

*В.И. Мордвинов, А.И. Погорельцев, Е.В. Девятова, О.С. Кочеткова,
А.И. Погорельцев, Е.Н. Савенкова, Е.К. Ульянов*

**ГЕНЕРАЦИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ
НИЗКОЧАСТОТНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
ЗИМОЙ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ**

*V.I. Mordvinov, A.I. Pogoreltsev, E.V. Devyatova, O.S. Kochetkova,
E.N. Savenkova, E.K. Ulyanets*

**GENERAON AND PROPAGATION
OF THE WINTERTIME ATMOSPHERIC LOW-FREQUENCY
DISTURBANCES IN THE NORTHERN HEMISPHERE**

С помощью метода одноточечных корреляций со сдвигом во времени исследуются низкочастотные возмущения в зимней атмосфере Северного полушария, ответственные за возбуждение крутильных колебаний – вариаций интенсивности среднезонального потока с временным масштабом 15–30 суток, распространяющихся вдоль меридиана. В стратосфере были выделены три типа возмущений – аномалии, бегущие с востока на запад над Евразией-Тихим океаном с периодом около 28 суток (компонента 1), аномалии, медленно смещающиеся с запада на восток над Северной Америкой – Атлантикой (компонента 3), а также спиральные конфигурации, развивающиеся над Евразией (компонента 2), вероятно, представляющие собой двумерные волны Россби, излучаемые цугом нелинейных волн или вихрей (компонента 1) над северной частью Евразии. Амплитуды компонент имеют максимум в умеренных и высоких широтах и убывают в тропиках. В тропосфере структура и динамика возмущений различна в разных частях полушария. Над северными частями Атлантики и Тихого океана возмущения имеют квазидипольную структуру с фиксированным в пространстве положением узлов и периодичностью смены знака аномалий примерно через 15–20 суток. Над восточной частью Евразии и Северной Америкой выделяются бегущие возмущения, пересекающие восточную часть континентов с северо-запада на юго-восток.

Ключевые слова: общая циркуляция атмосферы, крутильные колебания, волны Россби, низкочастотные возмущения.

The low-frequency disturbances in the winter atmosphere of the Northern Hemisphere are investigated using the method of one-point correlations with time-shift. These disturbances are responsible for excitation of torsional oscillations that are the variations of the mean-zonal flow intensity propagating along the meridian with time scale 15-30 days. In the stratosphere the three types of disturbances have been revealed – the anomalies propagating westerly over the Eurasia-Pacific Ocean with the 28-days period (component 1); the anomalies that shift slowly eastward over the North America- Atlantic (component 3) as well as the spiral configurations that developing over the Eurasia (component 2), which probably represent the two-dimensional Rossby waves that are generated by the train of nonlinear waves or vortexes over the northern part of Eurasia (component 1). Amplitudes of the components have a maximum in the middle and high latitudes and decrease in the tropics. In the troposphere the structure and the dynamics of disturbances are different in various parts of the hemisphere. Over northern parts of the Atlantic and Ocean Pacific the disturbances have a quasi-dipole

structure with the fixed position of nodes and change in the sign of anomalies with the period of about 15-20 days. Over the eastern part of the Eurasia and North America are revealed the traveling disturbances that cross the eastern part of continents from the north-west to the south-east.

Key words: the general atmospheric circulation, torsional oscillations, the Rossby waves, the low-frequency disturbances.

Введение

В работе проведено исследование генерации и распространения низкочастотных атмосферных возмущений зимой в Северном полушарии, ответственных за возбуждение так называемых крутильных колебаний. Крутильные колебания представляют собой вариации интенсивности среднезонального потока с характерным временным масштабом 15–30 суток, распространяющиеся вдоль меридиана в умеренных и низких широтах [3]. На рис. 1 приведен пример крутильных колебаний, рассчитанных на двух уровнях атмосферы 500 и 10 гПа с 10 сентября 2000 г. по 20 апреля 2001 г. Хорошо видны возмущения скорости среднезонального потока, распространяющиеся вдоль меридиана во встречных направлениях. Во многих случаях возмущения возникают в полярных областях, прослеживаются в средних широтах и пересекают экватор. Так как крутильные колебания наблюдаются на длительных интервалах времени и распространяются на большие расстояния, они могут быть ответственны за дальние связи и, несомненно, представляют интерес для исследования.

