

## ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ВИХРЕВОЙ АКТИВНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Е.В. Девятова, П.Г. Ковадло, В.И. Мордвинов

## LONG-TERM VARIATIONS OF VORTEX ACTIVITY IN THE ATMOSPHERE

E.V. Devyatova, P.G. Kovadlo, V.I. Mordvinov

Вихревая и волновая активность в тропосфере является, с одной стороны, важным фактором климатических и погодных изменений, а с другой – источником возмущений в более высоких слоях атмосферы. Примером таких возмущений являются внезапные стратосферные потепления, связанные с крупномасштабными аномалиями циркуляции в стратосфере и мезосфере. Причиной аномалий циркуляции являются длинные планетарные волны, распространяющиеся из тропосферы в верхние слои атмосферы. Неустойчивости циркуляции атмосферы могут играть определенную роль и в качестве промежуточного звена гелиогеофизического воздействия на погоду и климат.

Данные архива NCEP/NCAR Reanalysis показывают быстрый рост вихревой активности начиная с 70-х гг. 20-го столетия. Особенно сильные изменения происходят в Южном полушарии, причем на квазидекадных масштабах времени, характерных для внешних воздействий. Взаимные корреляции вихревой активности в разных полушариях в отдельные месяцы в некоторых районах имеют достаточно высокий уровень, указывающий либо на глобальное внешнее влияние, либо на существование активных межполушарных взаимодействий.

Рост вихревой активности, безусловно, отразится на режимах погоды в различных районах земного шара, возмущенности верхних слоев атмосферы, количестве стратосферных потеплений, изменении газового и аэрозольного состава верхних слоев атмосферы, оптической неустойчивости атмосферы. Для прогноза этих изменений необходимы дальнейшие исследования закономерностей динамики вихревой активности атмосферы.

Vortex and wave activity in the troposphere is, on the one hand, a main factor of climatic and weather changes and, on the other, a source of disturbances in higher layers of the atmosphere. Sudden stratospheric warmings related with large-scale anomalies in the stratosphere and mesosphere are the examples of such distributions. The circulation anomalies are caused by long planetary waves that propagate from the troposphere to upper atmospheric layers. Atmospheric circulation inhomogeneities may also play a certain role as an intermediate of heliogeophysical influence on weather and climate.

Data from the archive NCEP/NCAR Reanalysis show a rapid increase in the vortex activity starting in the 1970s of the 20 century. The greatest changes occur in the Southern Hemisphere on quasi-decade time scales typical for external actions. Intercorrelations between vortex activities in different hemispheres in some regions in certain months are of sufficiently high level indicating either the global external influence or the presence of active interhemispheric interactions.

The increase in vortex activity will certainly influence weather conditions in different areas of the Earth, disturbance of upper atmospheric layers, amount of stratospheric warmings, variations in gas and aerosol content of the upper atmosphere, and optical instability of the atmosphere. The forecast of these changes requires further investigations into regularities of the dynamics of vortex activity in the atmosphere.

### Введение

До 20-х гг. прошлого столетия считалось, что вихри в атмосфере Земли представляют собой вторичную, менее важную часть циркуляции атмосферы. Одним из первых на важную роль вихрей в переносе тепла обратил внимание Дефант [1], а затем было высказано предположение, что вихри могут быть важны и в меридиональном переносе зонального момента количества движения [2]. Дальнейшие исследования показали, что вихревые переносы тепла, количества движения, термодинамически активных примесей сопоставимы с их переносами крупномасштабными течениями и играют важную роль в формировании общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Взаимодействие течений с высокими горными массивами, бароклинная и баротропная неустойчивости, собственные моды колебаний ОЦА порождают вертикально распространяющиеся гравитационные волны и волны Россби. Зимой эти волны свободно проникают в стратосферу, разрушают полярный вихрь и инициируют стратосферные потепления. Аномалии циркуляции атмосферы в период внезапных стратосферных потеплений охватывают не только стратосферу, но и мезосферу.

Как показали исследования Мустеля с соавторами [3], неустойчивость циркуляции в тропосфере может быть связана с геомагнитной активностью. Согласно полученным результатам, дисперсия суточных разностей приземного атмосферного давле-

ния значимо возрастает на третий день после реперных моментов, соответствующих спорадическим и рекуррентным геомагнитным возмущениям в умеренных широтах Северного полушария. В этом случае волновая и вихревая активность могут выполнять роль промежуточного звена в гелиогеофизическом воздействии на климатическую систему. Прямые наблюдательные данные по средней приземной температуре в последнем столетии, косвенные данные за предыдущие 200–300 лет свидетельствуют в пользу данного предположения [4, 5]. Однако механизм влияния неясен, поэтому любые особенности климатических вариаций или вариаций ОЦА, которые могли бы пролить свет на характер этой связи, имеют несомненную ценность.

