

**ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРАТОСФЕРЕ
ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ БАРОТРОПНОЙ
ДИВЕРГЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЦИРКУЛЯЦИИ**

О.С. Зоркальцева, В.И. Мордвинов

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
olgak@szf.irk.ru

**STUDY OF DYNAMIC PROCESSES IN THE STRATOSPHERE DURING SUDDEN STRATOSPHERIC
WARMINGS, USING NONLINEAR BAROTROPIC DIVERGENT CIRCULATION MODEL**

O.S. Zorkaltseva, V.I. Mordvinov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Цель работы состояла в тестировании баротропной дивергентной модели циркуляции, развиваемой в ИСЗФ. Модель учитывает нелинейные процессы, β -эффект и диффузию в тонком слое жидкости, внешнее возбуждение задается с помощью распределенных источников завихренности. В рамках тестирования модели с низким пространственным разрешением рассмотрены эффекты взаимодействия стратосферного полярного вихря с квазистационарным антициклоном над северо-востоком Азии и северной частью Америки и локальными циклоническими возмущениями.

Ключевые слова: атмосфера, моделирование.

Annotation. The main goal of the work is testing the barotropic divergent circulation model developed in the ISTP. The model considers nonlinear processes, β -effect and diffusion; external excitation is given by means of distributed sources of vorticity. We have considered the effects of interaction of a stratospheric polar vortex with a quasi-stationary anticyclone over north-east Asia and the northern part of America and local cyclonic disturbances in testing a model with a low spatial resolution.

Keywords: atmosphere, modeling.

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) представляют собой резкое, взрывное нарушение циркуляции в стратосфере, сопровождающееся разрушением Полярного вихря и значительным повышением температуры (порядка десятков градусов за несколько дней). Изучение ВСП имеет важное прикладное значение, т.к. резкие изменения циркуляции в стратосфере оказывают значительное влияние на общее содержание озона в атмосфере [Бекорюков и др., 1996], а динамика ВСП влияет на развитие погодных аномалий в тропосфере [Labitzke, 1965].

Были установлены регионы, в которых частота возникновения ВСП максимальна. Этими регионами являются северные части Атлантики и Тихого океана. Приблизительно в равном количестве ВСП наблюдаются над Европейским, Азиатским и Американским секторами Арктики [Руднева и др. 2013]. Из-за относительно небольших контрастов суши-океан ВСП в Южном полушарии возникают очень редко [Perlwitz, et al., 2003]. Анализ сборно-кинематических карт на высотах 10 гПа и карт относительной топографии в слое 1000–500 гПа показал наличие возмущений в тропосфере, предшествующих ВСП с задержкой 1–7 дней [Бурлуцкий и др., 1967].

Многочисленные исследования динамических процессов в стратосфере позволили построить эмпирические модели развития ВСП, динамику ВСП удалось воспроизвести в моделях общей циркуляции атмосферы [Варгин, Володин, 2016]. Однако количество ВСП, полученных в моделях, оказывается существенно меньше, чем количество ВСП

по данным наблюдений. Можно предположить, что в моделях не учитываются какие-то важные факторы, влияющие на развитие ВСП. Одним из таких факторов могут быть возмущения, распространяющиеся в стратосфере из низких широт. На это указывают, в частности результаты диагностики меридионального переносов с помощью методики крутильных колебаний [Кочеткова О.С. и др., 2014]. На рис. 1 приведен пример изменений со временем аномалий высоты, температуры и зональной компоненты скорости, усредненных в долготном интервале 60–150° E, на уровне 10 гПа в зимний период 1997–1998 гг. На диаграммы в виде графиков нанесены вариации температуры в полярной области и тропиках в широтных интервалах 60–75° N и 15° S – 15° N. Результаты сопоставлений совершенно определенно указывают на существование каких-то возмущений, дрейфующих в меридиональном направлении из низких широт в высокие и переносящих в область Полярного вихря количество движения и аномалии температуры. Эти возмущения могут возникать в тропиках, например, вследствие неадиабатического нагрева в конвективных ячейках Madden Julian Oscillation.

