

И. В. Боровко^{1✉}, В. Н. Крупчатников¹

Численное исследование обрушения планетарных волн и их связь с атмосферными блокировками

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: irina@ommfao1.sccc.ru

Аннотация. С помощью модельных данных (использовалась модель INM-CM48) исследуется явление обрушения планетарных волн. В качестве признака обрушения волн используются нитевидные участки полярного вихря в районе тропопаузы - так называемые стримеры. Исследована реакция количества стримеров на климатические изменения. Кроме стандартного сценария потепления за счет увеличения концентрации углекислого газа был использован также сценарий потепления за счет уменьшения альбедо снега и льда. Численно исследована связь стримеров с атмосферными блокировками. Построены зависимости частоты стримеров и блокировок от долготы. Показано, что области максимальных частот стримеров и блокировок не совпадают. Показано, что при обоих сценариях потепления климата происходит уменьшение числа стримеров в рассматриваемых областях в результате усиления струйного течения.

Ключевые слова: стримеры, обрушение волн, полярный вихрь, атмосферные блокирования

I. V. Borovko^{1✉}, V. N. Krupchatnikov¹

Numerical study of planetary waves breaking and their relation to the atmospheric blockings

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: irina@ommfao1.sccc.ru

Annotation. The phenomenon of planetary wave breaking is being investigated using model data (the INM-CM48 model was used). The filamentous sections of the polar vortex in the tropopause region, the so-called streamers, are used as a sign of wave breaking. The reaction of the number of streamers to climate changes has been investigated. In addition to the standard scenario of warming due to an increase in carbon dioxide concentration, a warming scenario due to a decrease in the snow and ice albedo was also used. The relationship of streamers with atmospheric blockings has been numerically investigated. The dependences of the streamers and blockings frequencies on longitude are plotted. It is shown that the areas of maximum frequencies of streamers and blockings do not coincide. It is shown that under both scenarios of climate warming, the number of streamers in the considered areas decreases as a result of the jet stream strengthening.

Keywords: streamers, wave breaking, polar vortex, atmospheric blockings

Введение

Циркуляцию атмосферы принято рассматривать как зонально симметричные поля, на которые наложены волновые возмущения. Значительные погодные аномалии в средних широтах связаны с амплификацией волн Россби. Явление

обрушения волн часто приводит к атмосферным блокировкам, и поэтому представляет интерес.

Обрушение волн разделяют на циклонический и антициклонический тип. Как правило, установлению блокирующего антициклона предшествует обрушение антициклонического типа. В [1] с помощью данных реанализа ERA5 были исследованы климатические показатели и изменчивость процессов опрокидывания волн в районе субтропического течения. Показано, что при наблюдаемых климатических изменениях частота обрушений антициклонического типа имеет положительный тренд.

Мерой интенсивности полярного вихря можно считать потенциальный вихрь Эртеля, который определяется как

$$Q = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta}{\partial p},$$

где θ - потенциальная температура, p - давление, f - параметр Кориолиса, $\xi_p = u_y - v_x$ - вертикальная компонента относительного вихря. При отсутствии неадиабатических источников потенциальный вихрь сохраняется на поверхностях с одинаковой потенциальной температурой. Зонально осредненный потенциальный вихрь Эртеля на изэнтропической поверхности представляет собой монотонную функцию широты, отклонение распределения Q от зонально симметричного может быть описано с помощью вихревой активности и является мерой интенсивности волн Россби. Потенциальный вихрь принято измерять в PVU ($1 \text{ PVU} = \text{m}^2 \text{K} \cdot \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1} \cdot 10^{-6}$ - potential vorticity unit)

Обрушение волны Россби проявляется как необратимое опрокидывание контуров потенциального вихря (ПВ) на изэнтропической поверхности, поэтому для его идентификации используется методика, связанная с так называемыми стримерами — нитевидными вихревыми структурами.

Поскольку местонахождение линии уровня $Q=2\text{PVU}$ с достаточно большой точностью совпадает с тропопаузой, а потенциальный вихрь сохраняется для частицы воздуха, эту линию можно считать динамической тропопаузой. Стримеры линии $Q=2\text{PVU}$ можно считать показателем взаимодействия стратосферы и тропосферы. Они могут быть условно разделены на два типа – стратосферные и тропосферные. Стратосферными считаются стримеры, у которых значение ПВ больше 2PVU , и которые вытягиваются в сторону экватора, тропосферными – стримеры, вытягивающиеся в сторону полюса.