Одним из независимых подтверждений внешнего влияния является установление корреляционной связи между циркуляционными процессами в различных полушариях, особенно на высоких широтах, где вероятность воздействия гелиогеофизических процессов существенно выше. Этому условию автоматически удовлетворяет суммарная вихревая активность циркуляции атмосферы Северного и Южного полушарий, так как наибольший вклад в эту характеристику вносят области высоких широт, где вариации приземного барического поля примерно на порядок превышают вариации давления в тропиках. В Северном полушарии такими районами являются Северная Атлантика и Арктика, в Южном – Циркуман-

тарктическая депрессия. Детальные исследования изменений суммарной вихревой активности ранее не проводились, частично из-за отсутствия унифицированных рядов наблюдательных данных. С появлением архивов NCEP/NCAR Reanalysis решение такой задачи становится возможным и актуальным, учитывая важность проблемы климатических изменений и солнечно-атмосферных связей.

### Данные

Так как циркуляция атмосферы приблизительно геострофична, поле скорости можно выразить через распределения давления или функции тока. Удобной для расчетов и достаточно полной характеристикой вихревой активности в умеренных широтах оказывается временная изменчивость этих величин, оцениваемая по дисперсии суточных значений приземного давления или геопотенциала. Авторы [6] назвали эту характеристику вихревым индексом и рассчитали для поверхности 500 гПа. Мы считаем более правильным использовать для оценки вихревого индекса изменчивость приземного барического поля, так как большая часть возмущений возникает именно в нижней тропосфере. Поведение индекса здесь легче интерпретировать. Для расчета индекса вихревой активности мы использовали среднесуточные данные о распределении приземного барического поля архива NCEP/NCAR Reanalysis [7] с 1948 по 2006 г. Эти данные имеют пространственное разрешение  $2.5 \times 2.5^\circ$  и используются в исследовательских целях без каких-либо ограничений.

Кроме выбора уровня в атмосфере, имеет значение выбор интервала времени, за который производится оценка дисперсии барического поля, а также характер предварительной обработки данных. Исходные ряды содержат как синоптическую, так и низкочастотную изменчивости, различающиеся пространственно-временной структурой. При исследовании механизмов неустойчивости это может создавать определенные трудности, поэтому часто пытаются исключить либо ту, либо другую компоненту, используя, например, скользящее усреднение. Обычно в качестве характерного масштаба разделения компонент принимают 7–10 сут. Однако этот критерий весьма приблизительный, и, если исследование не акцентировано на поиске механизмов изменчивости, предварительная фильтрация может не облегчить, а усложнить анализ. Важнее исключить сезонную составляющую, амплитуда которой почти всегда велика. Эта задача решается автоматически, если при оценке дисперсии используются месячные интервалы времени.

При расчетах глобальных и полушарных характеристик вихревой активности дисперсии суточных значений приземного давления во всех точках сетки  $2.5 \times 2.5^\circ$  суммировались с весовыми множителями  $h = \cos \varphi$ , учитывающими неравномерный шаг сетки вдоль параллелей. Индексы вихревой активности оценивались для всей Земли в целом, а также для Северного и Южного полушарий в отдельности.

### Изменения глобальной возмущенности барического поля

На рис. 1 тонкими линиями нанесены графики просуммированных по всему земному шару диспер-

сий среднесуточных значений приземного давления для всех месяцев года. Значения дисперсий нормированы на максимальную величину вихревого индекса. Для удобства сопоставления графики смещены по вертикальной оси. Толстыми линиями нанесены кривые, сглаженные по семи точкам. Длина вертикальных отрезков в левой части рисунков соответствует среднеквадратичному отклонению (СКО) флуктуаций суммарной вихревой активности относительно сглаженных кривых. Сопоставление СКО с

