

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-6-19>

УДК 551.5

Основные особенности и характеристики колебания Маддена-Джулиана по данным реанализа ERA5

Е.В. Набокова, И.А. Куликова, В.М. Хан

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
khan@mecom.ru*

Продемонстрированы ключевые структурные особенности колебания Маддена-Джулиана (КМД) в нижней и верхней тропосфере тропической зоны, обозначены проблемы, связанные с определением основных механизмов его формирования. Рассмотрены различные подходы к количественной оценке КМД. С использованием данных реанализа ERA5 полей зональной составляющей скорости ветра на уровне поверхностей 850 и 200 гПа, а также спутниковых наблюдений NCEP/NOAA за уходящей длинноволновой радиацией показаны основные недостатки и преимущества одного из возможных количественных критериев КМД (индекса RMM). Полученные результаты предполагается использовать в оперативной практике внутрисезонных метеорологических прогнозов СЕАКЦ.

Ключевые слова: колебание Маддена-Джулиана, индекс RMM, внутрисезонный прогноз

The main features and characteristics of the Madden-Julian Oscillation according to the ERA5 reanalysis

E.V. Nabokova, I.A. Kulikova, V.M. Khan

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
khan@mecom.ru*

The basic structural features of the Madden-Julian oscillation (MJO) in the lower and upper troposphere of the tropical zone are demonstrated. The problems associated with determining the main mechanisms of its formation are identified. Various approaches to the MJO quantification are considered. Using 850 and 200 hPa zonal wind speed from the ERA5 reanalysis datasets, as well as NCEP/NOAA satellite-derived data on outgoing longwave radiation, the main disadvantages and advantages are shown for one of the possible quantitative criteria of the MJO (RMM index). The results of the study are supposed to be operationally used in the NEACC's subseasonal meteorological forecasts.

Keywords: Madden-Julian Oscillation, RMM index, subseasonal forecast

Введение

Колебание Маддена-Джулиана (КМД) является одной из наиболее важных компонент внутрисезонной изменчивости в тропиках. С КМД связано перемещение в восточном направлении возмущений в полях конвективной облачности, осадков, ветра и давления с периодом 30–90 дней. В течение сезона может быть зафиксировано несколько событий КМД. Влияние КМД проявляется не только на погодных режимах в тропиках, но также на характере муссонной циркуляции в Азии и Австралии, изменчивости осадков вдоль западных берегов Северной и Южной Америки, в Африке, на формировании тропических циклонов над Тихим океаном и в Карибском бассейне. Известны связи КМД с приземной температурой воздуха в центральной и восточной частях Северной Америки, и даже в Арктике. В [14] было показано, что КМД может влиять на формирование погодных условий во внетропической зоне посредством воздействия на Арктическое колебание или Североатлантическое колебание. Авторы [6] обнаружили статистически значимую связь между КМД и формами атмосферной циркуляции, связанной с блокирующим антициклоном над Европой. В [31] представлено доказательства того, что некоторые экстремальные явления над Европой связаны с фазой КМД, распространяющейся над Тихим океаном. В русскоязычной литературе подробный обзор исследований, посвященных КМД и его влиянию на циркуляцию атмосферы во внетропических широтах Северного полушария, дается в работе Е.С. Нестерова [4]. В [1, 2] показано взаимодействие фаз КДК с циркуляционными процессами в стратосфере средних и полярных широт.

Оказывая влияния на погоду и климат за пределами тропической области, КМД является одним из основных источников долгосрочной предсказуемости атмосферы. Наличие связей КМД с явлением Эль-Ниньо-Южное колебание и другими модами изменчивости создает предпосылки для появления ситуаций с повышенной предсказуемостью на фоне естественной изменчивости состояния системы «атмосфера – деятельный слой подстилающей поверхности» [3].

Прогнозы КМД являются частью оперативной продукции многих мировых метеорологических центров. В соответствии с рекомендациями экспертов (CAS/WCRP Working Group on Numerical Experimentation (WGNE) and US-CLIVAR Madden-Julian Oscillation Working Group) в рамках Международной программы климатических исследований CLIVAR предприняты попытки сравнения результатов численного моделирования и прогнозирования КМД в различных метеорологических центрах как доминирующего режима изменчивости атмосферы в тропиках на внутрисезонных масштабах времени.

В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с различными подходами к количественной оценке и идентификации КМД. По данным реанализа ERA5 ЕЦСПП (Европейского центра среднесрочных прогнозов

погоды) [7] с использованием аппарата естественных ортогональных составляющих выделены основные моды изменчивости в полях зональной составляющей скорости ветра на уровне поверхностей 850 и 200 гПа, а также уходящей длинноволновой радиации в тропиках. Продемонстрированы основные недостатки и преимущества одного из возможных количественных критериев КМД – индекса RMM. Полученные результаты могут использоваться в оперативной практике внутрисезонных метеорологических прогнозов СЕАКЦ.