В нашей работе анализировалась частота стримеров полярного вихря и ее реакция на климатические изменения.

Численный эксперимент

Для проводимого эксперимента была использована модель климатической системы INM-CM48[2]. Модель состоит из блоков, воспроизводящих динамику атмосферы, океана, морского льда, растительности и почвы. Разрешение модели

в атмосфере 2.0×1.5 по долготе и широте и 21 уровень по вертикали. Давление на верхнем уровне около 10 hPa.

С помощью модели INM-CM48 проведены численные эксперименты, в которых изменения климата происходят посредством двух различных механизмов. Сравнивались данные трех численных экспериментов. Расчет производился по следующему принципу: сначала модель рассчитывалась до выхода на стационарный режим (60 лет). После рассчитывались 40 лет трех экспериментов. Здесь первый эксперимент (B0) - базовый, в нем все задаваемые параметры оставались неизменными. Во втором (C1) была повышена концентрация углекислого газа с уровня 360 ppm, соответствующего доиндустриальным значениям, до уровня 450 ppm. В третьем эксперименте (A2) были искусственно понижены параметры альбедо сухого и мокрого льда (снега). Исходные значения альбедо, использовавшиеся в модели, 0.8 и 0.6, были уменьшены до 0.7 и 0.5, соответственно. Детали этих экспериментов подробно описаны в [3]. Целью этой работы было определение роли уменьшения количества льда в климатических изменениях Северного полушария. Кроме изменений температурного режима и скорости ветра также анализировались изменения частоты блокирований и распределения вихревой активности.

В нашей работе анализировались изменения частоты стримеров полярного вихря при заданных климатических изменениях. Для этого использовался метод идентификации нитевидных структур, предложенный в работе [4]. Участок контура, ограниченный парой точек, является стримером, если 1) прямое сферическое расстояние между этими точками меньше некоторого порогового значения d 2) длина участка контура, ограниченного этими двумя точками, больше порогового расстояния l . Для выявления вихревых структур синоптического масштаба используются значения $d=800$ км, $l=1500$ км.

Результаты

Опрокидывание волн Россби в средних широтах может быть проанализировано с помощью контуров на поверхности $\theta=310$ К. Для этой поверхности область опрокидываний зимой лежит в полосе (40° - 65° с.ш.) (рис.1) Число опрокидываний максимально в субтропических широтах западной Евразии. Над Восточной Азией для этой поверхности имеется минимум количества стримеров, но он не так выражен, как для более южных поверхностей, что может объясняться большей скоростью зонального ветра. В целом, области местонахождения стримеров согласуются с результатами, полученными для обрушений волн в [1].

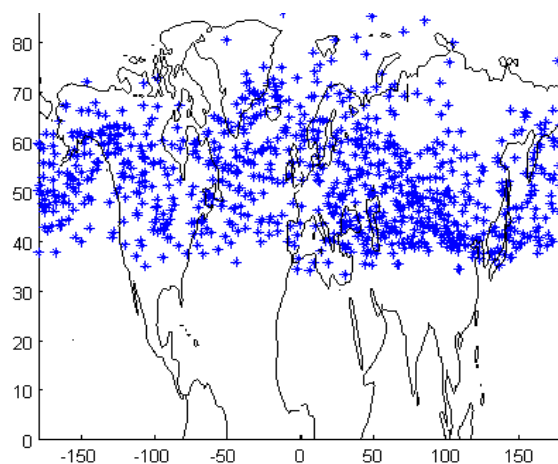


Рис. 1. Местоположение стримеров на поверхности
 $\theta=310K$, декабрь – февраль

В табл. 1. представлено количество стратосферных и тропосферных стримеров на поверхности $\theta = 330K$ за пять лет в трех экспериментах.

Таблица 1

Количество стримеров

Эксперимент	Сезон	Количество вихревых структур	
		Тропосферные стримеры	Стратосферные стримеры
B0	Зима	299	306
A2	Зима	264	252
C1	Зима	200	234
B0	Лето	480	643
A2	Лето	489	571
C1	Лето	439	469

Можно сделать вывод об уменьшении числа стримеров линии $Q=2PVU$ на поверхности в экспериментах с более теплым климатом по сравнению с базовым. Уменьшение числа стримеров происходит как в зимний, так и в летний сезон. Особенно значительным оно является в эксперименте с увеличением концентрации углекислого газа. Скорее всего, это связано с усилением полярного вихря, а также тропосферного струйного течения, в результате выхолаживания полярной стратосферы в C1 [3]. Для линии на поверхности 310 K такого не наблюдается, поскольку во внетропических широтах средний западный ветер, наоборот, ослабляется в обоих экспериментах.