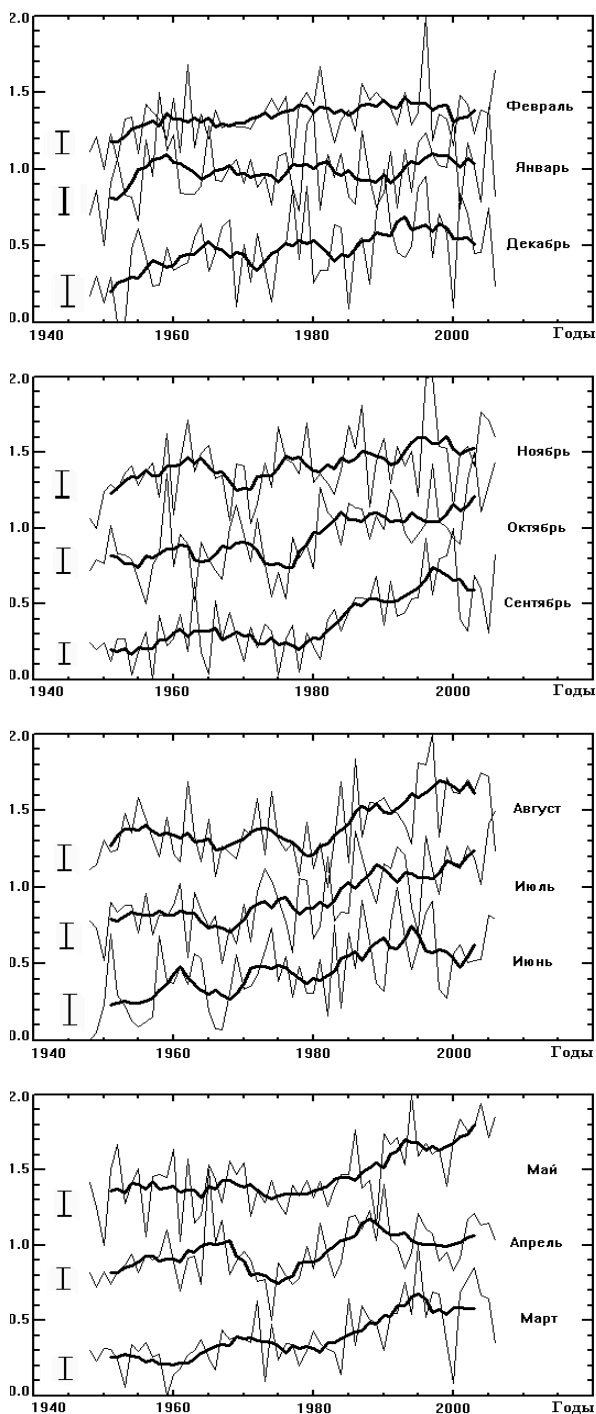


Рис. 1. Графики изменений суммарной вихревой активности (в относительных единицах) в различные месяцы. Толстыми линиями нанесены графики, сглаженные по семи точкам. Длина вертикальных отрезков в левой части рисунков соответствует среднеквадратичному отклонению (СКО) флуктуаций от сглаженных кривых.

амплитудами долговременных изменений позволяет примерно оценить достоверность этих изменений.

Можно видеть, что в целом за исследуемый период произошло заметное увеличение глобальной возмущенности барического поля. Возрастание вихревой активности наблюдалось практически во все месяцы, однако наибольший рост характерен для июня, июля, августа и переходных сезонов. Так как в июне, июле и августе существенно возрастает синоптическая активность в Южном полушарии, мы предположили, что именно Южное полушарие обеспечило долговременный рост возмущенности барического поля.

Для проверки этого предположения дисперсии среднесуточных значений приземного барического поля были просуммированы для Южного и Северного полушарий отдельно. На рис. 2 и 3 толстой линией нанесены графики вихревого индекса для Северного полушария, тонкой линией – для Южного. Графики не нормированы, что позволяет сопоставлять не только относительные, но и абсолютные значения суммарного индекса вихревой активности. В июне, июле и августе в Южном полушарии средний уровень и амплитуда вариаций суммарной вихревой активности значительно выше, чем в Северном (рис. 2), поэтому, как мы и предполагали, наблюдаемый рост глобальной возмущенности барического поля был обусловлен главным образом изменениями, происходившими в Южном полушарии. В декабре, январе и феврале суммарная вихревая активность в Северном полушарии выше, чем в Южном (рис. 3). Однако и в этот период уровень и амплитуда вариаций вихревой активности в Южном полушарии все же остаются достаточно высокими. К тому же здесь довольно хорошо выделяются долговременные изменения суммарной вихревой активности. И именно эти изменения дают основной вклад в общий рост вихревой активности (рис. 1). Таким образом, во все сезоны года основной причиной роста глобальной вихревой активности является возрастание активности циркуляционных процессов Южного полушария. Выделяются июнь, июль и август, когда амплитуда трендовой составляющей особенно велика из-за сезонного возрастания активности циркуляции в Южном полушарии.

В переходные сезоны года значения индексов суммарной вихревой активности в разных полушариях близки по величине. Это облегчает визуальный анализ и сопоставление графиков (рис. 2, 3). Видно, что в некоторые месяцы (октябрь, ноябрь, апрель) вариации вихревых индексов в обоих полушариях довольно похожи на масштабах времени около десяти лет и отчасти на межгодовых интервалах. Это может быть косвенным свидетельством в пользу гипотезы внешнего воздействия на климатическую систему, например, вследствие вариаций геомагнитной активности. Однако для того, чтобы подтвердить этот вывод, необходимы специальное исследование и дополнительные данные, так как имеющегося количества точек недостаточно для статистики. В том, что признаки глобальных изменений лучше проявляются в переходные сезоны года, нет ничего неожиданного. Действительно, в эти периоды меньше термические контрасты между континен-

тами и океанами, а также между высокими и низкими широтами, следовательно, меньше муссонные эффекты и сезонные эффекты возрастания вихревой активности, на фоне которых сложно выделить глобальные изменения и межполушарные взаимодействия.