1. Внутрисезонная тропическая изменчивость

Значительная часть атмосферной изменчивости в тропиках на масштабах меньше сезона обусловлена подвижными возмущениями, перемещающимися параллельно экватору. Эти возмущения характеризуются временными масштабами от нескольких суток до сезона, то есть являются частью изменчивости внутрисезонного масштаба. В явлениях, относящихся к внутритропической изменчивости, как правило, выделяют следующие основные моды: так называемое колебание Маддена-Джулиана (КМД), которое характеризуется зональными волновыми числами от 1 до 3 [19, 20], и конвективно связанные экваториальные волны [35], а именно волна Кельвина и экваториальная волна Россби. Кроме того, в спектрах длинноволновой радиации обнаруживается присутствие возмущения типа тропической депрессии. В среднем на долю КМД приходится до 40 % изменчивости, на долю волн Кельвина – до 30 % и на долю экваториальных волн Россби – до 20 %.

2. Колебание Маддена-Джулиана

Колебание Маддена-Джулиана является доминирующей модой изменчивости тропической атмосферы с периодом 30–90 суток, обнаруженной Рональдом Мадденом и Полом Джулианом в 1970 году [18]. Оно представляет собой чередование областей усиленной и подавленной конвекции и имеет вид волны, распространяющейся в восточном направлении со скоростью около 5 м/с в Восточном полушарии и 10–15 м/с – в Западном. Пространственный масштаб колебания варьируется от 6 до 20 тыс. км. Наибольшая конвективная активность, связанная с колебанием, наблюдается над Индийским океаном и западной частью Тихого океана, где наиболее высокая температура поверхности океана. КМД не является периодичным явлением, скорость его распространения, интенсивность и длительность меняются от события к событию. Оно имеет сильную внутригодовую изменчивость и наиболее ярко выражено в зимний и весенний периоды [31].

Когерентный сигнал, связанный с КМД, проявляется во многих других метеорологических полях. С использованием данных об уходящей длинноволновой радиации и зональной составляющей ветра на уровне поверхностей 850 и 200 гПа в [25] представлена идеализированная трехмерная

структура колебания (рис. 1). В моменты активной конвекции над Индийским океаном и Индонезией впереди ячейки возникают аномальные восточные ветры, позади нее – аномальные западные ветры, формируя две антициклонические ячейки на востоке и две циклонические ячейки на западе. Потoki воздуха с обеих сторон направлены в сторону ячейки и формируют конвергенцию. В верхней тропосфере наблюдается обратная картина – циклоническая циркуляция на востоке и антициклоническая на западе, за счет чего возникает дивергенция потоков вокруг конвективной облачности. В большинстве случаев вихри в нижней тропосфере выражены слабее вихрей в верхней тропосфере. По мере продвижения колебания на восток на акваторию Тихого океана вихри ослабевают и становятся менее согласованными.

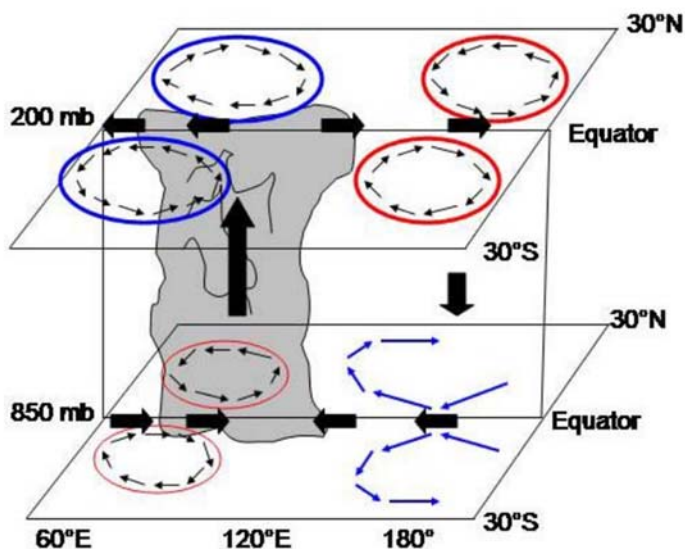


Рис. 1. Схематическое представление трехмерной структуры КМД. Синими овалами обозначена антициклоническая циркуляция, красными – циклоническая, черными стрелками – направление ветра и вертикальные движения воздуха [22].

Fig. 1. Schematic representation of the MJO's three-dimensional structure. Blue ovals indicate anticyclonic circulation, red ones – cyclonic, black arrows – wind direction and vertical air movements [22].

Взаимодействие между зональным ветром и ячейками конвекции является ключевым в динамике КМД. Представляя аномалии, как в поле ветра, так и в поле уходящей длинноволновой радиации, КМД может развиваться на фоне среднего зонального потока. Например, на востоке Индийского океана при наличии западного переноса западные аномалии ветра будут означать усиление западных экваториальных ветров, а восточные

аномалии ветра – их ослабление. В районах, где господствует восточный пассат, к западу от зоны усиленной конвекции будет наблюдаться ослабление пассата (западная аномалия ветра), а к востоку – усиление пассата (восточная аномалия ветра). В результате модификации среднего зонального потока создаются зоны конвергенции (дивергенции) воздуха, в которых в свою очередь возникают восходящие движения и усиливаются конвективные процессы (разрушается облачность и подавляется конвекция).

