭ. В стратосфере эти процессы вносят вклад в баланс во время события ВСП, а в случае СПВ2 за 10 дней, за несколько дней до его наступления и после потепления. Как и в случае анализа среднего зонального значения потенциальной энтропии, адвективные слагаемые вносят вклад в баланс за 10 дней до наступления ВСП. Результаты расчета слагаемых в уравнениях (3)-(5) показывают, что с увеличением высоты, вклад обменных процессов и взаимодействий между волнами увеличивается в два раза, а волновая активность стационарных планетарных волн увеличивается на порядок.

Выполнение баланса ПЭ во время ВСП, сопровождавшихся расщеплением и смещением стратосферного полярного вихря представлено **разделе 3.2**. Расчеты проводились на уровне 50 км. Во время потепления с расщеплением уменьшение среднезональной потенциальной энтропии во времени (слагаемое в левой части уравнения (5)) сопровождается увеличением взаимодействия СПВ2 со средним потоком с максимумом примерно за неделю до потепления. Во время развития ВСП со смещением обменные слагаемые не вносят существенного вклада. Адвекция вносит вклад в баланс примерно за неделю до потепления в обоих случаях. На рисунке 2 представлен вклад основных процессов в баланс возмущенной ПЭ. ВСП с расщеплением предшествует увеличению с последующим уменьшением перед потеплением волновой активности СПВ2. Волновая активность СПВ1 меняется слабо. ВСП со смещением сопровождается изменением волновой активности СПВ1, но порядок величин в два раза меньше, чем изменение волновой активности СПВ2 в 2008-2009 гг. После потепления с расщеплением изменение волновой активности не наблюдается, при потеплении со смещением наблюдается обратная ситуация – черные линии на рисунке 2. Изменения волновой активности обусловлены как взаимодействиями по типу волна-волна, так и взаимодействием волны со средним потоком. Адвективные процессы вносят вклад за несколько дней до наступления потепления в баланс для СПВ1 зимой 2018-2019 гг., и для СПВ2

зимой 2008-2009 гг. При анализе потепления с расщеплением, можно отметить, что взаимодействие по типу волна-волна вносит наименьший вклад в баланс для СПВ2 – зеленая линия на рисунке 2в. Изменение волновой активности балансируется обменными слагаемыми с максимумом за неделю до ВСП – красная линия на рисунке 2в. Взаимодействие по типу волна-волна балансирует изменение волновой активности для СПВ1 – рисунок 2а. При ВСП со смещением стратосферного полярного вихря вклад всех процессов в баланс возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1 и 2 сопоставим.

