Спектральные характеристики атмосферных волн, генерируемых зимним стратосферным струйным течением северного полушария

Б.Г. Шпынев, М.А. Черниговская, Д.С. Хабитуев

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

Выполнен анализ пространственных и временных вариаций вертикальных скоростей движения атмосферного газа на высотах стратосферы и нижней мезосферы в северном полушарии для 2008–2013 гг. по данным архива реанализа ECMWF ERA-Interim. Для всех анализируемых лет выявлены среднемасштабные волновые движения в осенне-зимние периоды (с ноября по февраль), которые ассоциированы со стратосферными струйными течениями и могут быть источниками атмосферных гравитационных волн. Для разных высот и широтных диапазонов исследованы спектры пространственных вариаций вертикальной скорости. Высотные вариации спектра показывают, что выше некоторой критической высоты стратосферы вблизи стратопаузы данные волны распространяются как внутренние гравитационные волны. Ниже этой высоты волны затухают вследствие каскадного дробления атмосферных вихрей и турбулентного перемешивания. Области генерации волновых движений совпадают с зоной взаимодействия струйных течений, расположенных на разных высотах стратосферы.

Ключевые слова: нижняя и средняя атмосфера, взаимодействие слоев атмосферы, волновые возмущения

Одобрена к печати: 22.02.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131

Введение

Сезонное формирование и затухание интенсивных циклонических вихрей над полюсом Земли в зимнем полушарии является наиболее выдающейся особенностью стратосферной циркуляции. Сильные западные ветры на периферии циркумполярного зимнего вихря с центром примерно в районе полюса, формирующие стратосферное струйное течение (СТ), разительно контрастируют с очень слабыми восточными ветрами в летнем полушарии Земли. В обоих полушариях Земли циркумполярные вихри (ЦПВ) начинают формироваться осенью, когда в полярных областях прекращается солнечный нагрев, достигают наибольшей силы в середине зимы и затухают к концу зимы – началу весны с возвращением солнечного нагрева в полярные регионы (Waugh, Polvani, 2010).

Исследования структуры и динамики стратосферного ЦПВ, включая события быстрых потеплений в полярной стратосфере – так называемых внезапных стратосферных потеплений (ВСП), открытых в 1950-х г. 20-го века – вызывали большой научный интерес (Hamilton, 1999; Labiztke, van Loon, 1999). Тем не менее, этот интерес вновь резко увеличился в 1980-е гг. в связи с открытием озоновой дыры в Антарктиде. Как результат, в последние два десятилетия прошлого столетия отмечался быстрый рост экспериментальных и модельных исследований для продвижения в понимании структуры и динамики полярных вихрей (Newman, Schoeberl, 2003). Но и в последние годы актуальность изучения стратосферных ЦПВ только увеличилась в связи с появлением работ, в которых показано влияние этих вихрей на тропосферную погоду и климат (Kushner, 2010; Варгин и др., 2015).

Установлено, что Антарктический ЦПВ больше по пространственным масштабам и продолжительности существования, а также сильнее по скоростям ветра в струе, чем

Арктический полярный вихрь (Karpetchko et al., 2005; Ивангородский, Нерушев, 2014). Однако в ЦПВ северного полушария отмечается существенно большая изменчивость (межгодовая, межсезонная и межсуточная) по сравнению с полярным вихрем южного полушария. Эти отличия связаны с разницей в условиях генерации и распространения волновых возмущений в северном и южном полушариях. Наличие в северном полушарии больших континентов с орографическими особенностями, контрастов нагрева суша/море и формирование тропосферных вихрей способствуют генерации в тропосфере волновых возмущений различных пространственных и временных масштабов (планетарные, приливные и гравитационные волны), которые распространяются вверх и приводят к изменению радиационного баланса стратосферы.

Принято считать, что главной причиной возмущений в зимнем ЦПВ, приводящих к его глобальным трансформациям, являются планетарные волны Россби, которые более эффективно генерируются в северном полушарии. Зимой, когда в стратосфере устанавливается вихрь с направленными на восток ветрами, создаются благоприятные условия для распространения крупномасштабных планетарных волн из тропосферы в стратосферу. На стратосферных высотах эти волны взаимодействуют с преобладающим зональным потоком и возмущают стратосферный вихрь. Происходит обрушение волн на границах стратосферного вихря с образованием так называемой «зоны прибоя» (Baldwin, Holton, 1988; Abatzoglou, Magnusdottir, 2007). ЦПВ при этом замедляется или даже обращает движение на восточное, происходит его сплющивание и смещение от полюса к средним широтам или разделение на несколько вихрей циклонического и антициклонического типа. Такие глобальные динамические трансформации, происходящие в зимней стратосфере, часто связаны с событиями ВСП.