За последние годы в понимании динамики и механизмов формирования КМД, а также в его прогнозировании достигнут значительный прогресс. В этом контексте особое значение имеет оценка количественных критериев, позволяющих идентифицировать КМД и производить верификацию его прогнозов более строгим образом. Остановимся на этом вопросе более подробным образом.

3. Количественные критерии КМД

Наиболее распространенным на практике методом идентификации сигнала, связанного с КМД, является метод главных компонент, позволяющий уменьшить размерность исходных данных и выделить моды, объясняющие большую часть изменчивости тропической атмосферы. Вычисление главных компонент сводится либо к сингулярному разложению матрицы данных [33], либо, как это делается в большинстве случаев, к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной или корреляционной матрицы [9, 14, 27, 36 и др.]. Традиционно используются первые два собственных вектора, на которые приходится обычно около 30 % суммарной дисперсии, но существуют и другие индексы большей размерности [24]. Эти индексы используются в том числе и для исследования связи КМД с другими основными модами внутритропической изменчивости, а именно с конвективно-связанными экваториальными волнами [11, 34].

Принципиальным моментом в процессе расчета индексов является предварительная обработка начальных данных, обусловленная необходимостью отделения сигнала от искажающего его шума. В случае с КМД можно выделить два подхода: полосовая и высокочастотная фильтрация. Полосовая фильтрация полей начальных данных применяется в работах [8, 13, 14, 21, 22, 26]. Так, например, временные ряды уходящей длинноволновой радиации и зонального ветра подвергаются полосовой фильтрации с помощью фильтра Ланцоша, который позволяет сохранить почти всю дисперсию в пределах заданного окна [8]. В [16] предложена эмпирическая модель эволюции КМД, основанная на разложении по естественным ортогональным функциям полей уходящей длинноволновой радиации и функции тока на уровне поверхности 200 гПа с использованием высокочастотного фильтра. Показана сопоставимость результатов высокочастотной

фильтрации с другими статистическими схемами, в частности основанными на полосовой фильтрации. Подробный разбор индексов со сравнением дан в [10].

В последние годы широкое распространение на практике получили индексы, построенные без предварительной спектральной фильтрации исходных данных. Один из таких индексов – индекс RMM (Real-time Multivariate MJO index), ставший стандартом для мониторинга и прогноза состояния КМД, был разработан [34]. Модификацией последнего можно считать индекс VPM (Velocity Potential MJO index) [30], в расчетной схеме которого, построенной по аналогии с индексом RMM, вместо уходящей длинноволновой радиации используется меридионально осредненный потенциал скорости ветра на уровне поверхности 200 гПа. Последний, отражая планетарные аспекты атмосферной циркуляции, позволяет проследить влияние КМД за пределами тропиков.

4. Оценки и визуальное представление индекса RMM

В настоящей работе оценивалась возможность использования на практике индекса RMM в качестве количественного показателя КМД по методу [34], акцентируя внимание на его основных недостатках и преимуществах. Для решения поставленной задачи в качестве исходной информации использовались поля зональной составляющей скорости ветра на уровне поверхностей 850 и 200 гПа (реанализ ERA5) и уходящей длинноволновой радиации (спутниковые наблюдения NCEP/NOAA) за период с 1990 по 2021 год с пространственным разрешением $2.5 \times 2.5^\circ$ и суточным разрешением по времени. Процедура пространственно-временной фильтрации данных включала в себя следующие шаги: сглаживание с использованием пятидневного скользящего среднего; осреднение в пределах области 15° с. ш. – 15° ю. ш.; нормирование. Поправки на годовой ход и межгодовую изменчивость вводились в соответствии с рекомендациями экспертов (CAS/WCRP Working Group on Numerical Experimentation (WGNE) and US-CLIVAR Madden-Julian Oscillation Working Group). Для проведения дальнейшего анализа исходные поля длинноволновой радиации, зонального ветра на уровне поверхностей 850 и 200 гПа объединялись в один массив и представлялись в виде функции $AF(t, x)$, заданной в моменты времени t_j , $j = 1, \dots, n$ ($n=8418$ случаев) в точках долготы x_i , $i = 1, \dots, k$ ($k=432$).

$$AF(t_j, x_i) = \sum_{r=1}^k A_r(x_i) F_r(t_j)$$

где $A_r(x_i)$ – естественные ортогональные функции (ЕОФ), а $F_r(t_j)$ – коэффициенты разложения по ЕОФ, зависящие от времени. Заметим, что количество базисных функций не может превышать количество заданных точек.

На рис. 2 представлены первые две естественные ортогональные функции (EOF1 и EOF2 соответственно), объясняющие около 30 % суммарной дисперсии.