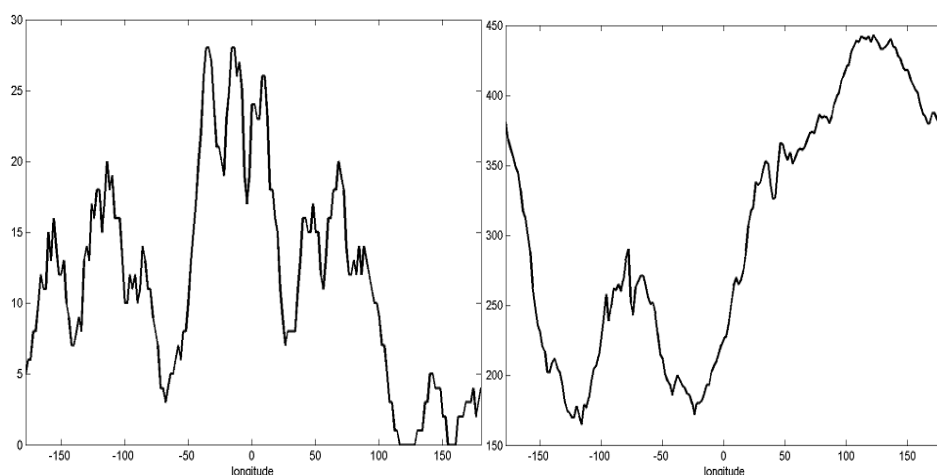


Рис. 2. Слева - количество стримеров в зависимости от долготы, справа - количество блокирований, зима, $\theta=330K$

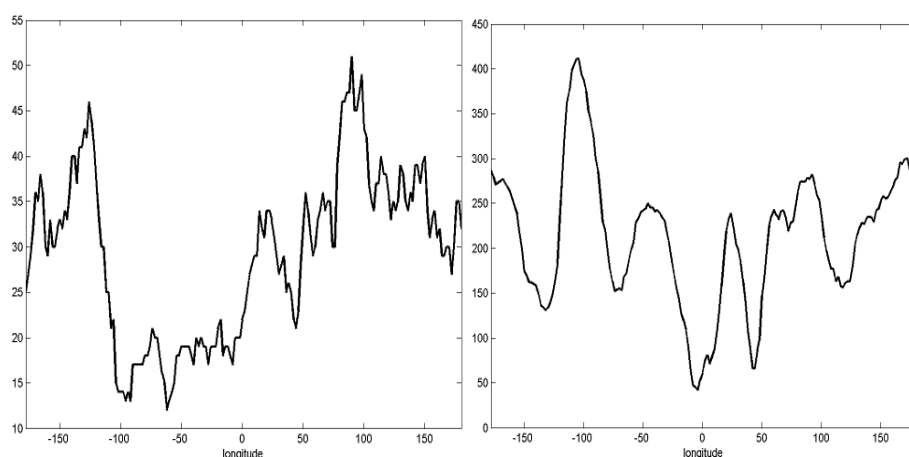


Рис. 3. Слева - количество стримеров в зависимости от долготы, справа - количество блокирований, лето, $\theta=330K$

Для базового эксперимента было проанализировано местоположение контуров поверхности. Сравнивались распределения стримеров и блокирующих ситуаций, определяемых с помощью критерия Тибальди-Молтени. [5]

Область, где наблюдаются стримеры на рассматриваемой поверхности в зимний период, лежит, в основном, в субтропических широтах. (25^0 - 50^0 с.ш.). Очень редко наблюдаются стримеры на востоке Евразии и западе Тихого океана. (рис.2, слева). В то же время в этой области наблюдается максимальная по долготе частота выполнения условий Тибальди-Молтени(ТМ). (рис. 2, справа). Коэффициент корреляции между частотой стримеров и частотой блокирующих антициклонов составляет $-0,654$. В летний период линия уровня на поверхности $330K$ находится во внетропических широтах. (рис.3). Для этих данных отрицательная корреляция не так выражена: ее коэффициент составляет $-0,216$. Выделяется область в центре Северной Америки, где в модельных данных летом формируется стационарный антициклон, и соответственно, частота выполнения

условий ТМ максимальна. В этой области также наблюдается минимум количества стримеров.