Для июня, июля, августа и переходных сезонов более отчетливо выделяются также признаки изменения режима ОЦА в середине 70-х гг. Рисунки 2 и 3 указывают на то, что климатический «сдвиг» имел глобальный характер. Видно, что до середины 70-х гг. квазидесятилетние вариации суммарной вихревой активности преобладали над внутривековыми, в более поздний период возросла амплитуда долговременных, возможно, трендовых изменений. К сожалению, уровень межгодовых флуктуаций слишком высок для уверенных выводов относительно характера долговременных изменений, тем более что до начала спутниковых наблюдений в конце 70-х гг. сеть наблюдательных станций во многих районах, особенно в высоких широтах Южного полушария, была слишком редкой. Существуют, однако, и другие подтверждения климатического «сдвига» в середине 70-х гг. [8].

#### **Пространственная структура глобальных вариаций возмущенности барического поля**

Представляется интересным выделить районы, обеспечивших наибольший вклад в изменения интегральных характеристик вихревой активности атмосферы. Для решения этой задачи были построены поля коэффициентов корреляции между вариациями суммарных дисперсий приземного давления Северного и Южного полушарий и изменениями вихревого индекса в узлах сетки  $2.5 \times 2.5^\circ$ . На рис. 4 приведен пример построенной карты изокоррелят для января. Нормирование графиков при расчете коэффициентов корреляции позволило убрать различия в уровне и амплитуде вариаций и сделать удобным анализ характера и согласованности изменений дисперсии давления в обоих полушариях.

Как и ожидалось, большой вклад в суммарную дисперсию дают высокоширотные области и зоны умеренных широт как Северного, так и Южного полушария. Особенно отчетливо это видно в Южном полушарии. Однако высокими оказались коэффициенты корреляции и в некоторых низкоширотных областях. Для Северного полушария это умеренные и субтропические широты Тихого океана вблизи линии перемены дат, Центральная Атлантика, тропики Южной Америки, Южная Африка. Для Южного полушария неожиданной оказалась связь с тропиками Тихого океана, хотя уровень корреляции не очень высок. Ни один из перечисленных районов не выделяется высоким уровнем вихревой активности. Вероятно, эти районы связаны какими-то особенностями общей циркуляции атмосферы, характерными для межгодовых флуктуаций. С учетом существования крупномасштабных мод межгодовой изменчивости циркуляции, эта гипотеза представляется вполне реальной.

Пространственные распределения коэффициентов корреляции, аналогичные рис. 4, были построены и

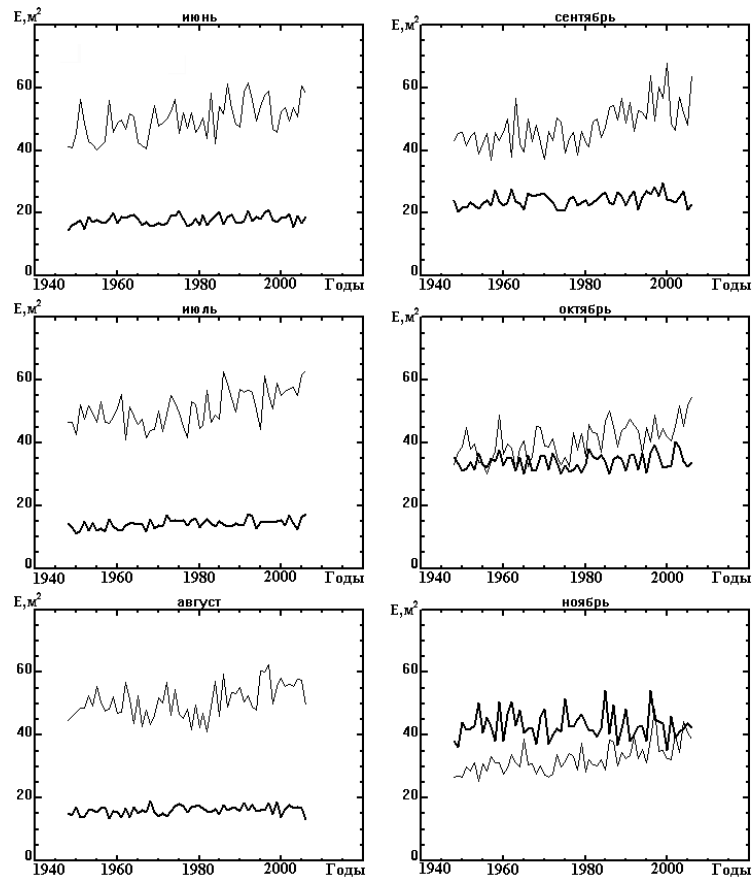


Рис. 2. Графики изменений суммарной вихревой активности (июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь). Толстая линия – Северное полушарие. Тонкая линия – Южное полушарие.

