

СВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ТРОПОСФЕРЕ С ДИНАМИКОЙ СТРАТОСФЕРЫ

М.А. Руднева, Е.В. Девятова, В.И. Мордвинов

CONNECTION BETWEEN PROCESSES IN EQUATORIAL TROPOSPHERE AND STRATOSPHERIC DYNAMICS

М.А. Rudneva, E.V. Devyatova, V.I. Mordvinov

В работе изучена связь колебания Маддена–Джулиана (Madden–Julian Oscillation, MJO) с внезапными стратосферными потеплениями (ВСП) – событиями, характерными для динамики зимней высокоширотной стратосферы. Энергетически MJO представляет собой одно из наиболее мощных атмосферных явлений в тропиках на масштабах времени 30–60 сут, причиной которого является дрейф на восток крупномасштабной конвективной ячейки, имеющей масштаб по долготе несколько десятков градусов. Внезапные стратосферные потепления, в свою очередь, возникают вследствие ослабления или разрушения Полярного вихря, сопровождающегося значительным повышением температуры в стратосфере. Для обоих явлений характерна сильная межгодовая изменчивость. Исследование показало, что в зимы с хорошо выраженным MJO стратосферные потепления имеют более сложный характер развития. Температурные аномалии в эти годы распространяются в низкие широты с попеременным повышением температуры стратосферы в разных регионах полушария, повторяющимся неоднократно и согласующимся с фазой колебания. В те зимы, когда колебание Маддена–Джулиана отсутствует, область, охваченная стратосферным потеплением, более компактна, ограничена более высокими широтами и, как правило, не выходит за пределы Евразии. Кроме того такие потепления имеют четкие границы начала и окончания процесса.

The relationship between Madden–Julian Oscillation and stratospheric sudden warmings is investigated. Madden–Julian Oscillation is an intra-seasonal large-scale convection cell in the tropical troposphere, drifting eastward with a period of 30–60 days. Stratospheric sudden warming is a dynamic process of weakening or breaking of the polar vortex, accompanied by a significant temperature increasing in the stratosphere. Both phenomena are characterized by strong interannual variability. The study showed that in the winter with a strong Madden - Julian Oscillation the stratospheric warmings are complex, propagate in low latitudes with increasing temperature alternately in different regions of the hemisphere, repeated many times, and consistent with the phase of the MJO. In winters without Madden–Julian Oscillation the stratospheric warming areas are more compact, limited to the higher latitudes mainly over Eurasia. In addition, such warmings have a clear boundaries start and end of the process.

Проведенные нами ранее исследования показали, что многие особенности возникновения и развития ВСП трудно объяснить исключительно внутренней динамикой стратосферы, или уложить в рамки «классической» волновой теории [Matsumo, 1971]. Для ВСП характерна сильная межгодовая изменчивость, причины которой пока трудно объяснить. Различия в динамике ВСП в разные годы иллюстрирует рис. 1, на котором построены распределения высоты геопотенциальной поверхности 10 гПа и температуры на этом уровне за два зимних периода: 1987–1988 (слева) и 1997–1998 (справа) по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis [Kalnay, 1996].

Хорошо видно, как сильно может отличаться динамика ВСП от года к году. В некоторые зимы (подобные зиме 1997–1998) потепления компакты, ограничены в основном широтами 50° N и не выходят, как правило, за пределы Евразии. Несмотря на небольшую пространственную протяженность, они могут быть и мажорными, т. е. приводить к разрушению Полярного вихря. У таких компактных потеплений достаточно четко выделяется и легко определяется время их начала и окончания.