К настоящему времени наиболее распространенным объяснением возникновения зимнего стратосферного СТ является температурный градиент, который образуется как результат различий радиационного охлаждения внутри и снаружи этой зоны в течение зимы. Чем больше разница температур, тем сильнее возникают градиенты давления и, следовательно, выше скорости ветра в СТ.

В работе (Shpynev et al., 2015) развивается новый подход, который учитывает, что во время полярной ночи основным источником энергии циркуляции в зимней полярной стратосфере является гравитационный потенциал охлаждающегося и опускающегося стратосферного газа, который преобразуется в кинетическую энергию ЦПВ. На уровне постоянного давления ЦПВ имеет структуру, подобную водовороту на поверхности воды. Внутри ЦПВ создаются условия для генерации неустойчивостей бароклинного типа, которые генерируют атмосферные волны различных масштабов, в том числе и внутренние гравитационные волны (ВГВ). Эти волны могут распространяться вверх в мезосферу, нижнюю термосферу и, при благоприятных условиях, выше в ионосферу (Черниговская и др., 2014; Chernigovskaya et al., 2015), перенося с собой значительный вертикальный поток энергии. ВГВ могут играть существенную роль и в самом процессе развития неустойчивости, осуществляя обратную связь через дополнительный нагрев вышележащих слоев атмосферы. В обзорных работах (Fritts, Alexander, 2003; Vincent, 2009; Tsuda, 2014; Yiğit, Medvedev, 2015) подчеркнуто, что ВГВ, генерируемые метеорологическими возмущениями в нижней и средней атмосфере, вносят существенный вклад в вариации термодинамического режима и состава средней атмосферы и обеспечивают, таким образом, вертикальное взаимодействие атмосферных слоев.

Исследованию характеристик атмосферных гравитационных волн, которые проявляются в вариациях атмосферных параметров (таких, как скорости ветра, температура и др.) на всех высотах атмосферы посвящено множество экспериментальных и теоретических работ (Wu, Waters, 1996; Wang et al., 2005; Alexander, Barnet, 2007; Wu, Eckermann, 2008; Hecht et al., 2009; Vincent, 2009; Yamashita et al., 2010; Perevalova et al., 2013; Plougonven, Zhang, 2014; Tsuda, 2014; Alexander, 2015; Bossert et al., 2015; Kaifler et al., 2015; Vincent, 2015). В зависимости от того, какими экспериментальными методами были получены данные о вариациях атмосферных параметрах – спутниковыми (радиопросвечивание, СВЧ и ИК зондирование), наземными (оптические установки (лидары, спектрографы, ПЗС-камеры), радиозондирование, ракетное зондирование, измерения с самолетов, метеорные радары, MU радары, VHF/MF радары и др.) - характеристики регистрируемых волновых возмущений варьировались в широком диапазоне. Это связано с техническими возможностями и ограничениями конкретных приборов, методическими погрешностями измерений, а также с региональными (географические, климатические) особенностями места выполнения эксперимента. Преимущество измерений со спутниковых платформ заключается в том, что они обеспечивают глобальный пространственный охват с высокой частотой измерений. Однако эти измерения не всегда позволяют регистрировать мелкомасштабные волновые возмущения, поскольку спутниковые данные имеют ограничения в пространственном и временном разрешении.

ВГВ в атмосфере могут быть мелкомасштабными, с короткими периодами и малыми длинами волн по горизонтали и вертикали. Средне- и крупномасштабные ВГВ могут иметь горизонтальную длину волны от нескольких десятков до нескольких тысяч километров. Периоды этих волн на средних широтах могут варьироваться от нескольких минут до почти суток (Fritts, Alexander, 2003; Tsuda, 2014).

В настоящей работе выполнено исследование пространственных спектров ВГВ, возникающих в области зимнего циркумполярного струйного течения северного полушария, и определение высотных интервалов генерации ВГВ разных масштабов в условиях стабильного зимнего циркумполярного течения и во время развития экстремальной волновой активности в периоды ВСП.

Используемые данные, их анализ и визуализация

Для анализа поля вертикальных скоростей движения атмосферного газа на высотах стратосферы и нижней мезосферы в северном полушарии в осенне-зимние периоды (с ноября по февраль) использовались данные архива реанализа ECMWF ERA-Interim для 2008–2013 гг. Реанализ ECMWF ERA-Interim (Dee et al., 2011) обеспечивает высокое пространственное разрешение 0,75° (порядка 80 км) по широте и долготе до уровня давления 1 гПа и является результатом ассимиляции данных измерений методами наземного и дистанционного зондирования с 1979 г. до настоящего времени в глобальной численной модели прогноза состояния стратосферы и тропосферы.