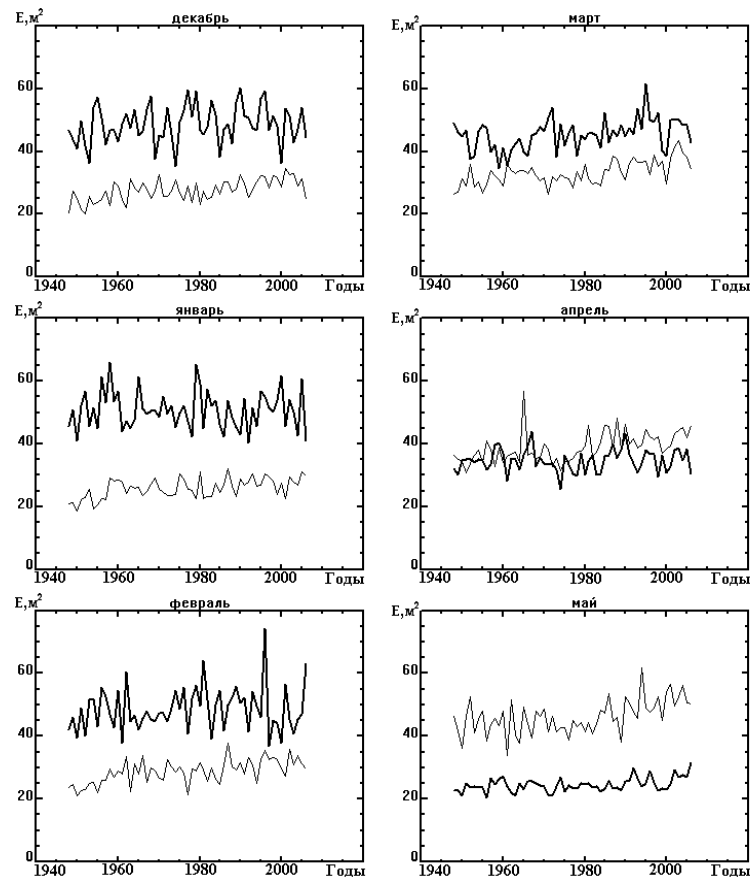


Рис. 3. То же, что на рис. 2, за декабрь, январь, февраль, март, апрель, май.

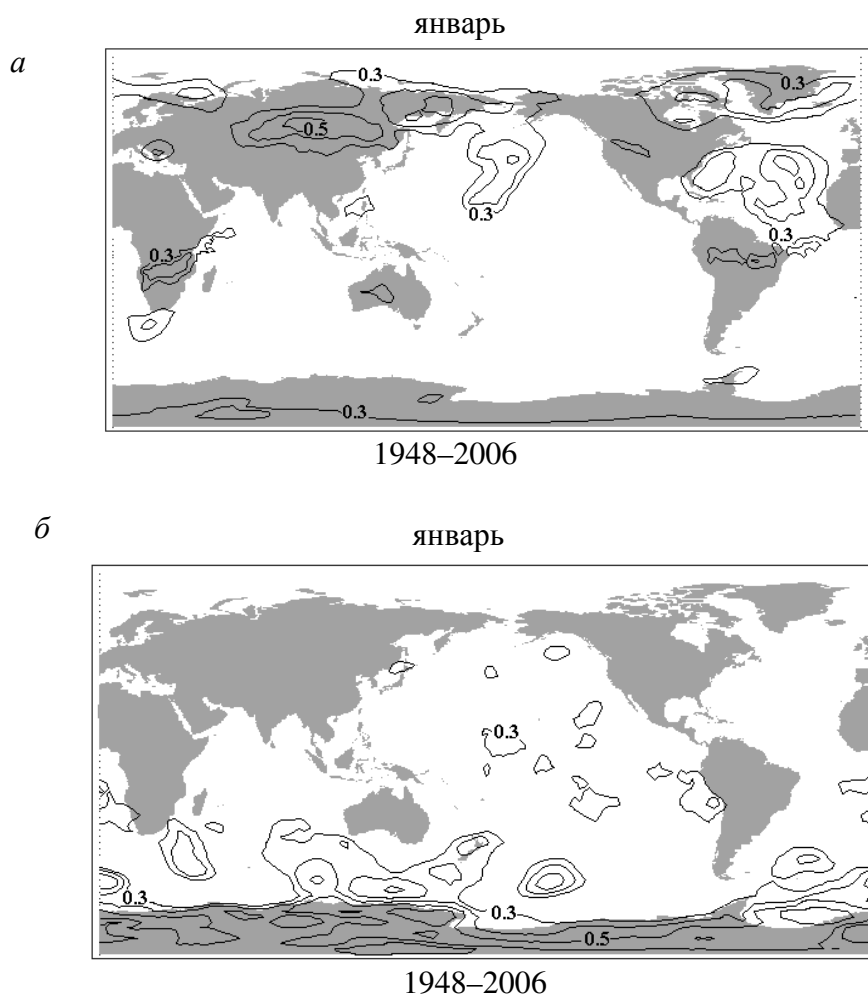


Рис. 4. Распределения коэффициентов корреляции между вариациями суммарной вихревой активности в Северном (*a*) и Южном (*б*) полушариях и вариациями вихревой активности в узлах сетки для января.