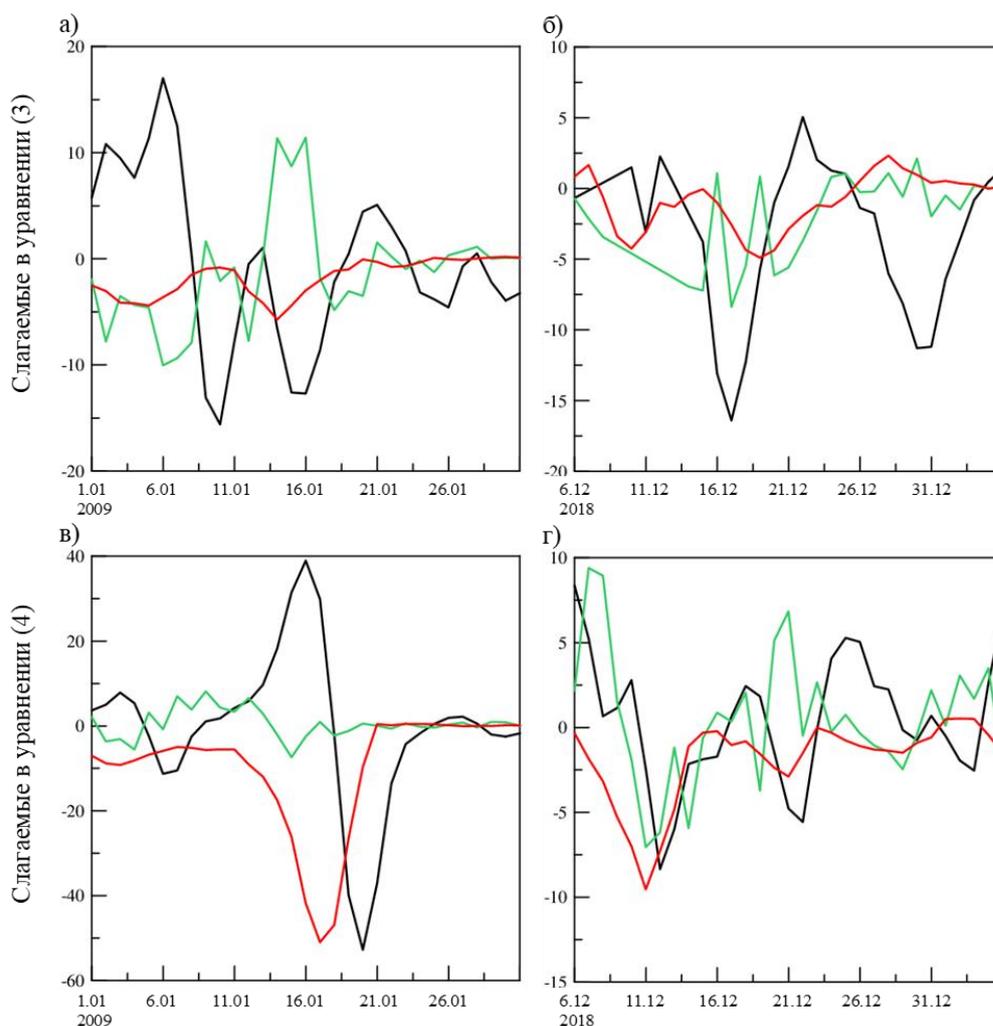


Рисунок 2 – Слагаемые в балансе возмущенной потенциальной энтропии на высоте 50 км по данным UK Met Office за январь 2009 г. – а), в) и за период 6 декабря 2018 – 5 января 2019 г. – б), г). СПВ1 (верхние панели), СПВ2 (нижние панели): изменение волновой активности во времени – черная, слагаемые, отвечающие за генерацию волны – зеленая, разница между дивергенцией и обменными слагаемыми – красная линии.

В разделе 3.3 представлены широтно-высотные распределения слагаемых в балансе возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1 и СПВ2 во время двух типов ВСП. Результаты были усреднены за 5 дней, т.е. дни до внезапного стратосферного потепления; во время потепления – наблюдаются максимальные температуры в стратосфере и после ВСП. Во время внезапного стратосферного потепления с расщеплением стратосферного полярного вихря изменение волновой активности наблюдается в средних широтах – рисунок 3а с последующим смещением в высокие. Взаимодействия по типу волна-волна вносят наименьший вклад, и изменение волновой активности балансируется обменными слагаемыми – рисунок 3. Адвективное слагаемое и дивергенция вносят наибольший вклад до и во время внезапного стратосферного потепления в высоких широтах в уравнение баланса для СПВ2 – рисунок 3д и 3е.