Для обработки и визуализации пространственно-временных вариаций динамических параметров страто-мезосферы был разработан программный комплекс обработки данных реанализа ECMWF ERA-Interim в виде интерактивного приложения, работающего в среде Windows. Доступ к данным осуществлялся через сайт ECMWF (http://apps. ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/).

Комплекс включает в себя несколько модулей, выполняющих функции обработки данных и графического представления результатов в интерактивном режиме: 1) модуль чтения данных в формате NetCDF; 2) модуль обработки данных и 3) модуль графического представления данных. Данные реанализа формируются в виде файлов по сезонам года, в каждом из которых представлены поля температуры, геопотенциала и трех компонент скорости ветра для заданного уровня давления. Всего рассматриваются 12 уровней давления от 200 гПа (~11 км) до 1 гПа (~50 км). Объем данных за год составляет около 20 ГБ.

Модуль обработки данных включает несколько подмодулей: выбора полей горизонтальных и вертикальных скоростей движения атмосферного газа для конкретного дня года и на заданном уровне давления (*puc. 1a*); расчета интегральных характеристик атмосферы, таких, как полный вертикальный поток, полная кинетическая энергия потока в заданном диапазоне широт, среднее значение скорости по заданному долготному сектору. Модуль спектральной обработки дает возможность исследовать широтное распределение спектральных характеристик ВГВ (*puc. 16*). Для исследования приливных вариаций в атмосфере в комплекс включен модуль расчета позиции Луны и Солнца.



Рис. 1. Скриншот модуля обработки программного комплекса: (а) – визуализация поля вертикальных скоростей; (б) – программа спектральной обработки данных

Модуль графического представления разработан как специализированный графопостроитель с набором цветовых палитр и инструментами масштабирования по пространственным координатам и значениям рассматриваемых параметров атмосферы. На графики могут быть добавлены положения географических пунктов, в которых расположены диагностические средства и другая информация. В комплексе заложена возможность вывода графической информации в виде JPEG файлов. Программная оболочка, разработанная в среде Delphi, позволяет легко добавлять новые модули обработки данных и их графического представления.

Результаты анализа данных

В работе (Shpynev et al., 2015) показано, что структура среднеширотной и полярной стратосферы в зимний период представляет собой сложную спиралеобразную циркуляцию, состоящую из системы плоских, практически горизонтальных СТ, расположенных на 40–60-х широтах. Зимний ЦПВ может иметь две типичные структуры, образуя потоки из одинарного (*puc. 2a*) или двойного (*puc. 2б*) струйных течений. Эта циркуляция обеспечивает глобальный перенос газа в стратосфере от экватора к полюсам, известный как циркуляция Бревера-Добсона (БД). БД-циркуляция обеспечивает перенос теплого стратосферрного воздуха из экваториальных областей в высокие широты и его проникновение в тропосферу через систему СТ, ответственных за генерацию циклонов над океанами и антициклонов над континентальной сушей. После прохождения полной зональной циркуляции эти течения повторяют геометрию движения на более низких высотных уровнях, образуя спиралевидную слоистую структуру с вертикальными размерами между слоями порядка 1–3 км. Полный цикл БД-циркуляции из стратосферы в тропосферу в таком потоке составляет 30–40 дней. Данный процесс в зимней стратосфере наиболее развит в северном полушарии, где параметры тропосферы из-за вариаций море/суша имеют резкие градиенты.



Рис. 2. Типичные структуры зимнего циркумполярный вихря

Наиболее интересным феноменом в структуре зимней стратосферной циркуляции является спиралевидный пограничный слой, который является источником периодичес-

ких волновых возмущений, распространяющихся вверх по потоку. Этот турбулентный слой является также областью преобразования энергии СТ в тепло и вносит существенный вклад в развитие зимних стратосферных потеплений. Стратосферные волновые возмущения, составляющие высокочастотную часть спектра, преобразуются, главным образом, в тепло вследствие каскадного разрушения атмосферных вихрей и турбулентной диффузии. ВГВ средних масштабов 1000–3000 км, образующиеся на высотах выше ~ 40 км, в основном, распространяются в направлении мезосферы, где отражаются или поглощаются на высотах 85–100 км. Часть этих ВГВ может проникать в термосферу (Черниговская и др., 2014; Chernigovskaya et al., 2015).

Для всех анализируемых в настоящей работе лет (2008–2013 гг.) выявлены среднемасштабные волновые движения в осенне-зимние периоды (с ноября по февраль), которые ассоциированы со СТ на высотах стратосферы и нижней мезосферы и могут быть источниками ВГВ. Для исследования параметров среднемасштабных волновых возмущений, возникающих в области зимнего СТ, были рассчитаны и проанализированы пространственные спектры вариаций вертикальных скоростей движения атмосферного газа вдоль каждой широты с помощью описанного выше программного комплекса. Получаемый спектр зональных вариаций вертикальной скорости описывает зональную компоненту ВГВ, генерируемых струйным течением. Определены высотные интервалы генерации ВГВ разных масштабов в условиях стабильного зимнего ЦПВ и во время развития экстремальной волновой активности в периоды ВСП.