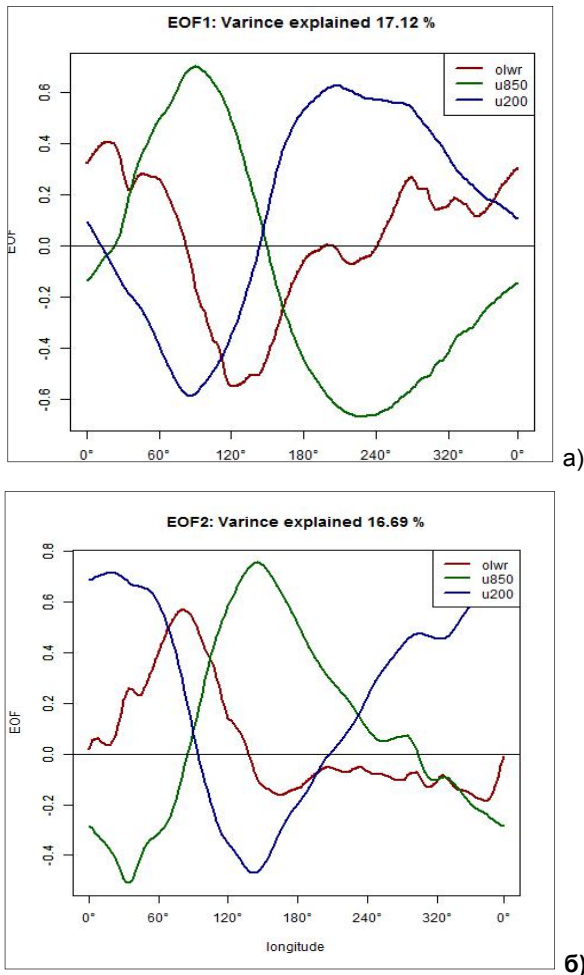


Рис. 2. Первый собственный вектор разложения (EOF1) (а); второй собственный вектор разложения (EOF2) (б). Красная кривая – уходящее длинноволновое излучение, синяя – зональная составляющая ветра на уровне поверхности 850 гПа, зеленая – зональная составляющая ветра на уровне поверхности 200 гПа.

Fig. 2. The first eigenvector (EOF1) (а); the second eigenvector (EOF2) (б). The red curve is the outgoing long–wave radiation, the blue is the zonal component of the wind at the 850 hPa level of, the green is the zonal component of the wind at the 200 hPa level.

Максимальные по абсолютной величине значения компонент на представленных кривых позволяют выделить регионы наибольшей изменчивости исходных переменных, определяющие процесс образования и развития КМД. Долготное распределение «кривой длинноволновой радиации» (красная кривая) позволяет выделить центры действия атмосферы, связанные с развитием конвекции. Для «активной» фазы колебания характерно интенсивное развитие конвекции в Африке и на западе Индийского океана за счет повышенной температуры континента и морской поверхности (максимальные положительные значения EOF1), к которой с востока примыкает зона подавленной конвекции (отрицательные значения EOF1), приходящая на территорию Индонезии и прилегающих островов (морской континент). Зоны активной и подавленной конвекции могут меняться местами (знак EOF1 при этом роли не играет). Более слабые максимумы прослеживаются над Южной Америкой и Атлантикой, где происходит регенерация колебания.

КМД представляет собой аномалию не только в полях уходящей длинноволновой радиации, но и в полях ветра. В нижней тропосфере – на уровне поверхности 850 гПа (на высоте порядка 1,5 км) и вблизи нее (синяя кривая) – к западу от крупномасштабного конвективного центра наблюдаются аномальные западные ветры, в то время как к востоку от него отмечается восточная аномалия ветра (смена знака EOF1 при переходе с запада на восток относительно красной кривой). Знак аномалий зонального ветра меняется в верхней тропосфере – на уровне поверхности 200 гПа (на высоте 13 км) (зеленая кривая). Зональная ячейка циркуляции, охватывающая почти всю тропосферу, объединяет между собой очаги активной и подавленной конвекции. При этом размеры циркуляционных ячеек значительно больше, чем конвективных, что связано с особенностями воздействия на атмосферу локальных источников тепла.

Вторая главная компонента EOF2 объясняет 16,7 % суммарной дисперсии (рис. 2б). Структура данной компоненты оказывается немного сдвинутой в восточном направлении относительно структуры EOF1 на акваторию Тихого океана.

Таким образом, индекс RMM отражает не только основные структурные особенности КМД, но и позволяет проследить взаимодействие полей ветра и ячеек конвекции. Количественные оценки КМД могут быть получены с использованием коэффициентов разложения $F_r(t_j)$, на основе которых можно вычислить амплитуду AM и фазу Ph колебания:

$$AM = \sqrt{F_1^2 + F_2^2},$$

$$Ph = \tan\left(\frac{F_2}{F_1}\right)^{-1}.$$

Полагают, что КМД с амплитудой $AM < 1$ – слабая осцилляция, с амплитудой $AM > 1$ – сильная осцилляция. У фазы Ph выделяется 8 уровней,

которые можно интерпретировать как тропические аналоги внетропических погодных режимов, а именно: фазы 2 и 3 ассоциируются с зоной активной конвекции над Индийским океаном, фазы 4 и 5 – над Морским Континентом, фазы 6 и 7 – на западе Тихого океана, фазы 8 и 1 – в Западном полушарии и над Африкой.