В другие же зимы (подобные зиме 1987–1988) потепления могут охватывать большие пространственные масштабы, распространяясь до 40° N (иногда южнее), с ориентацией ложбин, гребней и температурных аномалий, указывающей на возможное влияние низкоширотных процессов. Эти ВСП более продолжительны, причем время их начала и окончания определить достаточно трудно – промежутки времени между двумя соседними потеплениями вы-

деляются весьма условно, так как и в эти интервалы времени остаются положительные аномалии температуры слабой интенсивности. Представляется затруднительным объяснить характер таких крупномасштабных длительных потеплений исключительно внутренней динамикой зимней стратосферы или низкочастотной изменчивостью в тропосфере умеренных широт. Однако, как мы уже раньше отмечали, в эти годы выделяются признаки влияния на ВСП процессов низких широтах [Кочеткова и др., 2014].

Наиболее вероятным «кандидатом» на роль источника возмущений в тропиках является Madden–Julian Oscillation – колебание, обусловленное динамикой крупномасштабной конвекции, ответственной за большую часть погодной изменчивости в этих регионах [Madden, Julian, 1972]. MJO является компонентом собственных колебаний в системы «океан – атмосфера» и проявляется в вариациях таких важных атмосферных и океанических параметров, как скорость и направление ветра в нижней и верхней тропосфере, облачность, осадки, температура поверхности океана и испарение с поверхности океана. Наиболее ярко MJO проявляется в районе Индийского океана, Индонезии, западной части Тихого океана. В динамике конвективной ячейки MJO выделяют 8 фаз. В фазах 1–3 восходящие движения и положительные аномалии осадков наблюдаются над Индийским океаном, в фазах 4 и 5 – над Индонезией, в фазах 6 и 7 – над западной частью Тихого океана. В восточной части Тихого океана над холодной подстилающей поверхностью восходящие движения ослабевают, но иногда могут достигать даже

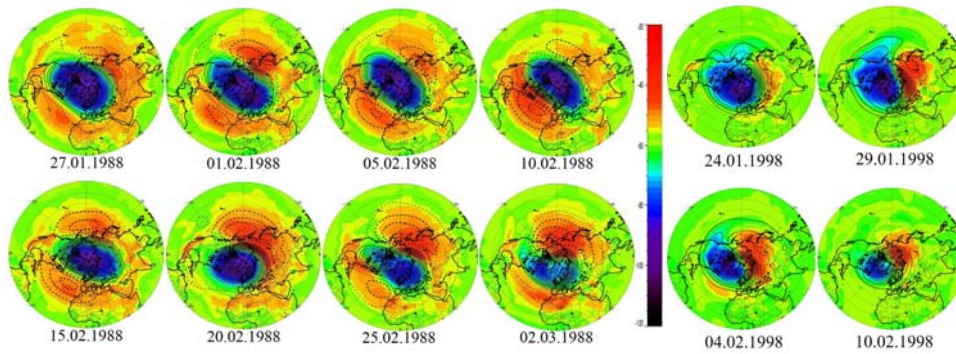


Рис. 1. Распределения высоты геопотенциальной поверхности 10 гПа (изолинии) и температуры (заливка) на этом уровне за два зимних периода: 1987–1988 (слева) и 1997–1998 (справа), построенные по данным NCEP/NCAR Reanalysis.

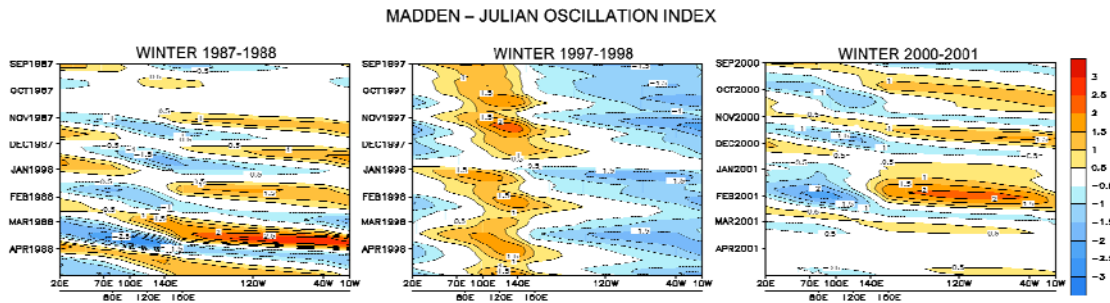


Рис. 2. Диаграммы МЖО в координатах «долгота-время» для трех зим: 1987–1988 (интенсивное МЖО); 1997–1998 (зима без МЖО, Эль-Ниньо); 2000–2001 (зима без МЖО, Ла-Нинья). Синий цвет – усиленная конвекция. Красный цвет – подавленная конвекция. [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/pentad.shtml].