На *рис. 3* и 4 в левых панелях приведены вариации вертикальных скоростей на разных высотах стратосферы и нижней мезосферы от уровня 175 гПа до 1 гПа (диапазон высот примерно от 13 до 50 км). Правые панели рисунков показывают спектры зональных вариаций вертикальной скорости. Как видно из распределений уровней постоянной фазы ВГВ на левых панелях *рис. 3* и 4, волновой вектор (перпендикуляр к уровню постоянной фазы) имеет существенную меридиональную компоненту. Таким образом, следует принимать во внимание, что реальные длины волн ВГВ на 30–40 % меньше, чем длины волн, определяемые по спектрам зональных вариаций.

Примеры спектров зональных вариаций вертикальной скорости для 22 декабря 2012 г. в случае стабильного ЦПВ представлены на *рис. 3*. Как видно из распределений спектральной мощности, широтные вариации интенсивности ВГВ на разных высотах зимней стратосферы определяются положением струйного течения. Спектры зональных вариаций вертикальной скорости показывают существование стабильной области генерации ВГВ на широтах 30–50° с.ш. практически на всех высотных уровнях стратосферы. С высотного уровня 70 гПа (~18 км) до высот нижней мезосферы выделяется вторая область генерации ВГВ на широтах 60–80° с.ш. В нижней стратосферь е на высотах ниже 30 км наблюдаются ВГВ с широким, практически равномерным по длинам волн спектром вариаций, что соответствует процессу каскадного дробления ВГВ и преобразованию их энергии в нагрев. В верхней стратосфере и нижней мезосфере в высоких широтах основными становятся ВГВ с длинами волн 700–1500 км.



Рис. 3. Вариации вертикальных скоростей и спектры зональных вариаций вертикальной скорости на высотах стратосферы и нижней мезосферы для 22.12.2012

Рис. 4. Вариации вертикальных скоростей и спектры зональных вариаций вертикальной скорости на высотах стратосферы и нижней мезосферы для 05.01.2013

Из спектров видно, что на больших высотах усиливаются колебания только определенных длин волн порядка 500–1000 км. Подобные распределения спектральной плотности ВГВ наблюдаются постоянно в зимней стратосфере, начиная со второй декады ноября для всех анализируемых лет. На верхнем графике *рис. 3*, соответствующем высоте 1 гПа (область стратопаузы – нижней мезосферы), спектр смещен в низкочастотную область, что соответствует ВГВ с длинами волн 1000–3000 км, которые переносят энергию вверх. Таким образом, область стратопаузы является естественным барьером, ниже которого энергия неустойчивостей струйного течения, выделяемая в пограничном слое, преобразуется в нагрев стратосферы. ВГВ, генерируемые выше стратопаузы более устойчивы турбулентному затуханию и могут распространяться под разными углами вверх на большие расстояния. В зависимости от угла распространения, а также от величины и направления зональных скоростей ветра в стратосфере и мезосфере (Ерохин и др., 2007; Kaifler et al., 2015), эти ВГВ либо проходят из мезосферы в термосферу, либо отражаются от области турбопаузы 85–90 км, либо рассеиваются на турбопаузе вследствие каскадного дробления (Bossert et al., 2015).

Другой тип спектральных характеристик ВГВ наблюдается в зимней стратосфере во время событий ВСП, когда структура зимнего циркумполярного течения кардинально меняется. Пример такого события приведен на рис. 4 для ВСП типа «major» в начале января 2013 г. С развитием потепления ЦПВ разделился на 3 вихря: два вихря циклонического типа – над Канадой, а также западной и центральной частью евразийского континента, и один вихрь антициклонического типа – над Сибирью и Дальним Востоком евразийского континента. Во время ВСП возникают мощные, направленные вниз потоки с вертикальными скоростями более 1 м/с, вследствие чего генерируются сильные периодические неоднородности («vortex sheet» или роллы), которые существуют в большом диапазоне высот (~15-45 км) (Shpynev et al., 2015). Данные волновые структуры образуются в результате опрокидывания ВГВ, преобразуют потенциальную энергию падающего потока в нагрев стратосферы и вносят значительный вклад в наблюдаемый эффект ВСП. Фактически, пространственный масштаб роллов является предельным минимальным масштабом ВГВ, который изменяется с высотой, т.е. зависит от плотности и частоты Брента-Вяйсяля. В подобных условиях генерация волновых возмущений происходит преимущественно в высоких широтах с преобладанием в спектре длин волн 200–500 км. На высотах нижней мезосферы (~50 км) во время событий ВСП наблюдаются возмущения с длинами волн 700–1000 км.