для других месяцев года. Различия между ними оказались довольно значительными. К сожалению, динамика общей циркуляции атмосферы, тем более динамика вихревой активности, пока еще слабо изучена. Поэтому особенности связей в разных регионах, их сезонные изменения и изменения на более длительных интервалах времени можно описать пока лишь с привлечением общих и недостаточно определенных терминов, особенно в переходные сезоны, когда муссонные циркуляции еще не сформировались и крупномасштабная циркуляция атмосферы неустойчива. Эта неопределенность объясняет, почему при анализе предпочтение отдается центральным летним и зимним месяцам.

#### Квазидекадные и межгодовые вариации вихревой активности

Временные ряды индекса вихревой активности можно представить в виде суперпозиции квазидекадных и межгодовых вариаций. Природа тех и других, скорее всего, различна. Кратковременные флуктуации, вероятно, обусловлены собственными колебаниями ОЦА, а более продолжительные могут

быть связаны с изменчивостью внешних факторов – гелиогеофизической активностью, вариациями температуры поверхности океанов и т. д. Дальние связи, проявившиеся на рис. 4, могут быть обусловлены как теми, так и другими. Выяснение механизма их формирования, безусловно, представляет интерес, так как может пролить свет на природу глобальной изменчивости циркуляции.

Для ответа на данный вопрос были построены корреляционные поля для каждой из составляющих вариаций вихревого индекса. Разделение на компоненты было выполнено с помощью скользящего усреднения временных рядов по пяти точкам. К сожалению, из-за небольшой продолжительности рядов результаты анализа носят скорее качественный, чем количественный характер.

На рис. 5 и 6 приведены поля коэффициентов корреляций изменений суммарной вихревой активности с динамикой вихревой активности для каждой из компонент в январе. Сопоставление рис. 5 и 6 с рис. 4 показало следующее. В Северном полушарии преобладающие дальние связи вихревой активности больше соответствовали картине связей, обусловленной межгодовыми флуктуациями. Для сглаженной

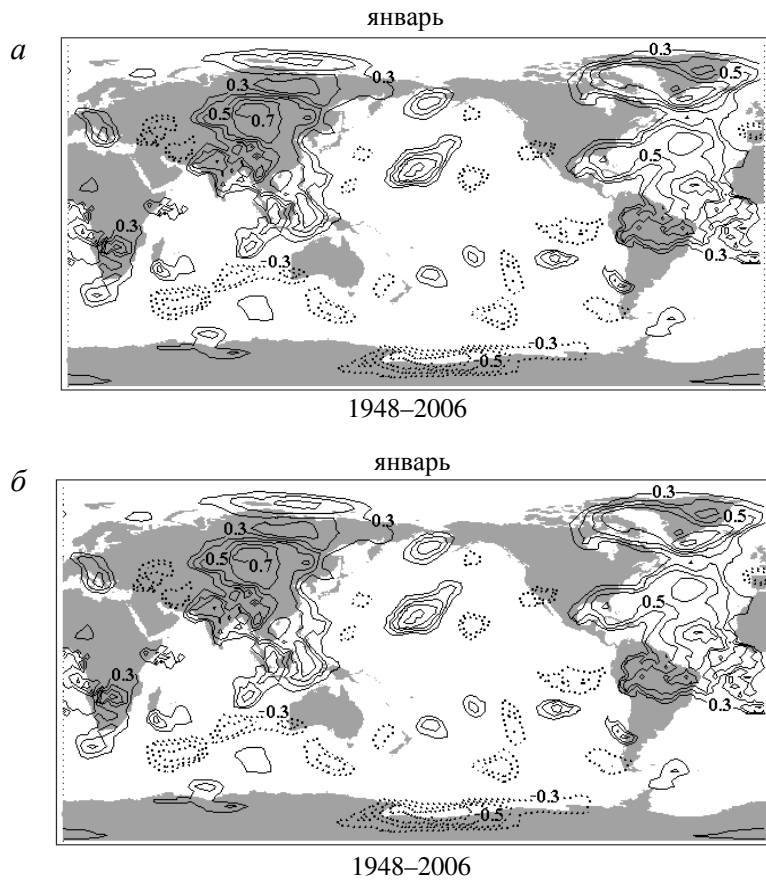


Рис. 5. Распределения коэффициентов корреляции между графиками квазидесятилетних вариаций суммарной вихревой активности в Северном (*а*) и Южном (*б*) полушариях и квазидекадными вариациями вихревой активности в узлах сетки для января.