Атлантики – это фаза 8 МЖО, завершающая полный цикл колебания [Zhang, 2013].

Одной из особенностей МЖО является сильная межгодовая изменчивость (как и ВСП) – периоды высокой активности сменяются длительными интервалами со слабыми проявлениями МЖО, либо с полным их отсутствием [Hendon et al., 1999]. Имеются также доказательства, что межгодовая изменчивость МЖО частично связана с циклом Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК). Высокая активность МЖО часто наблюдается в годы со слабым Ла-Нинья или в годы с нейтральным индексом ЭНЮК, тогда как слабая активность МЖО или даже ее полное отсутствие обычно связаны с эпизодами сильно выраженной фазы Эль-Ниньо. МЖО является источником квазистационарных волн Россби, распространяющихся на большие расстояния в северном и южном полушариях Земли.

Используя данные об индексе МЖО с 1978 по 2014 гг. [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/pentad.shtml], мы рассортировали исследуемый период по типу МЖО – на зимы с интенсивным МЖО и зимы без МЖО либо со слабо выраженным МЖО. К зимам с МЖО были отнесены следующие: 1978–1979, 1979–1980, 1981–1982, 1984–1985, 1985–1986, 1987–1988, 1989–1990, 1990–1991, 1992–1993, 1996–1997, 1998–1999, 2001–2002, 2002–2003, 2003–2004, 2005–2006, 2007–2008, 2009–2010. К зимам без МЖО были отнесены: 1980–1981, 1982–1983, 1986–1987, 1997–1998, 2004–2005 (Эль-Ниньо); 1983–1984, 1988–1989, 2000–2001, 2008–2009, 2010–2011 (Ла-Ниньо).

Для иллюстрации различий в динамике МЖО в эти периоды на рис. 2 приведены примеры диаграмм Ховмёллера интенсивности конвекции в координа-

тах «долгота-время» для трех зим: 1987–1988 (зима с интенсивным МЖО); 1997–1998 (зима без МЖО, ярко выраженный эпизод Эль-Ниньо); 2000–2001 (зима без МЖО, эпизод слабой Ла-Нинья).

Для различных типов МЖО были проанализированы особенности развития ВСП за весь исследуемый интервал времени. Оказалось, что в зимы с хорошо выраженным МЖО (например, зимой 1987–1988) стратосферные потепления более крупномасштабные, распространяются в низкие широты до 40° N, а в отдельных случаях даже до 30° N. Для них характерно попеременное повышение температуры стратосферы в разных регионах полушария, повторяющееся неоднократно и согласующееся с фазой МЖО (фазам 2–5 соответствует повышение температуры над Евразией, фазы 6, 7, 8 и 1 сопровождаются повышением температуры над Северной Америкой и севером Атлантики).

Более компактные ВСП, не проникающие южнее 50° N и, как правило, не выходящие за пределы Евразии, развиваются, в основном, в годы без МЖО либо с МЖО слабой интенсивности. Такие потепления имеют гораздо более четкие границы начала и окончания процесса по сравнению с потеплениями первого типа.