Преимущество данного индекса заключается в том, что крупномасштабные данные о циркуляции сглаживают сигнал, что позволяет избежать процедуры предварительной фильтрации, за исключением устранения сезонного цикла и межгодовой изменчивости, что удобно выполнять в режиме реального времени. Среди недостатков индекса – присутствие незначительных высокочастотных колебаний, не связанных с КМД, наличие неопределенности, возникающей из-за невозможности полного удаления межгодовой изменчивости из полей метеорологических величин, связанной с ЭНЮК, кроме того, не учитываются изменения КМД между фазами. Несмотря на имеющиеся ограничения, индекс RMM был использован во многих статистических исследованиях как структуры КМД, так и его воздействия на тропические циклоны [5, 12, 29], дальнюю циркуляцию, изменение траекторий тропических циклонов [23] и даже вспышки торнадо в США [28].

Стандартом визуального представления индекса RMM является отображение коэффициентов разложения F_1 и F_2 в двумерном фазовом пространстве (рис. 3). Как видно, в нашем примере с началом отсчета 25 января 1990 г. точка в данной системе координат совершает полный круг и возвращается в исходное положение примерно через 50 дней.

Заключение

КМД является доминирующей модой внутрисезонной тропической изменчивости и одним из важнейших источников долгосрочной предсказуемости атмосферы. Сигнал, связанный с КМД, наиболее четко прослеживается в полях уходящей длинноволновой радиации, а также зональной составляющей ветра на уровне поверхностей 850 и 200 гПа в пределах тропиков. Взаимодействие между зональным ветром и ячейками конвекции является ключевым в динамике КМД.

Информация о состоянии КМД является частью оперативной продукции мировых метеорологических центров (например, Национального метеорологического агентства США, Токийского климатического центра, Бюро метеорологии Австралии). При этом важную роль играют количественные критерии КМД (индексы). Наиболее распространенным на практике является индекс RMM, предложенный в [34]. В данной статье на конкретном примере с использованием реанализа ERA5 и данных спутниковых наблюдений NCEP/NOAA продемонстрированы основные преимущества и недостатки данного индекса, а также возможности его практического использования.

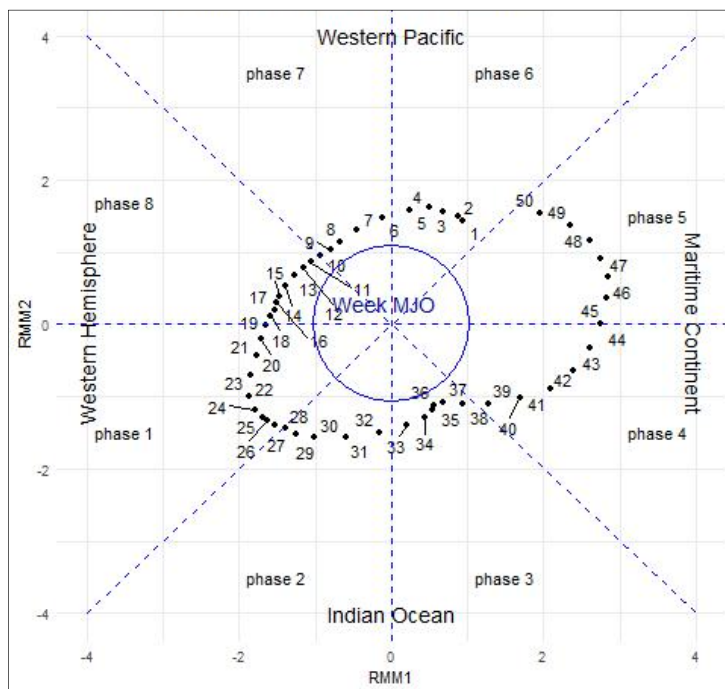


Рис. 3. Индекс колебания Маддена-Джулиана (RMM) на отрезке времени 50 дней, начиная с 25 января 1990 г.

Fig. 3. The Madden-Julian Oscillation Index (RMM) over a period of 50 days, starting from January 25, 1990.

Полученные результаты могут представлять интерес в контексте расширения спектра прогностической продукции, выпускаемой СЕАКЦ.

В заключении авторы выражают глубокую благодарность ведущему инженеру отдела долгосрочных прогнозов погоды А.В. Субботину за оказанную помощь в работе.