Заключение

Результаты исследования спектральных характеристик ВГВ, генерируемых зимним циркумполярным СТ на высотах стратосферы и нижней мезосферы, показали существование двух типов волновых возмущений. Первый тип связан с регулярной генерацией волн сдвиговой неустойчивостью на границе струйных течений. Низкочастотные волны, гене-

рируемые выше стратопаузы, распространяются вверх из стратосферы в мезосферу и, частично, в термосферу. Ниже стратопаузы ВГВ меньших масштабов преобразуются в тепло вследствие каскадного дробления и турбулентности, и их спектр является практически равномерным.

В периоды мощных метеорологических возмущений в стратосфере (таких, как события ВСП) вместе с регулярными ВГВ формируются структуры нелинейных мелкомасштабных волн (роллов), энергия которой эффективно преобразуется в нагрев стратосферы и создание областей сильных стратосферных потеплений.

С увеличением высоты спектр вариаций вертикальной скорости смещается в низкочастотную область. Это означает, что ВГВ с большими длинами волн более эффективно проникают в верхние слои, перенося с собой энергию из нижележащей атмосферы.

Широтные вариации интенсивности спектра волновых движений показывают четкую корреляцию наблюдаемых источников ВГВ с зоной взаимодействия струйных течений. С увеличением высотного уровня усиления интенсивности спектра ВГВ наблюдаются в большем диапазоне широт. Это связано с увеличением с высотой размера зимнего ЦПВ, охватывающего кольцом полярную и среднеширотную стратосферу и мезосферу.

Оценки параметров ВГВ, полученные нами в результате выполненного анализа, согласуются с оценками других авторов (см. ссылки, цитируемые во введении статьи).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-05-05227-а и № 16-05-01087-а.

Литература

- 1. Варгин П.Н, Володин Е.М., Карпечко А.Ю., Погорельцев А.И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 1. С. 39-46.
- Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. Особенности взаимодействия внутренних гравитацион-2. ных волн с температурно-ветровыми структурами атмосферы при распространении в ионосферу // Совре-менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 84–89.
- 3. Ивангородский Р.В., Нерушев А.Ф. Характеристики струйных течений верхней тропосферы по данным измерений европейских геостационарных метеорологических спутников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 45–53.
- Черниговская М.А., Сутырина Е.Н., Ратовский К.Г. Метеорологические эффекты ионосферной возмущенности над Иркутском по данным вертикального радиозондирования // Современные проблемы дис-4. танционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 264–274.
- *Abatzoglou J.T., Magnusdottir G.* Wave breaking along the stratospheric polar vortex as seen in ERA-40 data // Geophys. Res. Lett. 2007. Vol. 34. No. 8. P. L08812. doi:10.1029/2007GL029509. 5.
- *Alexander M.J.* Global and seasonal variations in threedimensional gravity wave momentum flux from satellite limb-sounding temperatures // Geophys. Res. Lett. 2015. Vol. 42. P. 6860–6867. doi:10.1002/2015GL065234. 6.
- 7. Alexander M.J., Barnet C. Using satellite observations to constrain parameterizations of gravity wave effects for global models // J. Atmos. Sci. 2007. Vol. 64. No. 5. P. 1652–1665. doi:10.1175/JAS3897.1.
- *Baldwin M.P., Holton J.R.* Climatology of the stratospheric polar vortex and planetary wave breaking // J. Atmos. Sci. 1988. Vol. 45, No. 7. P. 1123–1142. *Bossert K.D., Fritts C., Pautet P.-D., Williams B.P., Taylor M.J., Kaifler B., Dörnbrack A., Reid I.M., Murphy* 8.
- 9. D.J., Spargo A.J., MacKinnon A.D. Momentum flux estimates accompanying multiscale gravity waves over Mount Cook, New Zealand, on 13 July 2014 during the DEEPWAVE campaign // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. Vol. 120. No. 18. P. 9323–9337. doi:10.1002/2015JD023197.
- 10. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G. Meteorological effects of ionospheric disturbances from ver-
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.O., Ratovsky R.O. Meteorological effects of follospheric disturbances from vertical radio sounding data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2015. Vol. 136. P. 235–243. doi:10.1016/j.jastp.2015.07.006.
 Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C.,

Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. Vol. 137. No. 656. P. 553–597. doi:10.1002/qj.828.