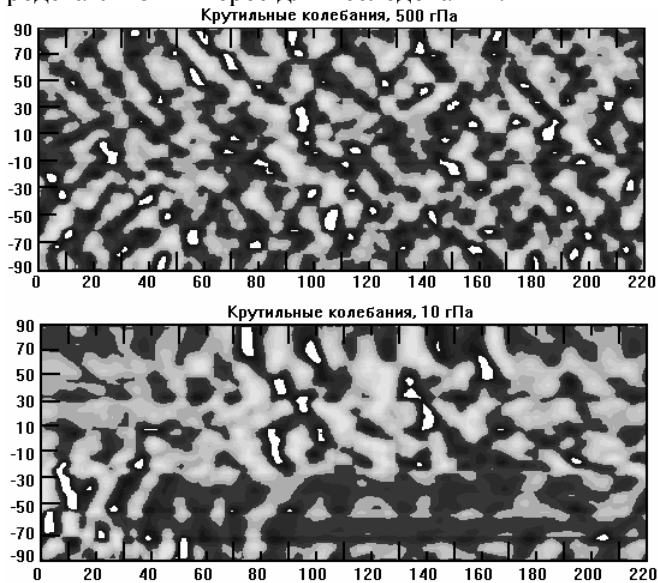


Рис. 1. Крутильные колебания, рассчитанные по данным NCEP/NCAR Reanalysis за период с 10 сентября 2000 г. по 20 апреля 2001 г. на двух изобарических поверхностях 500 и 10 гПа. Нанесены изолинии зонально-осредненной зональной компоненты скорости, предварительно отфильтрованной в диапазоне 5–20 суток и нормированной на каждой широте на интервал между максимальным и минимальным значением. По горизонтальной оси отложены номера дней года

Вопрос о том, какие именно возмущения ответственны за достаточно регулярную картину крутильных колебаний, остается открытым. Давно известны наблюдательные свидетельства существования собственных колебаний атмосферы в низкочастотном диапазоне [6, 11, 12, 14, 15]. Вариации метеополей в интервале от 5 до 30 суток обычно интерпретируют в терминах нормальных атмосферных мод второго класса – H_2^1, H_3^1, H_4^1 . Обзор свойств этих мод приведен в работах [9, 10, 13]. Наиболее изучены в этом диапазоне распространяющиеся на запад планетарные волны с зональным волновым числом $m = 1$ и периодами около 5, 10 и 16 суток. Непосредственно вызывать крутильные колебания эти волны не могут, однако в нижних слоях они взаимодействуют с орографией, а в верхних – со стационарными волнами, или с зонами повышенной бароклинности (в зоне арктического фронта, например), порождая, таким образом, вынужденные колебания зонального потока.

Так как крутильные колебания квазирегулярны, для исследования связанных с ними возмущений был использован метод одноточечных корреляций со сдвигом во времени, предложенный в работе [7]. Этот метод выгодно отличается от разложений по гармоникам тем, что пространственная структура искомым возмущений априори не задается, а сами возмущения не обязательно должны быть периодическими. Это могут быть не только волны, но и отдельные вихри. Можно показать, что в том случае, когда анализируемые вариации регулярны (или представляют собой суперпозицию регулярных колебаний), пространственная структура распределения полей коэффициентов корреляции, рассчитываемых в методе [7], совпадает с пространственной структурой колебаний. Поэтому в дальнейшем для удобства изложения мы будем трактовать особенности в распределениях коэффициентов корреляции как особенности пространственной структуры колебаний самих величин.

Метод исследования

Исходными данными для анализа служили среднесуточные значения высот изобарических поверхностей (HGT) и зональной составляющей скорости ветра (U) в узлах регулярной сетки $2,5 \times 2,5^\circ$ NCEP/NCAR Reanalysis [8]. Временные ряды величин в узлах сетки обрабатывались следующим образом. Сначала скользящим усреднением выделялись колебания в выбранном диапазоне (5–20 суток). Целью фильтрации было подавление хаотического фона и исключение долговременных колебаний. Затем с помощью метода одноточечных корреляций со сдвигом во времени рассчитывались распределения коэффициентов корреляции метеовеличин в узлах сетки $2,5 \times 2,5^\circ$ относительно вариаций этих величин в фиксированных точках.

В качестве реперных точек использовались узлы сетки, расположенные вдоль параллели 55° с.ш., примерно совпадающей со средним положением полярнофронтального струйного течения в стратосфере. Заключительной операцией было усреднение рассчитанных распределений коэффициентов корреляции за

10-летние интервалы времени. Это позволило выделить регулярную составляющую низкочастотной изменчивости. Для представления результатов было выбрано десятилетие 1980–1990 гг., достаточно полно отражающее все выявленные особенности поведения низкочастотных атмосферных возмущений.

Расчеты выполнялись для разных изобарических поверхностей. Оказалось, что результаты вычислений сильно отличаются при переходе от тропосферы к стратосфере и гораздо меньше внутри каждого из этих слоев. Поэтому мы выбрали для представления результатов только два уровня - 500 и 10 гПа, достаточно полно характеризующих колебания в тропосфере и стратосфере. Распределения коэффициентов корреляции рассчитывались за период с 15 января по 15 марта. В этот период циркуляция в тропосфере и стратосфере не только особенно интенсивна, но и неустойчива, в это время наблюдаются случаи разрушения Полярного вихря, сопровождающиеся стратосферными васцилляциями. Согласно [4], эти процессы могут быть обусловлены взаимодействием распространяющихся из тропосферы планетарных волн со средним потоком.

Результаты исследования

Стратосфера. На рис. 2 приведены распределения изокоррелят зональной составляющей скорости со сдвигом во времени от -9 до $+6$ суток, рассчитанные относительно реперной точки с координатами 55° с.ш., 108° в.д. на уровне 10 гПа, расположенной в центральной части азиатского континента. Изокорреляты нанесены в диапазоне от $\pm 0,1$ до $\pm 0,9$. Изокоррелята 0.1 близка к уровню случайного фона, однако неплохо описывает крупномасштабную пространственную структуру колебания, изокоррелята $\pm 0,2$ уже явно характеризует структуру колебаний.