Работа выполнена в ФГБУ «Гидрометцентр России» при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Список литературы

1. Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И. Влияние осцилляции Маддена-Джулиана на интенсивность и структуру полярного вихря // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 50. С. 18-27.
2. Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И., Зоркальцева О.С., Мордвинов В.И. Влияние осцилляции Маддена-Джулиана и квазидвухлетнего колебания на динамику вне-тропической стратосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2019. Том 59, № 1. С. 114-124.

3. Киктев Д.Б., Толстых М.А., Мирвис В.М. О предсказуемости экстремальных метеорологических явлений на временных масштабах до сезона // Экстремальные паводки в бассейне р. Амур: причины, прогнозы, рекомендации: Сборник докладов. М.: Триада ЛТД, 2014. С. 54-66.
4. Нестеров Е.С. О влиянии колебания Маддена– Джулиана на циркуляцию атмосферы во внетропических широтах Северного полушария // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 63-73.
5. Belanger J.I., Curry J.A., Webster P.J. Predictability of North Atlantic tropical cyclone activity on intraseasonal time scales // Mon. Wea. Rev. 2010. Vol. 138. P. 4362-4374.
6. Henderson S.A., Maloney E.D., Barnes E.A. The Influence of the Madden-Julian Oscillation on Northern Hemisphere Winter Blocking // Journal of Climate. 2016. Vol. 29. P. 4597-4616.
5. Hersbach, H., Bell B., Berrisford P. The ERA5 global reanalysis // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2020. Vol. 146. P. 1999-2049.
8. Kessler W.S. EOF representation of the Madden-Julian Oscillation and its connection with ENSO // J. Climate. 2001. Vol. 14. P. 3055-3061.
9. Kikuchi K., Takayabu Y.N. Equatorial circumnavigation of moisture signal associated with the Madden-Julian Oscillation (MJO) during boreal winter // J. Meteor. Soc. Japan. 2003. Vol. 81. P. 851-869.
10. Kiladis G.N., Dias J., Straub K.H., Wheeler M.C., Tulich S.N., Kikuchi K., Weickmann K.M., Ventrice M.J. A Comparison of OLR and Circulation-Based Indices for Tracking the MJO // Mon. Wea. Rev. 2014. Vol. 142(5). P. 1697-1715.
11. Kiladis G.N., Wheeler M.C., Haertel P.T., Straub K.H., Roundy P.E. Convectively coupled equatorial waves // Rev. Geophys. 2009. Vol. 47. RG2003.
12. Klotzbach P.J. On the Madden-Julian Oscillation–Atlantic hurricane relationship // J. Climate. 2010. Vol. 23. P. 282-293.
13. Knutson Thomas R., Weickmann Klaus M. 30–60 Day Atmospheric Oscillations: Composite Life Cycles of Convection and Circulation Anomalies // Mon. Wea. Rev. 1987. Vol. 115. P. 1407-1436.
14. Lau K.H., Chan P.H. Intraseasonal and interannual variations of tropical convection: A possible link between the 40–50 day oscillation and ENSO // J. Atmos. Sci. 1988. Vol. 45. P. 506-521.
15. Lin H., Brunet G., Derome J. An observed connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian Oscillation // Journal of Climate. 2009. Vol. 22(2). P. 364-380.
16. Lo F., Hendon H.H. Empirical prediction of the MJO // Mon. Wea. Rev. 2000. Vol. 128. P. 2528-2543.
17. Lorenc A.C. The evolution of planetary-scale 200 mb divergent flow during the FGGE year // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 1984. Vol. 110. P. 427-441.
18. Madden R.A., Julian P.R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific // J. Atmos. Sci. 1971. Vol. 28. P. 702-708.
19. Madden R., Julian P. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period // J. Atmos. Sci. 1972. Vol. 29. P. 1109-1123.
20. Madden R.A., Julian P.R. Observations of the 40-50-day tropical oscillation – A review // Mon. Wea. Rev. 1994. Vol. 122. P. 814-837.
21. Maloney E.D., Hartmann D.L. Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden-Julian Oscillation // J. Climate. 1998. Vol. 11. P. 2387-2403.
22. Matthews A.J. Propagation mechanisms for the Madden-Julian oscillation // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2000. Vol. 126. P. 2637-2651.
23. Moore R.W., Martius O., Spengler T. The modulation of the subtropical and extratropical atmosphere in the Pacific basin in response to the Madden-Julian oscillation // Mon. Wea. Rev. 2010. Vol. 138. P. 2761-2778.
24. Roundy P.E., Schreck C.J. A combined wave-number– frequency and time-extended EOF approach for tracking the progress of modes of large-scale organized tropical convection // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 2009. Vol. 135. P. 61-173.