Такая возможность в настоящее время проверяется с помощью трехмерной модели средней и верхней атмосферы (МСВА) [Погорельцев, 2007], однако, по нашему мнению, относительно простые особенности взаимодействий локальных образований с Полярным вихрем и стратосферным антициклоном могут быть проверены в простой квазигеостро-

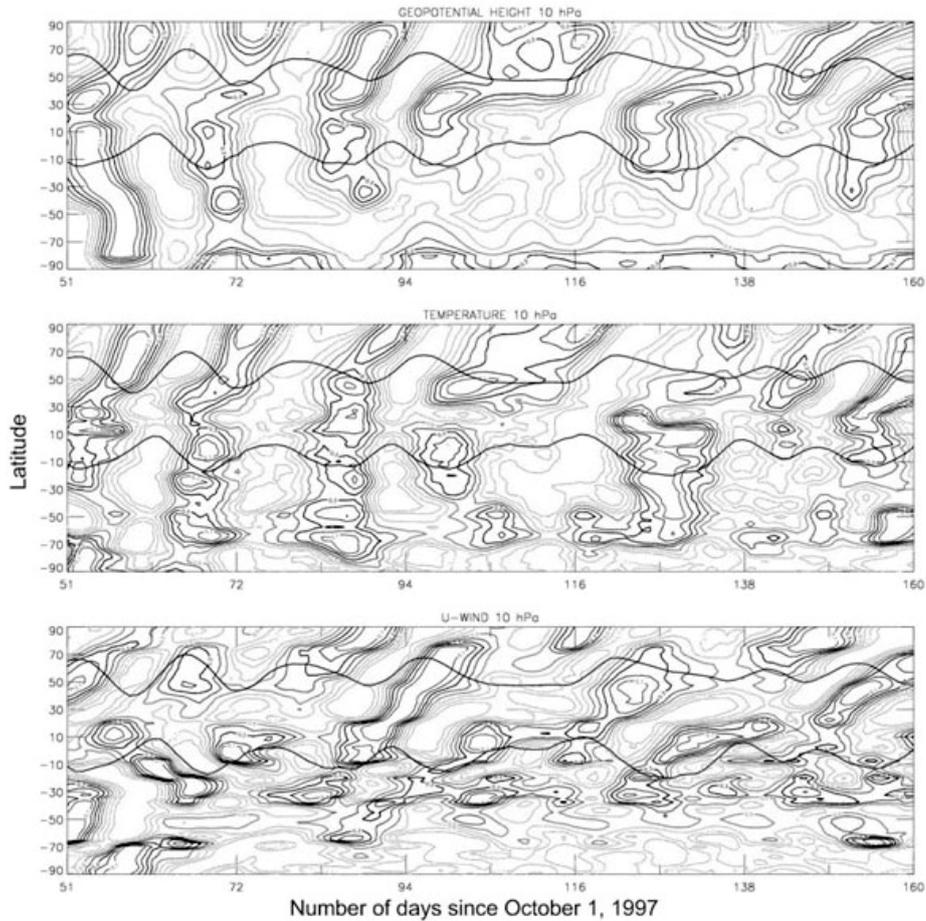


Рис. 1. Диаграммы крутильных колебаний на уровне 10 гПа за период с октября по февраль 1997–1998 гг., по данным о геопотенциале, температуре и зональной скорости ветра сверху вниз соответственно. Черная кривая — изменение температуры воздуха на уровне 10 гПа за этот же период

фической баротропной нелинейной дивергентной модели циркуляции. Уравнение модели имеет вид:

$$\frac{\partial(L\psi)}{\partial t} = \frac{1}{a^2} \left[\frac{\partial\psi}{\partial\mu} \frac{\partial(L\psi + lh_T/h_0)}{\partial\lambda} - \frac{\partial\psi}{\partial\lambda} \frac{\partial(L\psi + lh_T/h_0)}{\partial\mu} \right] - \left(1\right) - \frac{2\Omega}{a^2} \frac{\partial\psi}{\partial\lambda} - f - r\Delta\psi - K\Delta^2(\Delta\psi) + R,$$

где $L\psi \equiv (\Delta - L_D^{-2})\psi$, a — радиус Земли, $\psi = (g/l)h$ — функция тока, $h(\lambda, \theta)$ — свободная верхняя граница слоя жидкости, $h_T(\lambda, \theta)$ — фиксированная нижняя граница слоя жидкости h_0 — средняя толщина однородного слоя жидкости, $l = 2\Omega\mu$ — параметр Кориолиса, Ω — угловая скорость вращения Земли, $L_D \equiv \sqrt{gh_0}/l \approx \sqrt{gh_0}/2\Omega \sin 45^\circ$ — радиус деформации Россби — Обухова, λ — долгота, $\mu = \cos \theta$, θ — полярный угол, r — коэффициент релеевского трения (диссипация в пограничном слое), K — коэффициент турбулентной вязкости, R — внешний источник завихренности. Функция $f = f(\psi)$ характеризует форсинг, обусловленный мелкомасштабными вихрями.