- Fritts D.C., Alexander M.J. Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere // Rev. Geophys. 2003. Vol. 41. No. 1. P. 1003–1066. doi: 10.1029/2001RG000106.
- *13. Hamilton K.* Dynamical coupling of the lower and middle atmosphere: Historical background to current research // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1999. Vol. 61. No. 1. P. 73–84.
- Hecht J.H., Alexander M.J., Walterscheid R.L., Gelinas L.J., Vincent R.A., MacKinnon A.D., Woithe J.M., May P.T., Skinner W.R., Mylnczak M.G., Russell J.M. III Imaging of atmospheric gravity waves in the stratosphere and upper mesosphere using satellite and ground-based observations over Australia during the TWPICE campaign // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. No. D18. 123 p. doi:10.1029/2008JD011259.
 Kaifler B., Lübken F.-J., Höffner J., Morris R.J., Viehl T.P. Lidar observations of gravity wave activity in the
- Kaifler B., Lübken F.-J., Höffner J., Morris R.J., Viehl T.P. Lidar observations of gravity wave activity in the middle atmosphere over Davis (69°S, 78°E), Antarctica // J. Geophys. Res. Atmos. 2015. Vol. 120. No. 10. P. 4506–4521. doi:10.1002/2014JD022879.
- Karpetchko A., Kyrö E., Knudsen B.M. Arctic and Antarctic polar vortices 1957–2002 as seen from the ERA-40 reanalyses // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110. No. D21. P. 109. doi:10.1029/2005JD006113.
- Kushner P.J. Annular modes of the troposphere and stratosphere, in The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry // Geophys. Monogr. Ser. 2010. Vol. 190. P. 59–91. doi:10.1029/2009GM000924.
- 18. Labiztke K.G., van Loon H. The Stratosphere: Phenomena, History, and Relevance. New York: Springer, 1999. 179 p.
- Newman P.A., Schoeberl M.R. Middle atmosphere: Polar vortex // Encyclopedia of Atmospheric Sciences, edited by J.R. Holton, J. Pyle, and J.A. Curry. San Diego, Calif.: Academic, 2003. P. 1321–1328.
- Perevalova N.P., Polyakova A.S., Pogoreltsev A.I. Variations in the characteristics of acoustic gravity waves according to simulation data // Geomagnetism and Aeronomy. 2013. Vol. 53. No. 3. P. 397–408.
- *21. Plougonven R., Zhang F.* Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // Rev. Geophys. 2014. Vol. 52, P. 1–37. doi:10.1002/2012RG000419.
- Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A. Generation of waves by jet-stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2015. Vol. 136. P. 201–215. doi:10.1016/j.jastp.2015.07.005.
 Tsuda T. Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar
- Tsuda T. Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation // Proc. Jpn. Acad. Ser. B. 2014. Vol. 90. No. 1. P. 12–27.
- 24. Vincent R.A. Gravity wave coupling from below: A review // Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium. Tokyo: TERRAPUB, 2009. P. 279–293.
- Vincent R.A. The dynamics of the mesosphere and lower thermosphere: a brief review // Prog. Earth Planet Sci. 2015. Vol. 2. No. 1. P. 1–13. doi:10.1186/s40645-015-0035-8.
- Wang L., Geller M.A., Alexander M.J. Spatial and temporal variations of gravity wave parameters. Part I: Intrinsic frequency, wavelength, and vertical propagation direction // J. Atmos. Sci. 2005. Vol. 62. No. 1. P. 125–142. doi:http://dx.doi.org/10.1175/JAS-3364.1.
- Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric Polar Vortices // The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry, Geophys. Monogr. Ser. 2010. Vol. 190. P. 43–57. doi:10.1029/2009GM000887.
- 28. Wu D.L., Eckermann S.D. Global gravity wave variances from Aura MLS: Characteristics and Interpretation // J. Atmos. Sci. 2008. Vol. 65. No. 12. P. 3695–3718. doi:10.1175/2008JAS2489.1.
- Wu D.L., Waters J.W. Gravity wave scale temperature fluctuations seen by the UARS MLS // Geophys. Res. Lett. 1996. Vol. 23. No. 23. P. 3289–3292.
- Yamashita C., Liu H.L., Chu X. Gravity wave variations during the 2009 stratospheric sudden warming as revealed by ECMWF-T799 and observations // Geophys. Res. Lett. 2010. Vol. 37. No. 22. P. L22806. doi:10.1029/2010GL045437.
- *31. Yiğit E., Medvedev A.S.* Internal waves coupling processes in Earth's atmosphere // Adv. Space Res. 2015. Vol. 55. No. 4. P. 983–1003.