Динамику распределений можно представить в виде суммы двух компонент: 1) вращения крупномасштабных аномалий изокоррелят с востока на запад в умеренных и высоких широтах; 2) формирования и дрейфа с востока на запад спиральных конфигураций, протяженность которых, увеличиваясь со временем, достигает при максимальных сдвигах более 360 градусов по долготе. В цилиндрической проекции спирали представляют собой почти прямые линии, вытянутые с северо-востока на юго-запад и пересекающие экватор. Кроме переноса в западном направлении спирали имеют тенденцию «стягиваться» к полюсу, что возможно, связано с конвергенцией течений в полярной области на выбранном уровне. Назовем эти компоненты условно компонентой 1 и компонентой 2. Суперпозиции компонент получают при расчетах относительно большинства реперных точек в умеренных широтах Северного полушария, хотя имеются и исключения, на которых мы остановимся ниже.

Крупномасштабные аномалии изокоррелят компоненты 1 напоминают по структуре нормальные моды, амплитуда которых уменьшается от полюса к экватору. Сходство лучше выражено в вариациях зональной скорости, чем в колебаниях высоты геопотенциальных поверхностей, причем структура аномалий и

скорость их перемещения вдоль параллелей неплохо соответствуют нормальной моде Y_4^1 , имеющей период 28.08 суток [10]. В возмущениях геопотенциальной высоты, приведенных на рис. 3, сходство меньше, чередование знака аномалий вдоль меридиана, характерное для сферических функций, скорее, выглядит как результат чередования спиралей разного знака. Вращение компоненты 1 происходит не строго вдоль параллелей, а следует конфигурации среднего поля скорости.

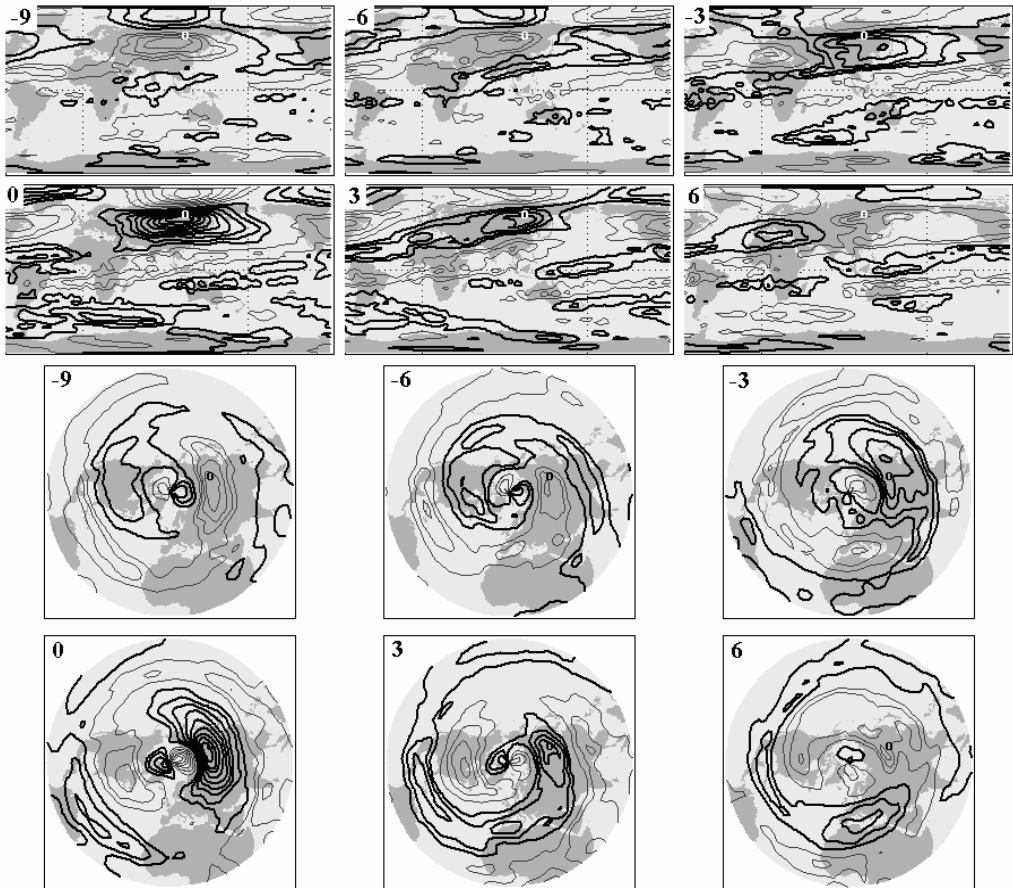


Рис. 2. Пространственная структура колебаний зональной скорости на поверхности 10 гПа относительно точки 55° с.ш. 108° в.д. за период с 1980 по 1990 г. Верхний рисунок – цилиндрическая проекция, нижний рисунок – стереографическая проекция. Нанесены изолинии распределений коэффициентов корреляции вариаций зональной скорости, рассчитанных для интервала 15 января–15 марта со сдвигом во времени от –9 суток до +6 суток. Положительные и отрицательные аномалии коэффициентов корреляции выделены соответственно толстыми и тонкими линиями