25. Rui H., Wang B. Development characteristics and dynamic structure of tropical intraseasonal convection anomalies // *J. Atmos. Sci.* 1990. Vol. 47. P. 357-379.
26. Slingo J.M., Rowell D.P., Sperber K.R., Nortley F. On the predictability of the interannual behavior of the Madden-Julian Oscillation and its relationship with El Niño // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1999. Vol. 125. P. 583-609.
27. Sperber K.R. Propagation and the vertical structure of the Madden-Julian Oscillation // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131. P. 3018-3037.
28. Thompson D.B., Roundy P.E. The relationship between the Madden-Julian oscillation and U.S. violent tornado outbreaks in the spring // *Mon. Wea. Rev.* 2013. Vol. 141. P. 2087-2095.
29. Ventrice M.J., Thorncroft C.D., Roundy P.E. The Madden-Julian oscillation's influence on African easterly waves and downstream tropical cyclogenesis // *Mon. Wea. Rev.* 2011. Vol. 139. P. 2704-2722.
30. Ventrice M.J., Wheeler M.C., Hendon H.H., Schreck C.J., Thorncroft C.D., Kiladis G.N. A modified multivariate Madden-Julian oscillation index using velocity potential // *Mon. Wea. Rev.* 2013. Vol. 141. P. 4197-4210.
31. Vitart F., Molteni F., Jung T. Prediction of the Madden-Julian Oscillation and its impact on the European weather in the ECMWF monthly forecasts // *ECMWF Seminar on Predictability in the European and Atlantic regions*, 6–9 September 2010.
32. Vitart F., Robertson A.W. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events // *npj Climate and Atmospheric Science*. 2018. Vol. 1(1), no. 3.
33. Weare B.C. Composite singular value decomposition analysis of moisture variations associated with the Madden-Julian Oscillation // *J. Clim.* 2003. Vol. 16. P. 3779-3792.
34. Wheeler M., Hendon H.H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction // *Mon. Weather Rev.* 2004. Vol. 132. P. 1917-1932.
35. Wheeler M.C., Kiladis G.N. Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber–frequency domain // *J. Atmos. Sci.* 1999. Vol. 56. P. 374-399.
36. Zhang C., Hendon H.H. Propagating and standing components of the intraseasonal oscillation in tropical convection // *J. Atmos. Sci.* 1997. Vol. 54. P. 741-752.

References

1. Kandieva K.K., Aniskina O.G., Pogorel'cev A.I. Vliyanie oscilljacji Maddena-Dzhuliana na intensivnost' i strukturu poljarnogo vihrja [Influence of the Madden-Julian oscillation on the intensity and structure of the polar vortex]. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta [Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University]*, 2018, vol. 50, pp. 18-27 [in Russ.]
2. Kandieva K.K., Aniskina O.G., Pogorel'cev A.I., Zorkal'ceva O.S., Mordvinov V.I. Vliyanie oscilljacji Maddena-Dzhuliana i kvazidvuhletnego kolebanija na dinamiku vnetropicheskoj stratosfery [The influence of the Madden-Julian oscillation and the quasi-biennial oscillation on the dynamics of the extratropical stratosphere]. *Geomagnetizm i ajeronomija [Geomagnetism and aeronomy]*. 2019, vol. 59, no. 1, pp. 114-124 [in Russ.]
3. Kiktev D.B., Tolstykh M.A., Mirvis V.M. O predskazuemosti jekstremal'nyh meteorologicheskikh javlenij na vremennyh masshtabah do sezona. - Jekstremal'nye pavodki v bassejne r. Amur: prichiny, prognozy, rekomendacii [On the predictability of the extreme meteorological phenomena on time scales up to the season. - Extreme floods in the Amur River basin: causes, forecasts, recommendations]. *Sbornik dokladov [Collection of reports]*. Moscow, Triada LTD Publ., 2014, pp. 54-66 [in Russ.]
4. Nesterov E.S. On the influence of the Madden-Julian oscillation on the atmospheric circulation in the extratropical latitudes of the Northern hemisphere. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2018, vol. 370, no. 4, pp. 63-73 [in Russ.]
5. Belanger J.I., Curry J.A., Webster P.J. Predictability of North Atlantic tropical cyclone activity on intraseasonal time scales. *Mon. Wea. Rev.*, 2010, vol. 138, pp. 4362-4374.