Spectral characteristics of atmospheric waves generated by winter stratospheric jet stream in the Northern Hemisphere

B.G. Shpynev, M.A. Chernigovskaya, D.S. Khabituev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia *E-mail: shpynev@iszf.irk.ru*

We studied the spatial and temporal variations of atmospheric air vertical velocity in the stratosphere and lower mesosphere in the Northern Hemisphere over years 2008–2013. Based on the ECMWF ERA-Interim reanalysis data, we identified periods of middle-scale wave-like motions in the autumn-winter period (between November and February) for all years under analysis. These wave-like motions were associated with jet streams at the stratosphere/lower mesosphere heights and could be sources of atmospheric gravity waves. We studied spatial variations of the vertical velocity for different heights and latitudes. The height variations of the vertical velocity spectra showed that these waves propagated as internal gravity waves above some critical stratosphere height near the stratopause. Below this height the waves decayed as a result of turbulent cascade process. The region of generation of the wave-like motions coincided with the zone of interaction of the jet streams, located at different stratosphere heights.

Keywords: the lower and upper atmosphere, interaction between atmospheric layers, wave disturbances

Accepted: 22.02.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-120-131

References

- Vargin P.N, Volodin E.M., Karpechko A.Yu., Pogorel'tsev A.I., O stratosferno-troposfernykh vzaimodeistviyakh (About stratosphere-troposphere coupling), *Vestnik RAN*, 2015, Vol. 85, No. 1, pp. 39–46. 1.
- 2. Erokhin N.S., Zol'nikova N.N., Mikhailovskaya L.A., Osobennosti vzaimodeistviya vnutrennikh gravitatsionnykh voln s temperaturno-vetrovymi strukturami atmosfery pri rasprostranenii v ionosferu (Features of the internal gravity waves propagation into the ionosphere and their interaction with the structures of the atmospheric wind and tem-
- perature), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2007, Vol. 4, No. 2. pp. 84–89. Ivangorodsky R.V., Nerushev A.F., Kharakteristiki struinykh techenii verkhnei troposfery po dannym izmerenii 3 evropeiskikh geostatsionarnykh meteorologicheskikh sputnikov (Characteristics of the upper tropospheric jet fluxes inferred from the data of European geostationary meteorological satellites), Sovremennye problemy distan*tsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 45–53. Chernigovskaya M.A., Sutyrina E.N., Ratovsky K.G., Meteorologicheskie effekty ionosfernoi vozmushchennosti
- 4 nad Irkutskom po dannym vertikal'nogo radiozondirovaniya (Meteorological effects of ionospheric disturbances over Irkutsk according to vertical radio sounding data), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 264-274.
- Abatzoglou J.T., Magnusdottir G., Wave breaking along the stratospheric polar vortex as seen in ERA-40 data, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, Vol. 34, No. 8. L08812 p., doi:10.1029/2007GL029509. 5.
- Alexander M.J., Global and seasonal variations in threedimensional gravity wave momentum flux from satellite 6. limb-sounding temperatures, Geophys. Res. Lett., 2015, Vol. 42, pp. 6860-6867, doi:10.1002/2015GL065234.
- Alexander M.J., Barnet C., Using satellite observations to constrain parameterizations of gravity wave effects for global models, *J. Atmos. Sci.*, 2007, Vol. 64, No. 5, pp. 1652–1665, doi: 10.1175/JAS3897.1. Baldwin M.P., Holton J.R. Climatology of the stratospheric polar vortex and planetary wave breaking, *J. Atmos.* 7.
- 8. Sci., 1988, Vol. 45, No. 7, pp. 1123–1142.
- 9. Bossert K.D. Fritts C., Pautet P.-D., Williams B.P., Taylor M.J., Kaifler B., Dörnbrack A., Reid I.M., Murphy D.J., Spargo A.J., MacKinnon A.D., Momentum flux estimates accompanying multiscale gravity waves over Mount Cook, New Zealand, on 13 July 2014 during the DEEPWAVE campaign, *J. Geophys. Res.* Atmos., 2015, Vol. 120, No. 18, pp. 9323–9337, doi:10.1002/2015JD023197.
- 10. Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Ratovsky K.G., Meteorological effects of ionospheric disturbanc-es from vertical radio sounding data, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2015, Vol. 136, pp. 235–243, doi:10.1016/j. jastp.2015.07.006.
- 11. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, Q.J.R. Meteorol. Soc., 2011, Vol. 137, No. 656, pp. 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- 12. Fritts D.C., Alexander M.J., Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, Rev. Geophys., 2003, Vol. 41, No. 1, pp. 1003-1066, doi: 10.1029/2001RG000106.
- Hamilton K. Dynamical coupling of the lower and middle atmosphere: Historical background to current research, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 1999, Vol. 61, No. 1, pp. 73–84.
 Hecht J.H., Alexander M.J., Walterscheid R.L., Gelinas L.J., Vincent R.A., MacKinnon A.D., Woithe J.M., May P.T., Skinner W.R., Mylnczak M.G., Russell J.M., III Imaging of atmospheric gravity waves in the stratosphere and upper mesosphere using satellite and ground-based observations over Australia during the TWPICE campaign, J. Geophys. Res., 2009, Vol. 114, No. D18, 123 p., doi:10.1029/2008JD011259.