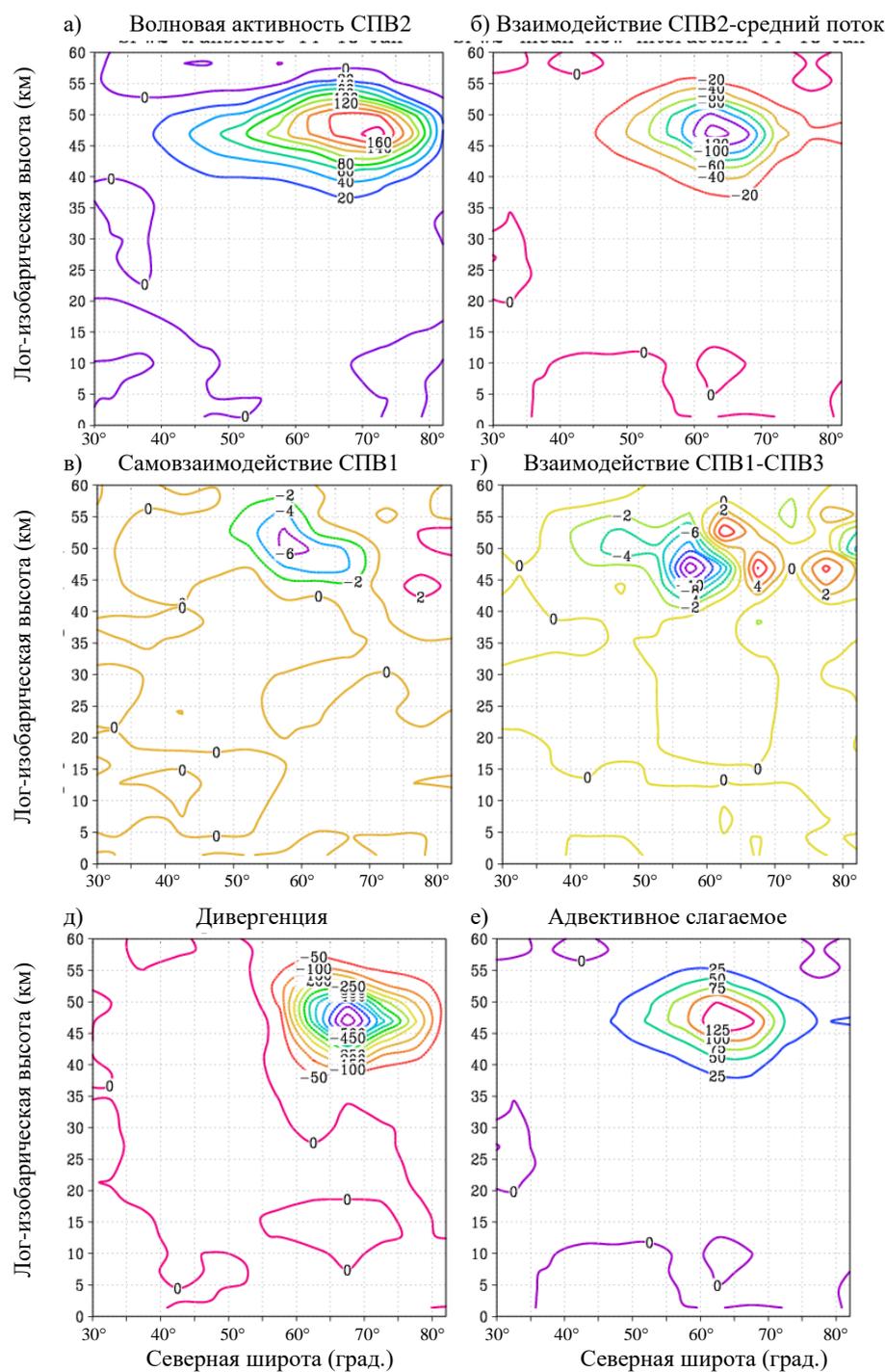


Рисунок 3 – Широтно-высотные распределения слагаемых в уравнении возмущенной потенциальной энтропии для СПВ2, усредненные за 14-18 января 2009 г.

Оценка широтно-высотных распределений изменения волновой активности и взаимодействий волна-средний поток, волна-волна показывает, что во время ВСП со смещением, изменения процессов наблюдаются на более

высоких уровнях, чем во время ВСП с расщеплением стратосферного полярного вихря. – рисунок 4.