6. Henderson S.A., Maloney E.D., Barnes E.A. The Influence of the Madden–Julian Oscillation on Northern Hemisphere Winter Blocking. *Journal of Climate*, 2016, vol. 29, pp. 4597-4616.
7. Hersbach, H., Bell B., Berrisford P. The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2020, vol. 146, pp. 1999-2049.
8. Kessler W.S. EOF representation of the Madden–Julian Oscillation and its connection with ENSO. *J. Climate*, 2001, vol. 14, pp. 3055-3061.
9. Kikuchi K., Takayabu Y.N. Equatorial circumnavigation of moisture signal associated with the Madden-Julian Oscillation (MJO) during boreal winter. *J. Meteor. Soc. Japan.*, 2003, vol. 81, pp. 851-869.
10. Kiladis G.N., Dias J., Straub K.H., Wheeler M.C., Tulich S.N., Kikuchi K., Weickmann K.M., Ventrice M.J. A Comparison of OLR and Circulation-Based Indices for Tracking the MJO. *Mon. Wea. Rev.* 2014, vol. 142(5), pp. 1697-1715.
11. Kiladis G.N., Wheeler M.C., Haertel P.T., Straub K.H., Roundy P.E. Convectively coupled equatorial waves. *Rev. Geophys.*, 2009, vol. 47, pp. RG2003.
12. Klotzbach P.J. On the Madden-Julian Oscillation–Atlantic hurricane relationship. *J. Climate*, 2010, vol. 23, pp. 282-293.
13. Knutson Thomas R., Weickmann Klaus M. 30–60 Day Atmospheric Oscillations: Composite Life Cycles of Convection and Circulation Anomalies. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, vol. 115, pp. 1407-1436.
14. Lau K.H., Chan P.H. Intraseasonal and interannual variations of tropical convection: A possible link between the 40–50 day oscillation and ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1988, vol. 45, pp. 506-521.
15. Lin H., Brunet G., Derome J. An observed connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, no. 2, pp. 364-380.
16. Lo F., Hendon H.H. Empirical prediction of the MJO. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, vol. 128, pp. 2528-2543.
17. Lorenc A.C. The evolution of planetary-scale 200 mb divergent flow during the FGGE year. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1984, vol. 110, pp. 427-441.
18. Madden R.A., Julian P.R. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 1971, vol. 28, pp. 702-708.
19. Madden R., Julian P. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. *J. Atmos. Sci.*, 1972, vol. 29, pp. 1109-1123.
20. Madden R.A., Julian P.R. Observations of the 40-50-day tropical oscillation – A review. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, vol. 122, pp. 814-837.
21. Maloney E.D., Hartmann D.L. Frictional moisture convergence in a composite life cycle of the Madden-Julian Oscillation. *J. Climate.*, 1998, Vol. 11, pp. 2387-2403.
22. Matthews A.J. Propagation mechanisms for the Madden-Julian oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2000, vol. 126, pp. 2637-2651.
23. Moore R.W., Martius O., Spengler T. The modulation of the subtropical and extratropical atmosphere in the Pacific basin in response to the Madden-Julian oscillation. *Mon. Wea. Rev.* 2010, vol. 138, pp. 2761–2778.
24. Roundy P.E., Schreck C.J. A combined wave-number–frequency and time-extended EOF approach for tracking the progress of modes of large-scale organized tropical convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2009, vol. 135, pp. 61–173.
25. Rui H., Wang B. Development characteristics and dynamic structure of tropical intraseasonal convection anomalies. *J. Atmos. Sci.* 1990, vol. 47, pp. 357-379.
26. Slingo J.M., Rowell D.P., Sperber K.R., Nortley F. On the predictability of the interannual behavior of the Madden-Julian Oscillation and its relationship with El Nino. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1999, vol. 125, pp. 583-609.
27. Sperber K.R. Propagation and the vertical structure of the Madden-Julian Oscillation. *Mon. Wea. Rev.* 2003, vol. 131, pp. 3018-3037.
28. Thompson D.B., Roundy P.E. The relationship between the Madden-Julian oscillation and U.S. violent tornado outbreaks in the spring. *Mon. Wea. Rev.* 2013, vol. 141, pp. 2087-2095.

29. Ventrice M.J., Thorncroft C.D., Roundy P.E. The Madden-Julian oscillation's influence on African easterly waves and downstream tropical cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.* 2011, vol. 139, pp. 2704-2722.

30. Ventrice M.J., Wheeler M.C., Hendon H.H., Schreck C.J., Thorncroft C.D., Kiladis G.N. A modified multivariate Madden-Julian oscillation index using velocity potential. *Mon. Wea. Rev.* 2013, vol. 141, pp. 4197-4210.

31. Vitart F., Molteni F., Jung T. Prediction of the Madden-Julian Oscillation and its impact on the European weather in the ECMWF monthly forecasts. *ECMWF Seminar on Predictability in the European and Atlantic regions*, 6–9 September 2010.

32. Vitart F., Robertson A.W. The sub-seasonal to seasonal prediction project (S2S) and the prediction of extreme events. *npj Climate and Atmospheric Science*. 2018, vol. 1(1), no. 3.

33. Weare B.C. Composite singular value decomposition analysis of moisture variations associated with the Madden-Julian Oscillation. *J. Clim.* 2003, vol. 16, pp. 3779-3792.

34. Wheeler M., Hendon H.H. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Mon. Weather Rev.* 2004, vol. 132, pp. 1917-1932.

35. Wheeler M.C., Kiladis G.N. Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber–frequency domain. *J. Atmos. Sci.* 1999, vol. 56, pp. 374-399.

36. Zhang C., Hendon H.H. Propagating and standing components of the intraseasonal oscillation in tropical convection. *J. Atmos. Sci.* 1997, vol. 54, pp. 741-752.

*Поступила 15.10.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022;
принята в печать 29.11.2022.*

*Submitted 15.10.2022; approved after reviewing 16.11.2022;
accepted for publication 29.11.2022.*