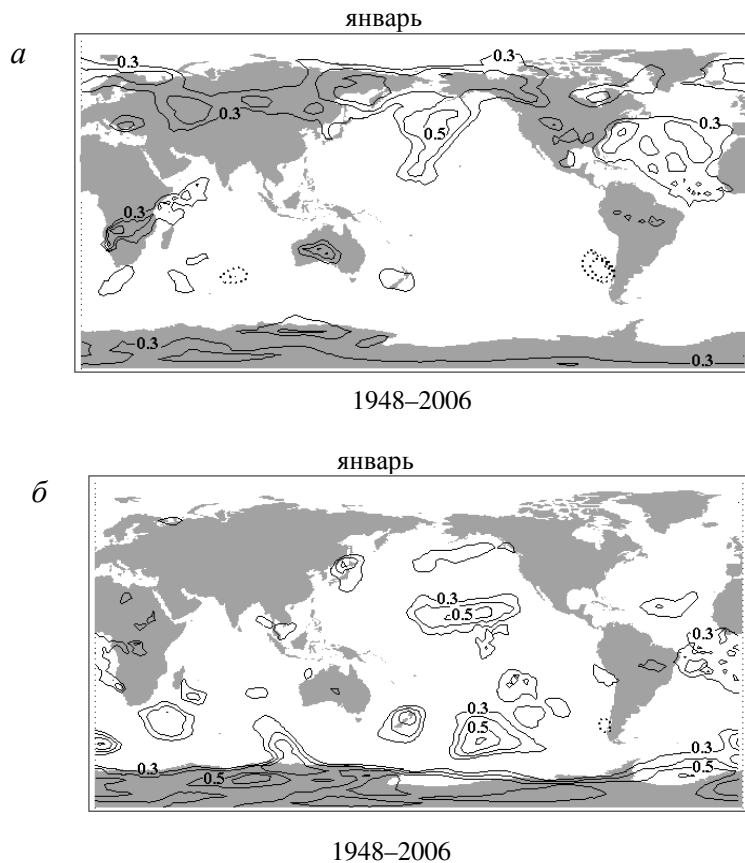


Рис. 6. Распределение коэффициентов корреляции между графиками межгодовых флуктуаций суммарной вихревой активности в Северном (*а*) и Южном (*б*) полушариях и межгодовыми вариациями вихревой активности в узлах сетки для января.

компоненты (рис. 5, а) значительно шире оказалась область положительных аномалий коэффициентов корреляции на Азиатском континенте. Кроме районов Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, она включает Юго-Восточную Азию, п-ов Индостан, восточную часть Индийского океана и Индонезию. Обращает на себя внимание довольно необычная полоса отрицательных значений коэффициентов корреляции вдоль тихоокеанского побережья Антарктиды.

В Южном полушарии, в отличие от Северного, аномалии изокоррелят суммарной вихревой активности были обусловлены, скорее всего, кваздекадными вариациями и трендовыми изменениями. Это хорошо видно на представленных рисунках. Возможно, это сезонный эффект, так как январь для Южного полушария – летний месяц. Тогда можно считать полученное различие косвенным указанием на то, что более интенсивная зимняя циркуляция имеет и более высокий относительный уровень межгодовой изменчивости. Но, возможно, различие обусловлено и другой причиной – разным характером циркуляции на севере и юге. В Северном полушарии большую роль играют муссонные циркуляции в тропиках и бароклинные вихри в умеренных широтах. В Южном полушарии сезонные изменения сглажены, а вихревая активность сосредоточена в значительной степени в Циркумантарктической депрессии.

Обращает на себя внимание следующая особенность. На рис. 5, б, соответствующем сглаженной компоненте вихревой активности, кроме областей положительной корреляции в тропиках Тихого океана, Антарктиде, умеренных широтах Тихого, Атлантического и Индийского океанов, появились две обширные области отрицательных аномалий. Одна охватывает Восточную, Юго-Восточную Азию и северную часть Индийского океана, другая – Центральную Атлантику и Северную Африку. Все эти области выделяются также при анализе трендов средних полей приземного давления, поэтому, скорее всего, отражают реальную циркуляционную связь, обусловленную, например, трансэкваториальным обменом масс [9].

Для сглаженных компонент области положительной корреляции с суммарной вихревой активностью Северного полушария и области отрицательной корреляции с суммарной возмущенностью Южного полушария совпадают над Юго-Восточной Азией и Центральной Атлантикой. Можно было бы предположить, что в этих районах кваздекадные январские вариации возмущенности барического поля двух полушарий согласованы и происходят в противофазе. Однако более детальный анализ показал, что высокий уровень корреляции вихревой активности в этих областях с суммарной возмущенностью Южного полушария обеспечивается в большей степени трендовой составляющей. Во второй половине двадцатого века вихревая активность над Азиатским континентом и Центральной Атлантикой в январе уменьшалась [10], тогда как в Южном полушарии суммарная возмущенность в этом месяце возрастала.