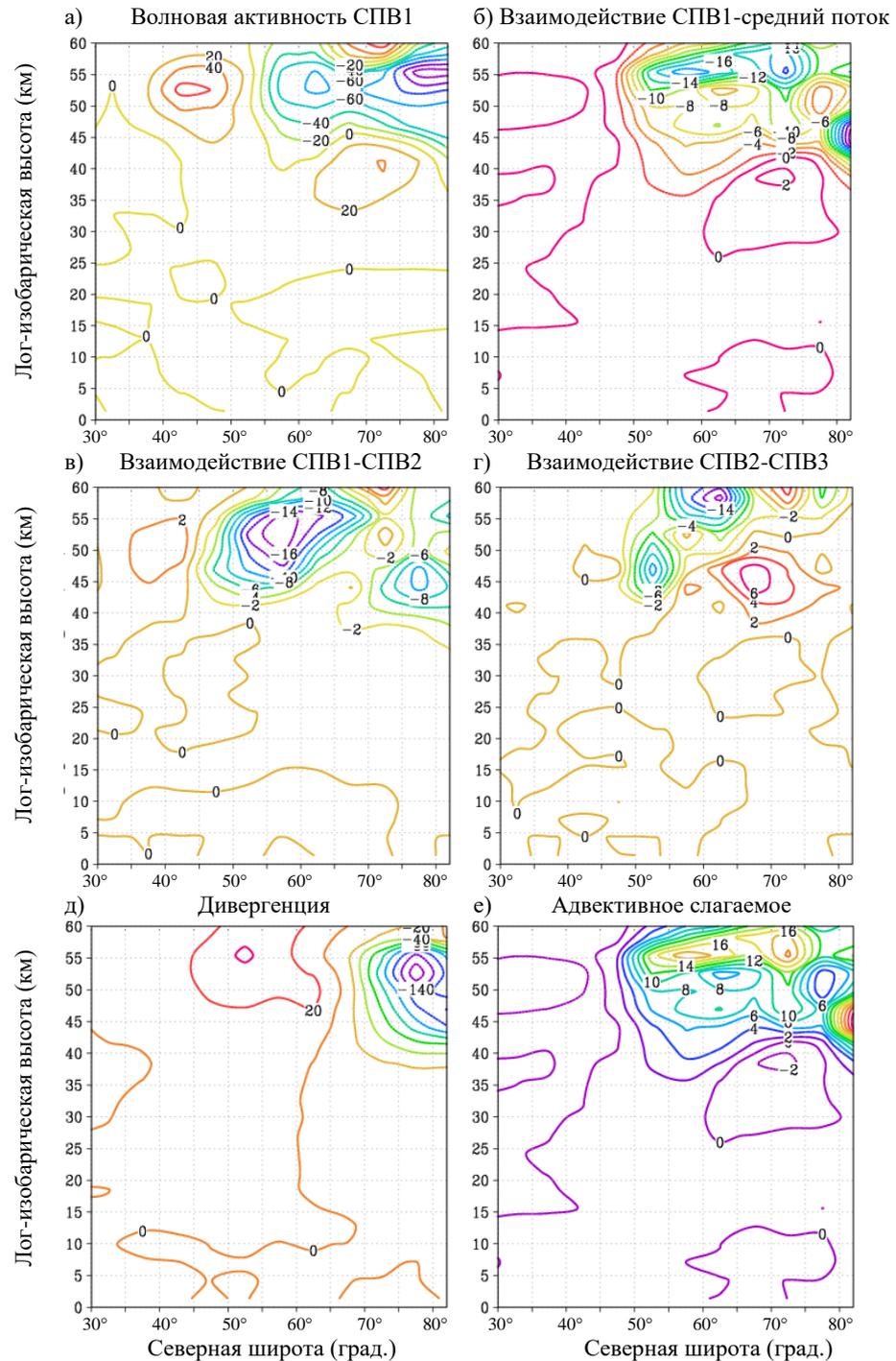


Рисунок 4 – Широтно-высотные распределения слагаемых в уравнении возмущенной потенциальной энтропии для СПВ1, усредненные за 17-21 декабря 2018 г.