Обсуждение

Форма изолинии потенциального вихря определяется интенсивностью планетарных волн: чем больше вихревая составляющая динамических полей, тем более изрезанной эта линия является.

Поскольку в нашей работе рассматривается уровень тропопаузы, для наличия стримеров необходимо, чтобы существовало распространение волн в вертикальном направлении.

Условие распространения планетарных волн в вертикальном направлении было сформулировано в [6].

$$0 \leq \bar{u} \leq u_c \quad (1)$$

где u_c - критическая скорость, зависящая от волнового числа и стратификации атмосферы, верхняя черта обозначает осреднение по широте.

Показателем направления распространения планетарных волн является поток вихревой активности Пламба [7]. Для области 20°-50° с.ш. в зимний период зональная компонента этого потока - западная, существует минимум в районе 50°-100° в.д. Таким образом, минимум количества стримеров в районе Восточной Азии обусловлен положительной дивергенцией потока Пламба.

Для летних данных также существует корреляция количества стримеров с конвергенцией потока Пламба, хотя и в меньшей степени.

Минимумы количества стримеров в областях стационарных антициклонов могут быть связаны с тем, что в некоторой окрестности средний зональный ветер становится восточным, нарушается условие (1), и планетарные волны запираются в тропосфере.

Максимумы количества стримеров наблюдаются в западной части антициклонов, что обусловлено конвергенцией потоков Пламба.

Заключение

В работе на основе модельных данных было проанализировано число стримеров полярного вихря и их связь с атмосферными блокировками. Было оценено изменение количества стримеров при климатических изменениях.

В численном эксперименте наблюдается уменьшение количества опрокидываний контуров потенциального вихря при уменьшении количества льда в Арктике. Оно особенно значительно в эксперименте с увеличением концентрации CO₂. Это можно связать с усилением струйного течения. Однако при потеплении климата не наблюдается уменьшения количества блокирований в рассматриваемых областях [3]. Можно сделать вывод о том, что между стримерами и блокировками нет однозначной зависимости.

Распределение стримеров по долготе имеет отрицательную корреляцию с блокировками. Это связано с тем, что для оценки наличия блокирования ана-

лизируется циркуляционная картина на эквивалентно баротропном уровне, в то время как стримеры линии $Q=2PVU$ находятся в районе тропопаузы.

Анализ частоты стримеров проводился без учета того, к какому типу обрушения - антициклоническому или циклоническому, они относятся. В ряде работ было показано, что реакция крупномасштабной циркуляции атмосферы на обрушение волн зависит от того, циклоническое оно или антициклоническое. Для более детального исследования надо рассматривать отдельно стримеры, относящиеся к разным типам обрушения волн.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM – 2025 - 0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гочаков А. В., Антохина О. Ю., Крупчатников В. Н., Мартынова Ю. В. Долговременная изменчивость опрокидывания волн Россби в районе субтропического струйного течения // Метеорология и гидрология. – 2022.- № 2. - С. 5-19.
2. Volodin E. M., Mortikov E. V., Kostykin S. V., Galin V. Ya, Lykossov V. N., Gritsun A. S., Diansky N. A., Gusev A. V., Iakovlev N. G., Shestakova A. A., Emelina S. V. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2018.- V. 33. - №6.- P. 367–374.
3. Platov G., Krupchatnikov V., Gradov V., Borovko I., Volodin E. Analysis of the Northern hemisphere atmospheric circulation response to Arctic ice reduction based on simulation results. - Geosciences (Switzerland). – 2021.- № 9. - V.11. DOI: 10.3390/geosciences11090373
4. Wernli, H., and M. Sprenger. Identification and ERA-15 Climatology of Potential Vorticity Streamers and Cutoffs near the Extratropical Tropopause // J. Atmos. Sci. – 2007.- V.64. - P.1569–1586
5. Tibaldi S., Molteni F. On the Operational Predictability of Blocking // Tellus. - 1990. - 42A. - P. 343-365.
6. Charney J. G., Drazin P. G. Propagation of the planetary scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. // J. Geophys. Res. – 1961 - V.66. - P.83-109.
7. Plumb R. On the three-dimensional propagation of stationary waves. // J. Atmos. Sci. – 1985. - V.42.- P. 217-229.

© И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников, 2025