- 15. Kaifler B., Lübken F.-J., Höffner J., Morris R.J., Viehl T.P. Lidar observations of gravity wave activity in the middle atmosphere over Davis (69°S, 78°E), Antarctica, J. Geophys. Res. Atmos., 2015, Vol. 120, No. 10, pp. 4506-4521, doi:10.1002/2014JD022879.
- 16. Karpetchko A., Kyrö E., Knudsen B.M. Arctic and Antarctic polar vortices 1957–2002 as seen from the ERA-40 reanalyses, J. Geophys. Res., 2005, Vol. 110, No. D21, 109 p., doi:10.1029/2005JD006113.
- 17. Kushner P.J. Annular modes of the troposphere and stratosphere, In: The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry, Geophys. Monogr. Ser., 2010, Vol. 190, pp. 59-91, doi:10.1029/2009GM000924.
- Labiztke K.G., van Loon H. The Stratosphere: Phenomena, History, and Relevance, NewYork: Springer, 1999, 179 p. 18
- 19. Newman P.A., Schoeberl M.R. Middle atmosphere: Polar vortex, In: Encyclopedia of Atmospheric Sciences, edited by J.R. Holton, J. Pyle, and J.A. Curry, San Diego, Calif.: Academic, 2003, pp. 1321-1328.
- 20. Perevalova N.P., Polyakova A.S., Pogoreltsev A.I. Variations in the characteristics of acoustic gravity waves according to simulation data, Geomagnetism and Aeronomy, 2013, Vol. 53, No. 3, pp. 397-408.
- 21. Plougonven R., Zhang F. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts, Rev. Geophys., 2014, Vol. 52, pp. 1–37, doi:10.1002/2012RG000419. 22. Shpynev B.G., Churilov S.M., Chernigovskaya M.A. Generation of waves by jet-stream instabilities in win-
- ter polar stratosphere/mesosphere, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 2015, Vol. 136, pp. 201-215, doi:10.1016/j.
- jastp.2015.07.005. 23. Tsuda T. Characteristics of atmospheric gravity waves observed using the MU (Middle and Upper atmosphere) radar and GPS (Global Positioning System) radio occultation, *Proc. Jpn. Acad., Ser. B.*, 2014, Vol. 90, No. 1, pp. 12–27. 24. Vincent R.A. Gravity wave coupling from below: A review, *Climate and Weather of the Sun-Earth System*
- (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium. Tokyo: TERRAPUB, 2009, pp. 279–293.
- Vincent R.A. The dynamics of the mesosphere and lower thermosphere: a brief review, Prog. Earth Planet Sci., 25 2015, Vol. 2, No. 1, pp. 1–13, doi:10.1186/s40645-015-0035-8.
 26. Wang L., Geller M.A., Alexander M.J. Spatial and temporal variations of gravity wave parameters. Part I: Intrin-
- sic frequency, wavelength, and vertical propagation direction, J. Atmos. Sci., 2005, Vol. 62, No. 1, pp. 125-142, doi:http://dx.doi.org/10.1175/JAS-3364.1
- 27. Waugh D.W., Polvani L.M. Stratospheric Polar Vortices, In: The Stratosphere: Dynamics, Transport, and Chemistry, Geophys. Monogr. Ser., 2010, Vol. 190, pp. 43-57, doi:10.1029/2009GM000887.
- 28. Wu D.L., Eckermann S.D. Global gravity wave variances from Aura MLS: Characteristics and Interpretation, J. Atmos. Sci., 2008, Vol. 65, No. 12, pp. 3695-3718, doi:10.1175/2008JAS2489.1
- 29. Wu D.L., Waters J.W. Gravity wave scale temperature fluctuations seen by the UARS MLS, Geophys. Res. Lett., 1996, Vol. 23, No. 23, pp. 3289–3292. 30. Yamashita C., Liu H.L., Chu X. Gravity wave variations during the 2009 stratospheric sudden warm-
- ing as revealed by ECMWF-T799 and observations, Geophys. Res. Lett., 2010, Vol. 37, No. 22, L22806 p., doi:10.1029/2010GL045437.
- 31. Yiğit E., Medvedev A.S. Internal waves coupling processes in Earth's atmosphere, Adv. Space Res., 2015, Vol. 55, No. 4, pp. 983–1003.