Взаимодействия по типу волна-волна наблюдается в средних широтах до потепления, со смещением в высокие во время его развития. Кроме того, в

сравнении с зимой 2008-2009 гг., вклад слагаемых отвечающих за взаимодействие по типу волна-волна больше – рисунок 4в и 4г. Изменение волновой активности наблюдается как в средних, так и в высоких широтах. Вклад адвекции и дивергенции потока ПЭ в баланс для СПВ1 наибольший до и во время ВСП в высоких широтах с постепенным смещением в средние на уровнях выше 35 км. Результаты для СПВ2 показывают схожее изменение волновой активности и взаимодействий по типу волна-средний поток (средние и высокие широты, верхняя граница стратосферы, нижняя мезосфера). Значения вклада этих слагаемых в уравнение для СПВ2 в несколько раз меньше во время ВСП со смещением, чем с расщеплением, но сопоставим с вкладом СПВ1 за ту же зиму 2018-2019 гг. В отличие от зимы 2008-2009 гг. вклад адвективных процессов для СПВ2 значительный на протяжении всех рассматриваемых временных интервалов и наблюдается как в средних, так и в высоких широтах. Основные выводы третьей главы сформулированы в **разделе 3.4.**

В заключении приведены основные результаты работы:

В данной работе представлена новая методика исследования нелинейных волновых процессов. В основе нее лежит получение выражения баланса возмущенной потенциальной энтропии, содержащее слагаемые, определяющие изменение волновой активности во времени, взаимодействие стационарных планетарных волн между собой и со средним потоком, дивергенцию и адвекцию потока ПЭ. Разработанный в рамках данного исследования блок компьютерных программ для анализа взаимодействий планетарных волн между собой и со средним потоком в средней атмосфере дает возможность детального изучения природы как волновых движений, так и явлений, вызванных волновой активностью.

Основные результаты и выводы:

1. Разработана теория и пакет программ для расчета вклада различных компонент в баланс возмущенной ПЭ, позволяющие определить, какими процессами сопровождается изменение волновой активности применительно

к стационарным планетарным волнам в атмосфере. Предложенная методика позволила выделить слагаемые, ответственные не только за нелинейные процессы между СПВ и СПВ и средним потоком, но и характеризующие вынос потенциальной энтропии из рассматриваемой области и ее дивергенцию.

2. По данным моделирования атмосферной циркуляции с помощью модели МСВА показано различие в рассматриваемых нелинейных процессах при использовании квазигеострофического приближения и в случае отказа от него. Впервые проанализирован вклад слагаемых, содержащих возмущение вертикальных скоростей, в уравнения баланса возмущенной ПЭ на разных стадиях развития ВСП в стратосфере. Предложенный метод исследования нелинейных взаимодействий волновых движений возможно применить не только для изучения стационарных планетарных волн, но и в перспективе – для исследования солнечных атмосферных приливов.
3. С использованием данных реанализов ERA-5 и UK Met Office проведены оценки эволюции нелинейных взаимодействий планетарных волн в средней атмосфере на разных стадиях ВСП. В частности, показано, что ВСП с расщеплением и со смещением стратосферного полярного вихря сопровождаются существенными различиями в рассматриваемых нелинейных процессах. В дальнейшем, с учетом статистической обработки данных о нелинейных взаимодействиях для большого количества ВСП, будет возможно осуществлять прогнозирование развития потеплений.

Список литературы

Andrews D.G., McIntyre M.E. Planetary waves in horizontal and vertical shear: the generalized Eliassen-Palm relation and zonal acceleration // *J. Atmos. Sci.* 1976. V. 33. P. 2031–2053.

Butler A.H., Seidel D.J., Hardiman S.C., Butchart N., Birner T., Match A. Defining sudden stratospheric warmings // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015. V. 96. P. 1913–1928.

Eliassen A., Palm E. On the transfer of energy in stationary mountain waves // *Geophys. Publ.* 1961. V. 22. P. 1–23.

Fröhlich K., Pogoreltsev A.I., Jacobi Ch. The 48-Layer COMMA-LIM Model // *Report Inst. Meteorol. Univ. Leipzig.* 2003. V. 30. P. 157–185.

Held I.M., Ting M., Wang H. Northernwinter stationary waves: theory and modeling // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 15. P. 2125–2144.

Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production // *ECMWF Newsletter.* 2016. V 147. P. 7.

Medvedeva I.V., Semenov A.I., Pogoreltsev A.I., Tatarnikov A.V. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. V. 187 C. 22–32.