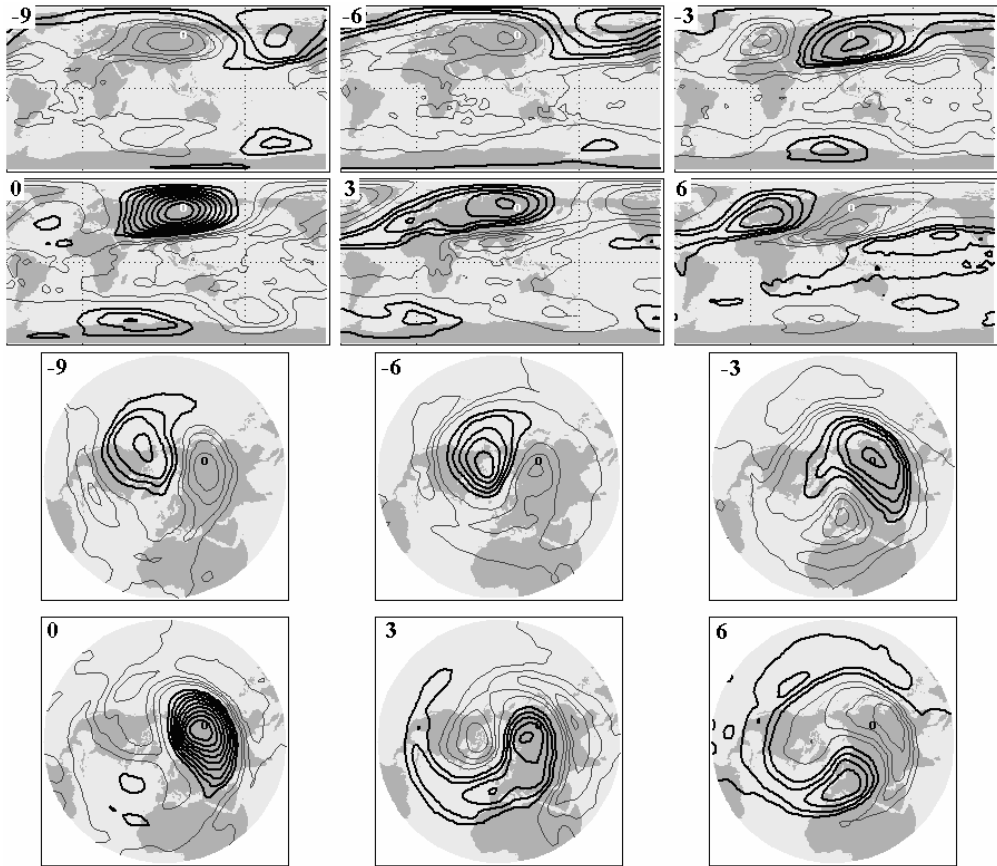


Рис. 3. Пространственная структура колебаний высоты геопотенциальной поверхности 10 гПа относительно точки с координатами 55 ° с.ш., 108 ° в.д. в цилиндрической (верхний рисунок) и стереографической (нижний рисунок) проекциях. Период осреднения 1980–1990 г. Нанесены изолинии коэффициентов корреляции вариаций высоты геопотенциальной поверхности, рассчитанных для интервала 15 января – 15 марта со сдвигом во времени от -9 суток до +6 суток. Положительные и отрицательные аномалии коэффициентов корреляции выделены соответственно толстыми и тонкими линиями

Большая протяженность спиралей в меридиональном направлении указывает на возможность переноса возмущений через экватор. Так как в тропической стратосфере в этот период преобладают ветры, направленные с востока на запад, подобная особенность не кажется тривиальной. Моделью спирали может служить неоднородная волна, в которой плоскости равных фаз и равных амплитуд взаимно ортогональны или почти взаимно ортогональны (в отсутствие затухания). Волновой вектор в этом случае является комплексным, т.е. $\mathbf{k} = \mathbf{k}' + i\mathbf{k}''$. Как известно, неоднородные волны могут возникать при падении плоских однородных волн на границу раздела двух сред. В стратосфере такой границей может быть граница циркумполярного вихря.

Более вероятно, однако, что спирали представляют собой квазилинейные возмущения, обусловленные периодическим источником, имеющим, например, структуру одной из нормальных мод. Как известно, гармонические колебания являются решением не только линейного, но и нелинейного уравнения квази-геострофического потенциального вихря [2], поэтому колебания, имеющие структуру нормальных мод в зонально-симметричном потоке, могут иметь большую амплитуду. Так как средний поток и в тропосфере и в стратосфере зонально-несимметричен, можно предположить, в первом приближении, что амплитуда нормальной моды модулирована в пространстве. Согласно проведенному анализу, амплитуда волны должна быть максимальна над северной частью Евразии и убывать над океанами. Физически модуляция может быть обусловлена взаимодействием ультрадлинной волны со стационарными орографическими волнами либо со струйными течениями, например, с арктическим струйным течением вблизи северного побережья Сибири. Известно, что время установления двумерных волн Россби составляет порядка недели [5]. Так как это время меньше периода колебаний компоненты 1, спиральные конфигурации можно рассматривать как квазистационарный отклик на медленно меняющийся внешний источник возбуждения. Области наиболее интенсивной генерации волновых возмущений, видимо, приурочены к положению ложбин и гребней стационарных волн. Во второй части работы мы приведем модельные расчеты, подтверждающие данное предположение.