Рисунок 3 иллюстрирует еще одну интересную, выявленную нами особенность. На рис. 3 приведены диаграммы «фаза МЖО – время» (без учета амплитуды) для трех зим: 1987–1988 (сильное МЖО), 1997–1998 и 2000–2001 (без МЖО либо слабое МЖО). Линиями разного цвета выделены периоды с разным количеством и продолжительностью ВСП. При хорошо выраженном МЖО фазы пробегают значения от 1 до 8. Хорошо видно, что во все три зимы ВСП чаще

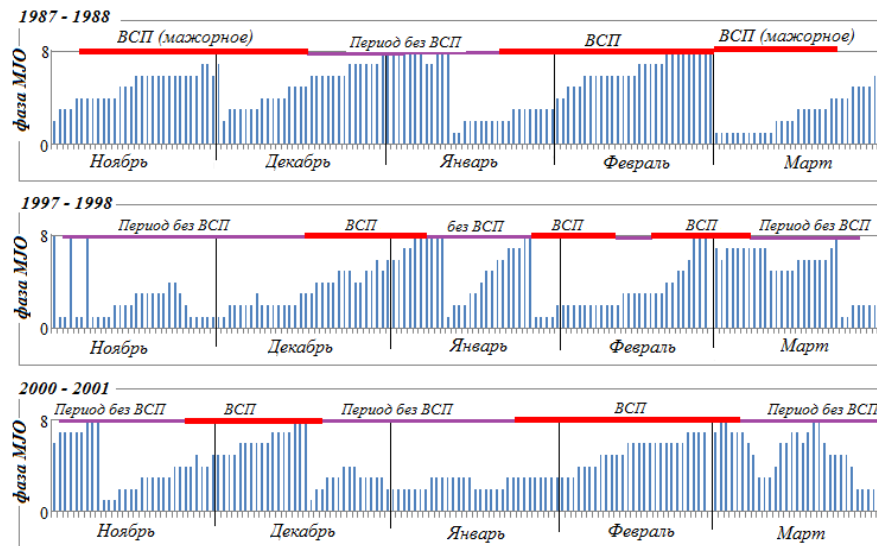


Рис. 3. Диаграммы «фаза МЖО – время» для зим 1987–1988 (сильное МЖО), 1997–1998 и 2000–2001 (без МЖО либо со слабым МЖО). Горизонтальными линиями отмечены промежутки времени с ВСП (красный цвет) и без ВСП (сиреневый цвет).

всего развиваются в периоды с четко выраженной сменой фаз МЖО. Такая тенденция прослеживается даже если амплитуда МЖО невелика. И наоборот, периоды времени без МЖО либо со слабо выраженным МЖО совпадают с интервалами времени без ВСП.

В качестве возможных механизмов влияния МЖО на стратосферные потепления можно предложить следующие: 1) Волновой механизм, согласно которому термические аномалии, обусловленные МЖО, возбуждают двумерные волны Россби, переносящие энергию в стратосферу высоких и умеренных широт; 2) Изменение структуры среднего течения в стратосфере во время МЖО, делающее возможным адвективный перенос тепла из низких широт стратосферы в высокие, что способствует развитию ВСП. Эти механизмы требуют проверки и являются объектом будущих исследований.

Работа выполнена в рамках гранта № НШ-2942.2014.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кочеткова О.С., Мордвинов В.И., Руднева М.А. Анализ факторов, влияющих на возникновение внезапных стратосферных потеплений // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 719–727.
- Hendon H.H., Zhang Ch., Glick J.D. Interannual Variation of the Madden–Julian Oscillation during Austral Summer // J. Climate. 1999. V. 12, iss. 8. P. 2538–2550.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77, no 3. P. 437–471.
- Madden R.A., Julian P.R. Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40–50 Day Period // J. Atmos. Sci. 1972. V. 29, iss. 6. P. 1109–1123.
- Matsumo T. A dynamical model of the Stratosphere sudden warming // J. Atmos. Sci. 1971. V. 28. P. 1479–1494.
- Zhang Ch. Madden–Julian Oscillation: Bridging Weather and Climate // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2013. V. 94, iss. 12. P. 1849–1870.
- http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_mjo_index/pentad.shtml

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия