

## Изменение климата и динамика шторм-треков Северного полушария: изменения в поведении нестационарных вихрей.

Шторм-треки представляют собой области наиболее частого появления бароклинических волн и связанных с ними нестационарных вихрей. Нестационарные вихри играют важную роль в переносе энергии, импульса и влажности. Они приносят сильные осадки и ветры. Фактически, нестационарными вихрями являются циклоны и антициклоны. В последнее время, на основе данных реанализа, было обнаружено, что во второй половине 20 века увеличилась интенсивность циклонов в средних широтах при уменьшении частоты их появления (например, *Fyfe J.C. 2003*).

В этой работе мы исследовали, как могут глобальные климатические изменения повлиять на шторм-треки средних широт. Мы рассматривали не только влияние глобального потепления, но и влияние возможного последующего похолодания. Иными словами, мы рассматривали влияние климатических изменений, происходящих согласно сценарию антропогенного воздействия с увеличением нагрузки и последующем ее уменьшением (<http://climate.uvic.ca/EMICAR5>). Используемый сценарий состоит из нескольких частей: с 850 по 2005 годы концентрация CO<sub>2</sub> задавалась в соответствии с протоколом «Historical simulations» проекта сравнения климатических моделей CMIP5 (Coupled Models Intercomparison Project, Phase 5), далее, с XXI по XXIII изменение концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере менялась согласно наиболее агрессивному климатическому сценарию RCP 8.5, после чего в течение XXIV — XIX концентрация углекислого газа в атмосфере была зафиксирована на уровне, которого достигла в 2300 году, а в течение XXX — XXXI концентрация CO<sub>2</sub> возвращалась к доиндустриальному значению, при этом до доиндустриального значения концентрация CO<sub>2</sub> линейно падала в течение первых 100 лет XXX, а затем фиксировалась до окончания расчета.

Численный эксперимент был поставлен с помощью глобальной крупномасштабной модели промежуточной сложности «Planet Simulator» (*Fraedrich et al. 2005*). Данная модель использовалась как модель климатической системы, т.е. при моделировании в активном режиме находились все доступные вычислительные блоки модели: атмосферный, океанический, блок морского льда, поверхности суши, биосферный. Эксперимент проводился с использованием горизонтального разрешения T42, что примерно составляет 2,5° x 2,5° (гауссовой сетки); по вертикали в атмосфере было использовано 10 равноудаленных друг от друга  $\sigma$ -уровней, самый верхний из которых располагался на высоте 10 мб; в толще почвы было определено 5 уровней, располагающихся на глубине 0,4 м, 0,8 м, 1,6 м, 3,2 м и 6,4 м от поверхности. Шаг по времени при расчет составлял 20 минут.

Для сравнения активности шторм-треков мы выбрали девять десятилетних временных интервалов со следующими характеристиками состояния концентрации углекислого газа в атмосфере. Первый интервал (1751-1760 гг.) характеризуется устойчивым доиндустриальным состоянием климатической системы, второй интервал (1991-2000 гг.) выбран для условий начала роста концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере, третий (2101-2110 гг.) — в середине периода роста концентрации CO<sub>2</sub>, четвертый (2191-2200 гг.) — в конце периода роста концентрации CO<sub>2</sub>. Последующий пятый интервал (2691-2700 гг.) был выбран для условий устойчивого состояния климатической системы с экстремально высоким значением концентрации углекислого газа в атмосфере. Далее, шестой (3011-3020 гг.), седьмой (3051-3060 гг.) и восьмой (3111-3120 гг.) интервалы соответствуют условиям, соответственно, начала, середины и конца периода падения концентрации атмосферного диоксида углерода. Последнему, девятому периоду (3191-3200 гг.), соответствуют климатические условия с

доиндустриальным значением концентрации CO<sub>2</sub>, к которому система была возвращена к концу моделирования.

В качестве индикатора активности шторм-треков мы использовали среднесезонные (зима — декабрь, январь, февраль, и лето — июнь, июль, август) вариации меридиональной составляющей скорости ветра на высоте 250 мб, последовательность вычисления которой была следующей. Сначала, чтобы дальнейшая работа происходила только с процессами синоптических временных масштабов (2-8 суток), в рамках каждого из девяти интервалов была произведена фильтрация полей значений меридиональной составляющей скорости ветра (**Blackmon 1976**). Далее, используя отфильтрованные значения отдельно для зимнего и летнего сезонов, была вычислена средняя за сезон вариация указанной величины (**Hoskins et al. 1990; Chang et al. 2012**). Наряду с активностью шторм-треков мы рассматривали вихревой поток импульса на 250 мб, как величину характеризующую поведение вихревой кинетической энергии (**Hoskins et al. 1990; Chang et al. 2012**).

На диаграмме Хофмеллера, представленной на слайде 9, видно, что и для летнего, и для зимнего сезонов при росте концентрации CO<sub>2</sub> происходит сдвиг области максимальной активности в направлении высоких широт, а при последующем падении — ее возвращение в средние широты. Однако, для зимнего сезона в конце моделирования проявляется одна особенность: концентрация CO<sub>2</sub> вернулась к доиндустриальному значению, а активность шторм-треков при этом продолжила падать.

Мы видим, что область максимальной активности шторм-треков располагается между 51° и 57° с.ш. Мы построили диаграммы Хофмеллера для трех широт (см. презентацию, слайд 10). Здесь видно, что изменение концентрации углекислого газа сильнее влияет на Атлантический шторм-трек, чем на Тихоокеанский. Для зимнего сезона видно, что активность ни Атлантического, ни Тихоокеанского шторм-треков не возвращаются к своему преиндустриальному значению при падении до этого уровня концентрации CO<sub>2</sub>.

На слайде 11 представлены диаграммы Хофмеллера, демонстрирующие, что влияние антропогенных воздействий на вихревой поток импульса наиболее сильно проявляется также в зимний сезон.

Обобщая все выше сказанное, можно заключить, что **при заданных описанных выше условиях** изменение концентрации углекислого газа существенно влияет на поведение шторм-треков. При изменении концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере поведение шторм-треков также меняется. Однако для зимнего сезона, при возвращении концентрации CO<sub>2</sub> к преиндустриальному значению, поведение шторм-треков не возвращается к преиндустриальному состоянию.

Blackmon M.L. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere // J. Atmos. Sci. 1976. V. 33, N. 8. P. 1607-1623.

Brian J. Hoskins, Paul J. Valdes On the existence of storm-tracks // J. Atmos. Sci. 1990. V. 47, N. 15. P. 1854-1864.

Edmund K.M. Chang, Yanjuan Guo, Xiaoming Xia, Minghua Zheng Storm-Track Activity in IPCC AR4/CMIP3 Model Simulations // Journal of Climate. 2012. Vol. 26, N. 1. P 246-260.

Fraedrich K., Jansen H., et al. The Planet Simulator: Towards a user friendly model // Meteorologische Zeitschrift. 2005. Vol. 14, N. 3. P. 299-304.

Fyfe J.C. Extratropical southern hemisphere cyclones: harbingers of climate change? // J. Clim. 2003. V. 16. P. 2802-2805.