Если наложить компоненту 1 на среднее распределение высоты поверхности 10 гПа, можно видеть, что ультрадлинные волны фактически представляют собой колебания стратосферного полярного струйного течения.

Простую картину суперпозиции ультрадлинных волн Россби, бегущих в западном направлении, и возмущений, распространяющихся на юго-запад, нарушают аномалии, развивающиеся над Северной Атлантикой. На рис. 4 приведены распределения изокоррелят, рассчитанные относительно точки с координатами 55 ° с.ш., 30 ° з.д. Хорошо видно смещение аномалий зональной скорости в высоких широтах над Северной Америкой и Северной Атлантикой с запада на восток. Назовем эти аномалии компонентой 3. При достижении аномалиями побережья Европы начинается формирование спиральной конфигурации, аналогичной компоненте 2. Так как при расчетах относительно разных реперных точек воспроизводятся либо компонента 1, либо компонента 3, связь между возбуждением этих аномалий, видимо, отсутствует или является слабой. Однако и та и другая компоненты вызывают формирование «спиралей» с одинаковой пространственной структурой.

Различие в поведении возмущений над Азиатским континентом и Северной Атлантикой хорошо видно на рис. 5, на котором приведены графики коэффициентов корреляции высоты геопотенциальной поверхности 10 гПа вдоль различных широтных кругов, рассчитанные относительно точек 55 ° с.ш., 108 ° в.д. (верхний рисунок) и 55 ° с.ш., 30 ° з.д. (нижний рисунок) с временными сдвига-

ми от -9 суток (верхние кривые) до $+6$ суток (нижние кривые). Наклонная линия на верхнем рисунке, проходящая через максимумы в распределении коэффициентов корреляции, соответствует периоду вращения $28,4$ суток. На нижнем рисунке положение максимумов почти не меняется со временем, что подтверждает вывод о различной динамике возмущений в разных секторах полушария. Видимо, динамика возмущений в Северной Атлантике определяется не только особенностями распространения волн малой амплитуды, но и спецификой источника колебаний. Генезис этих колебаний пока неясен. Если источником колебаний является Полярный вихрь, перемещающийся в меридиональном направлении, то в зависимости от положения центра вихря относительно полюса будут возбуждаться колебания с восточной либо западной составляющей скорости.

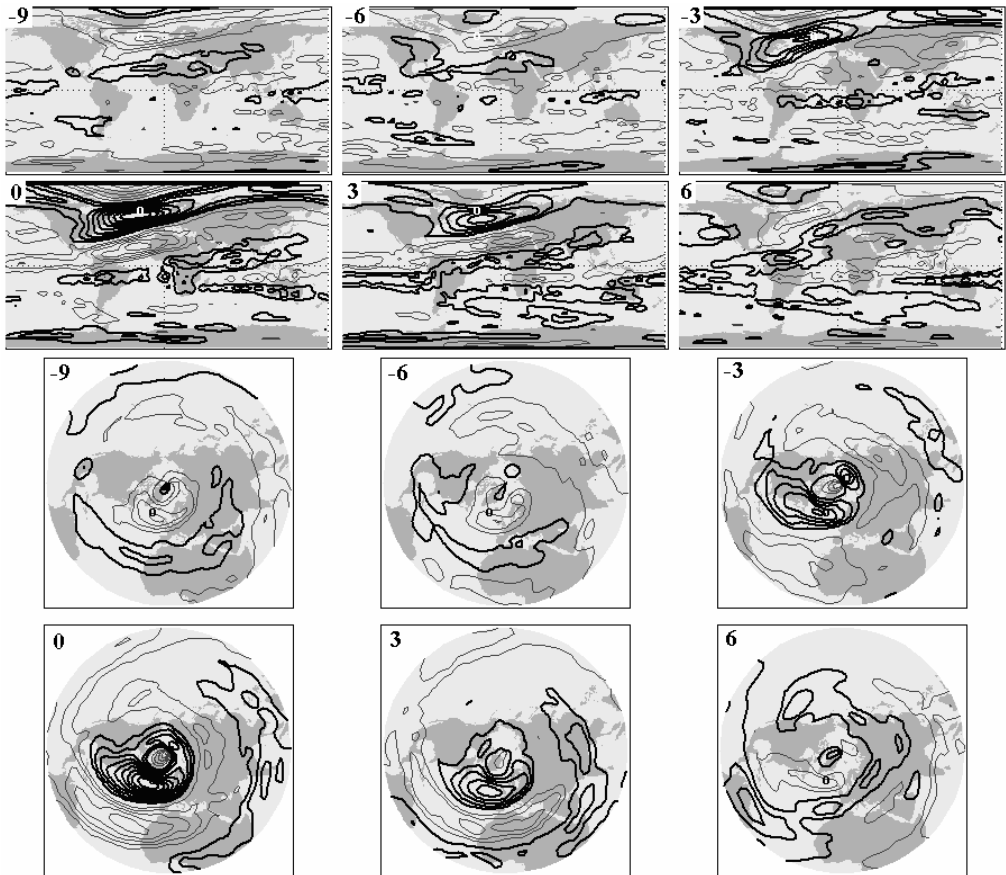


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но распределения изокоррелят рассчитаны относительно точки с координатами 55° с.ш., 30° з.д.

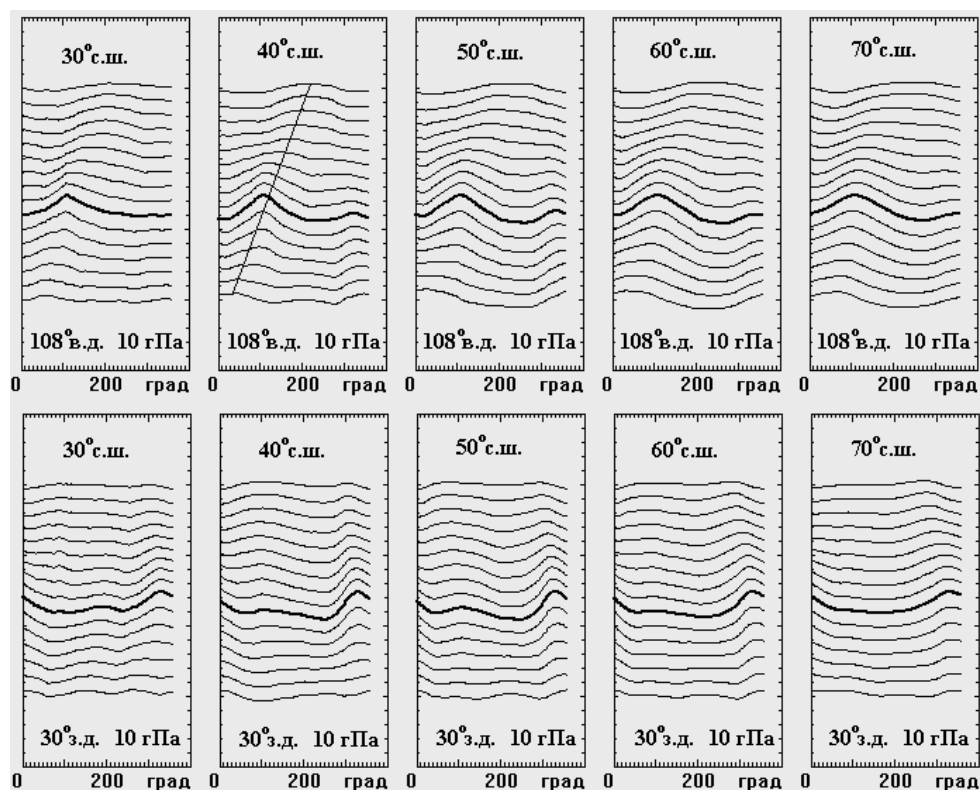


Рис. 5. Графики коэффициентов корреляции высоты геопотенциальной поверхности 10 гПа вдоль различных широтных кругов с колебаниями высоты геопотенциальной поверхности 10 гПа в точках 55 ° с.ш., 108 ° в.д. (верхний рисунок) и 55 ° с.ш., 30 ° з.д. (нижний рисунок), построенные со сдвигами во времени от -9 до +6 суток (графики сверху вниз). Период осреднения 1980–1990 гг. Толстая линия соответствует нулевому сдвигу во времени

Тропосфера. В тропосфере колебания в рассматриваемом диапазоне частот имеют более сложную пространственную структуру, чем в стратосфере. В структуре колебаний можно видеть особенности, характерные как для синоптических вихрей, перемещающихся в ведущем потоке, так и для низкочастотных возмущений, обусловленных баротропной неустойчивостью. Показательными в этом отношении являются колебания над Северной Атлантикой и Азиатским континентом. Будем называть эти колебания условно Атлантической и Азиатской модами.

Атлантическая мода. Рассмотрим пространственную структуру Атлантической моды. На рис. 6 приведены распределения коэффициентов корреляции зональной скорости, рассчитанные относительно вариаций в точке 55 ° с.ш., 30 ° з.д. на уровне 500 гПа в цилиндрической проекции. Видно, что колебания над Северной Атлантикой имеют квазидипольную структуру и происходят с периодичностью примерно 15–20 суток. Географическое положение полюсов

почти не меняется со временем. Через 4–6 суток после очередного максимума аномалии зональной скорости ослабевают, а затем меняют знак. Картина напоминает Северо-Атлантическое колебание (САК) и в какой-то степени East Atlantic Pattern (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>). Структуры подобного типа связывают с областями выходов струйных течений и объясняют колебаниями интенсивности или меандрированием струйного течения [6]. Можно видеть некоторое сходство между распределением аномалий и пространственной структурой наиболее неустойчивой стационарной баротропной моды среднего климатического поля скорости на уровне 300 гПа [1]. Так как в возмущениях поля скорости преобладает зональная компонента, накачка энергии возмущений происходит, видимо, в области выхода струйного течения. Возмущения, имеющие квазидипольную структуру с фиксированным в пространстве положением полюсов и периодичностью смены знака примерно 15–20 суток характерны также для области выхода струйного течения в северной части Тихого океана (иллюстрации не приводятся).

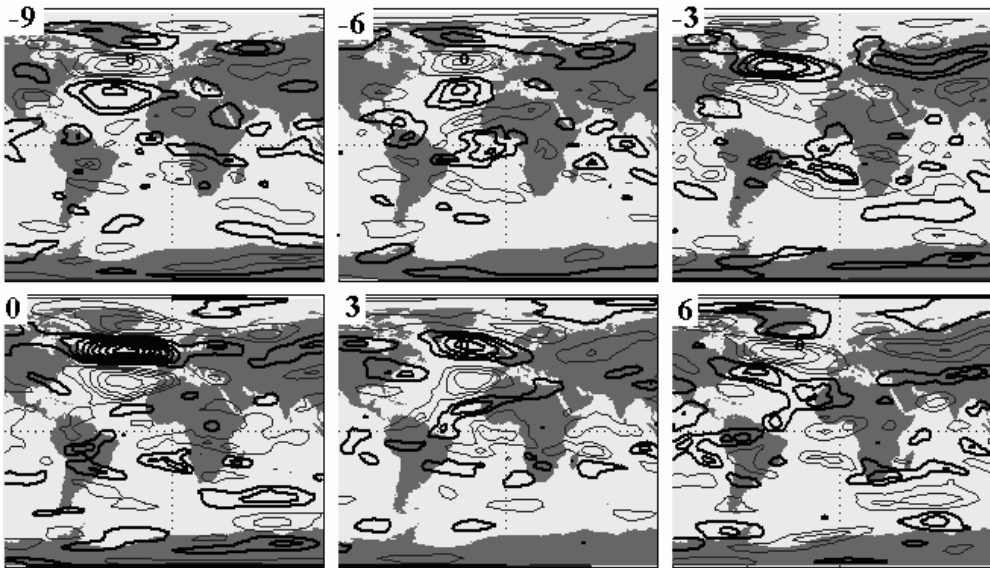


Рис. 6. Пространственная структура колебаний зональной скорости на уровне 500 гПа, рассчитанная за период с 1980 по 1990 г. относительно точки с координатами 55° с.ш., 30° з.д. в цилиндрической проекции. Нанесены изолинии коэффициентов корреляции вариаций зональной скорости, рассчитанных для интервала 15 января – 15 марта со сдвигом во времени от –9 суток до +6 суток

Динамика аномалий напоминает развитие волнового цуга от реперной точки в направлении на юго-юго-восток. При этом узлы волновой картины остаются фиксированными, а знак аномалий меняется с периодом 15–20 суток. Через несколько дней цуг волн достигает экватора, видны даже признаки распространения возмущений в Южное полушарие, что достаточно неожиданно, учитывая

преобладание в тропиках восточных ветров. В барическом поле колебания развиваются похожим образом.

Азиатская мода. Развитие аномалий в азиатском секторе протекает иначе, чем над Северной Атлантикой. На рис. 7 представлены распределения аномалий изокоррелят зональной скорости в горизонтальной проекции, рассчитанные относительно точки с координатами 55° с.ш., 108° в.д. Хорошо видно формирование цугов знакопеременных аномалий в направлении на юго-восток от реперной точки, примерно так же, как и в атлантическом секторе. Однако, в отличие от Атлантики, в Азиатском регионе вдоль траектории волнового цуга распространяется не только действие, но и сами аномалии. Период колебаний так же, как и в Атлантике составляет около 15–20 суток. Бегущие волны характерны и для Северной Америки, при этом динамика аномалий над континентом оказывается согласованной с динамикой низкочастотных тропических возмущений, распространяющихся вдоль экватора с востока на запад. На различия в динамике низкочастотных возмущений над Северной Атлантикой – севером Тихого океана (географическая фиксированность аномалий) и Евразией – Северной Америкой (бегущие волны) обращалось внимание еще в работе [6].

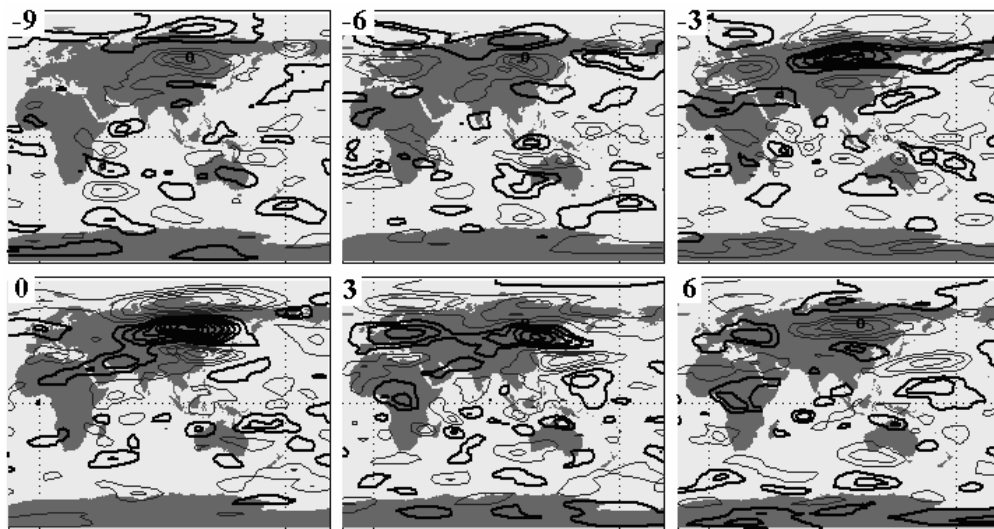


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но распределения изокоррелят рассчитаны относительно точки с координатами 55° с.ш., 108° в.д.

Цуг волн в восточной части Азии является главной, но не единственной особенностью Азиатской моды. К западу от полюса корреляции над Северной Атлантикой, Европой и Северной Африкой формируется еще одна цепочка аномалий. Максимальную амплитуду в этом цуге имеет аномалия над Европой. Двумерные волны Россби от орографического источника, распространяющиеся в западном потоке, такой особенности не имеют. Возможно, ее появление свя-

зано с отражением и интерференцией волн от линии нулевого ветра в тропиках. Это предположение несложно проверить на модельных расчетах.

В Азиатском регионе, так же, как и в Атлантическом секторе, колебания в поле зональной скорости и в барическом поле развиваются похожим образом (рисунки для барического поля не приведены), что говорит о преобладании в колебаниях геострофической составляющей. При этом признаки возмущений в поле давления в низких широтах видны даже несколько лучше, чем в поле скорости.

Заключение

В работе исследованы условия генерации и распространения низкочастотных атмосферных возмущений, ответственных за возбуждение крутильных колебаний. Крутильные колебания могут возникать в полярной области и пересекать экватор, участвуя таким образом в формировании дальних связей. Для исследования пространственной структуры и динамики крупномасштабных возмущений в атмосфере, ответственных за крутильные колебания, использован метод одноточечных корреляций со сдвигом во времени, с помощью которого обрабатывались распределения суточных значений зональной скорости и высоты изобарических поверхностей по данным NCEP/NCAR Reanalysis.

По результатам обработки в стратосфере выделены три типа возмущений – аномалии, перемещающиеся с востока на запад над Евразией – Тихим океаном (компонента 1), аномалии, перемещающиеся с запада на восток над Северной Америкой – Атлантикой (компонента 3), а также спиральные конфигурации, развивающиеся над Евразией – компонента 2. Амплитуды компонент максимальны в умеренных и высоких широтах и убывают в тропиках. Компонента 1 близка по свойствам нормальной моде Y_4^1 , имеющей период 28.08 суток.

Структура и динамика возмущений в тропосфере оказывается различной в разных частях Северного полушария. Для Северной Атлантики и северной части Тихого океана характерны возмущения, имеющие квазидипольную структуру с фиксированным в пространстве положением узлов и периодичностью смены знака аномалий примерно через 15–20 суток. Над восточной частью Евразии и Северной Америкой выделяются бегущие возмущения, пересекающие восточную часть континентов с северо-запада на юго-восток. При этом динамика аномалий над Северной Америкой оказывается согласованной с динамикой низкоширотных возмущений, а в распределениях аномалий над Азией устойчиво проявляется волновой цуг к западу от реперной точки.

Литература

1. Дымников В.П., Филатов А.Н. Устойчивость крупномасштабных атмосферных процессов. – М.: Отд. вычислит. математики АН СССР, 1988. – 140 с.
2. Монин А.С., Полубаринова-Кочина П.Я., Хлебников В.И. Космология, гидродинамика, турбулентность. – М.: Наука, 1989. – 325 с.

3. Мордвинов В.И., Иванова А.С., Девятова Е.В. Возбуждение арктической осцилляции крутильными колебаниями // Оптика атмосферы и океана, 2009, 22, № 2, с. 1-8.
4. Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями. – Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2007, т. 43, № 4, с. 28-40.
5. Уоллес Дж., Блэкмон М., Наблюдаемая низкочастотная изменчивость атмосферы. – В кн.: Крупномасштабные динамические процессы в атмосфере. – М: Мир, 1988, с. 66-109.
6. Blackmon M.L., Lee Y.-H., Wallace J.M. Horizontal structure of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales. – J. Atmos. Sci., 1984, V. 41, № 6, pp. 961-979.
7. Blackmon M.L., Lee Y.-H., Wallace J.M., Hsu H.-H. Time variation of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales as deduced from Lag-correlation statistics. J. Atmos. Sci., 1984, V. 41, № 6, pp. 981-991.
8. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. – Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, V. 77, pp.437-471.
9. Longuet-Higgins M. S. The eigenfunctions of Laplace's tidal equation over a sphere. – Philos. Trans. R. Soc. London, 1968, V. 262, pp. 511-607.
10. Madden R. A. Large-scale, free Rossby waves in the atmosphere – an update. – Tellus, 2007, 59A, pp. 571-590.
11. Namias J. Teleconnections of 700 mb height anomalies for the Northern Hemisphere. – California Oceanic Fisheries Investigations (CALCOFI) Atlas, Marine Life Research Group, Scripps Institution of Oceanography, 1981, № 29, 265 p.
12. Sawyer J.S. Observational characteristics of atmospheric fluctuations with a time scale of a month. – Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1970, V. 96, pp. 610-625.
13. Volland H. Atmospheric Tidal and Planetary Waves. – Kluwer Academic Publ., Dordrecht, Netherland, 1988, 348 p.
14. Walker G.T., and E.W. Bliss. World Weather V. – Met. Roy. Meteor. Soc., 1932, № 4, p. 53-84.
15. Wallace J.M., Gutzler D.S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. – Mon. Wea. Rev., 1981, V. 109, pp. 785-812.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0742).