Pogoreltsev A.I. Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes // *Phys. Chem. Earth (Part C).* 2001. V. 26. № 6. P. 395–403.

Rosby C.-G. Planetary flow patterns in the atmosphere // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1940. V. 66. P. 68–87.

Smith A.K. Observation of wave-wave interactions in the stratosphere // *J. Atmos. Sci.* 1983. V. 40. P. 2484–2493.

Swinbank R., O'Neill A. A stratosphere-troposphere assimilation system // *Mon. Weather Rev.* 1994. V. 122. P. 686–702.

Список публикаций автора по теме диссертации

Публикации в изданиях, входящих в список ВАК и базы данных WoS и Scopus

1. *Didenko K.A., Pogoreltsev A.I., Ermakova T.S., Shved G.M.* Nonlinear interactions of stationary planetary waves during February 2016 sudden stratospheric warming // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. 386. P. 1–7.
2. *Диденко К.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В., Погорельцев А.И.* Диагностика нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 19–29.
3. *Диденко К.А., Погорельцев А.И.* Исследование взаимодействий стационарных планетарных волн с использованием модельных данных МСВА // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2020. № 674. С. 166–170.
4. Koval A.V., Wen Chen, **Didenko K.A.**, Ermakova T.S., Gavrilo N.M., Pogoreltsev A.I., Toptunova O.N., Ke Wei, 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.
5. *Didenko K.A., Pogoreltsev A.I., Koval, A.V., Ermakova T.S.* Investigation of solar thermal tides using model data // Proc. of SPIE, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2021. V. 11916. P. 1–10.
6. *Диденко К.А., Ермакова Т.С., Погорельцев А.И., Ракушина Е.В.* Климатическая изменчивость стратосферно-тропосферных взаимодействий, наблюдаемая в последние десятилетия // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2021. Т. 37. № 4. С. 159–170.
7. *Диденко К.А., Погорельцев А.И.* Применение непрерывного вейвлет-преобразования для изучения планетарных волн // Известия РАН, «Физика атмосферы и океана». 2022. Т. 58. № 3. С. 352–364.

В нерцензируемых изданиях

1. Диденко К.А., Погорельцев А.И. Нелинейное взаимодействие волновых процессов в средней и верхней атмосфере // ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ БАЙКАЛЬСКОЙ МОЛОДЕЖНОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПО ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ и Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», Иркутск. 2017. С. 252-254.
2. Диденко К.А., Погорельцев А.И. Анализ нелинейных взаимодействий планетарных волн на основе уравнения баланса возмущенной потенциальной энтропии // Труды V ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ПРОБЛЕМЫ ВОЕННО-ПРИКЛАДНОЙ ГЕОФИЗИКИ И КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ». Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. 2018. С. 103-106.
3. Didenko K.A., Pogoreltsev A.I. Nonlinear Interaction of Wave Processes in the Middle and Upper Atmosphere // Proceedings of VI International conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”, Kaliningrad. 2018. P. 177-181.
4. Диденко К.А., Погорельцев А.И. Нелинейное взаимодействие волновых процессов в средней и верхней атмосфере // Материалы XIII Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника, Томск. 2018. С. 36-40.
5. Диденко К.А., Погорельцев А.И., Шевчук Н.О. Внутрисезонная изменчивость мигрирующих и немигрирующих приливов // Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата: Доклады третьей международной конференции с элементами научной школы. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет. 2018. С. 150-154.
6. Диденко К.А., Погорельцев А.И. Анализ нелинейных взаимодействий атмосферных мигрирующих приливов в стратосфере // Физика окружающей

среды: материалы XIV Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника, Томск. 2020. С. 19-23.

7. *Диденко К.А., Погорельцев А.И.* Исследование внутрисезонной изменчивости мигрирующих и немигрирующих приливов // Сборник трудов Международного симпозиума "АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ И ДИНАМИКА" (МСАРД– 2021). 2021. С. 148-152.
8. *Диденко К.А., Погорельцев А.И.* Исследование атмосферных приливов с использованием модельных данных МСВА // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVII Международного симпозиума, Томск. 2021. С. 96-99.