На корреляционных картах за другие месяцы года (рисунки в статье не приведены) также был выявлен ряд особенностей. На кваздекадных интервалах

выделились области высокой корреляции вихревой активности атмосферы в высоких и умеренных широтах одного полушария с суммарной вихревой активностью другого полушария. В отдельные месяцы абсолютные значения коэффициентов корреляции достигали 0.6–0.7. Например, в корреляционных полях суммарной возмущенности Южного полушария в разные месяцы устойчиво проявляется область отрицательной корреляции на востоке и юго-востоке Азиатского континента. Для суммарной вихревой активности Северного полушария в декабре, январе, феврале и марте выделяется область устойчивых аномалий изокоррелят вдоль тихоокеанского побережья Антарктиды. Существование таких межполушарных связей в какой-то степени подтверждает гипотезу внешнего воздействия на циркуляцию атмосферы, хотя можно предложить и более простое объяснение – высокие значения коэффициентов корреляции в этих районах могут обеспечиваться одинаковым вкладом трендовой составляющей.

### Заключение

На основе данных NCEP/NCAR Reanalysis с 1948 по 2006 г. исследованы долговременные вариации суммарной вихревой активности атмосферы. Выделены районы, обеспечившие наибольший вклад в изменения интегральных вихревых индексов в Северном и Южном полушариях на различных временных масштабах.

С начала 70-х гг. произошло заметное увеличение глобальной возмущенности барического поля. Возрастание вихревой активности наблюдалось практически во все месяцы, однако наибольший рост был характерен для июня, июля, августа и переходных сезонов.

Сопоставление вариаций в Северном и Южном полушариях показало, что долговременный рост возмущенности барического поля обусловлен, в первую очередь, ростом вихревой активности Южного полушария.

В некоторые из месяцев (октябрь, ноябрь, апрель) вариации вихревой активности в обоих полушариях оказались похожими на масштабах времени около десяти лет и отчасти на межгодовых интервалах. Это является косвенным свидетельством в пользу гипотезы внешнего воздействия на климатическую систему, хотя возможны и другие объяснения, например, одинаковый характер трендов в этих областях.

Наибольший вклад в вихревую активность дают высокоширотные области и зоны умеренных широт как Северного, так и Южного полушария. Однако высокими оказались темпы роста вихревой активности и в некоторых низкоширотных областях (Центральная Атлантика, Южная Африка, тропики Южной Америки, центральные районы Тихого океана).

В январе в Северном полушарии долговременные изменения в большей степени определялись межгодовыми флуктуациями вихревой активности, а в Южном полушарии преобладали кваздекадная и трендовая составляющие.

Рост вихревой активности, безусловно, отразится на режимах погоды в различных районах земного шара и возмущенности верхних слоев атмосферы.

Можно ожидать увеличения количества стратосферных потеплений, особенно в Южном полушарии, усиления перемешивания и изменения газового и аэрозольного состава верхних слоев атмосферы. В некоторых районах может существенно возрасти оптическая нестабильность атмосферы, изменится астроклимат регионов. Для прогноза этих изменений необходимы дальнейшие исследования закономерностей динамики вихревой активности атмосферы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Defant A. Die Zirkulation der Atmosphäre in den gemässigten Breiten der Erde // *Geograf. Ann.* 1921. N 3. P. 209–266.
2. Jeffreys H. On the dynamics of geostrophic winds // *Q. J. R. met. Soc.* 1926. N 52. P. 85–104.
3. Мустель Э.Р. Физические процессы на звездах и на Солнце: Избранные труды. М.: Наука, 1991. 175 с.
4. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. М.: Наука; Интерпериодика, 2001. 350 с.
5. Mordvinov A.V., Makarenko N.G., Ogurtsov M.G., Jungner H. Reconstruction of magnetic activity of the Sun and changes in its irradiance on a millennial timescale using neurocomputing // *Solar Phys.* 2004. V. 224. P. 247–253.
6. Wallace J.M., Hsu H.-N. Low frequency fluctuations in zonal indices and stationary wave configurations // *J. Atmos. Sci.* 1983. V. 40. P. 2211–2219.
7. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–471.
8. Trenberth K.E. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1990. V. 71, N 7. P. 988–993.
9. Девятова Е.В., Мордвинов В.И., Иванова А.С. и др. Связь межгодовых вариаций приземного давления в Азии с явлением Эль-Ниньо и изменениями циркуляции в Южном полушарии // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18, № 8. С. 688–693.
10. Девятова Е.В., Мордвинов В.И., Иванова А.С. и др. Долговременные изменения вариаций приземного барического поля в Северном полушарии по данным NCEP/NCAR Reanalysis // *Современные проблемы экологии, природопользования и ресурсосбережения: Сб. научных статей*. Иркутск, 2004. С. 101–108.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*