Модель учитывает β -эффект, диффузию, обусловленную крупномасштабным трением и турбулентной вязкостью. В качестве начальных условий в модели задаются Полярный вихрь, стратосферные антициклоны (один или два), возмущение (циклоническое или антициклоническое), имитирующее барические аномалии, распространяющиеся из низких широт в высокие. Полярный вихрь и стратосферные антициклоны поддерживались внешним источником завихренности. С помощью данной модели мы пытались воспроизвести особенности меридионального дрейфа возмущений, распад Полярного вихря или его смещение в более низкие широты. Для численного решения уравнения использовался спектральный метод, шаг по времени составлял 0.01 сут. Устойчивость модели контролировалась вычислением на каждом шаге суммы квадратов коэффициентов разложения функции тока по сферическим гармоникам. Так как на первом этапе вычисления проводились на персональном компьютере, разложение по сферическим функциям ограничивалось гармоникой $n=13$ при треугольном усечении. На рис. 2 представлен пример расчета эволюции функции тока при задании в начальный момент времени Полярного вихря и антициклона, антициклонического возмущения с центром на широте 60° N.

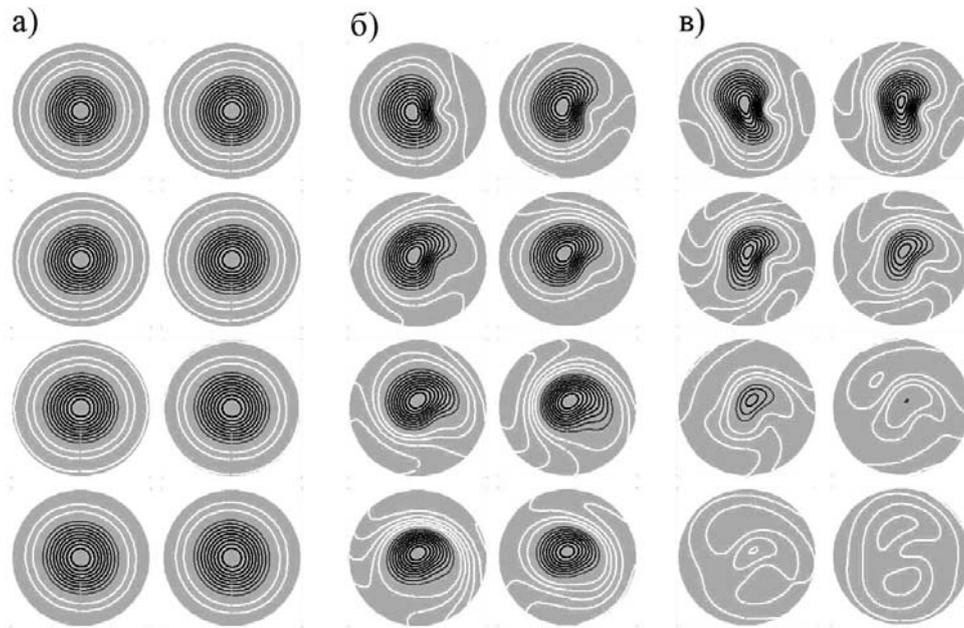


Рис. 2. Распределения функции тока: *а* — невозмущенные условия, *б* — с антициклоническим вихрем с центром с координатами 60° N 100° E, *в* — два антициклонических вихря над Азией 60° N 100° E и Америкой 60° N 120° W

На рис. 2, *а* приведены распределения функции тока через 2 сут в стереографической проекции в невозмущенных условиях (имитация зимней стратосферы), на рис. 2, *б* добавлен антициклонический вихрь над Азией, на рис. 2, *в* — два антициклонических вихря над Азией и Америкой. Полученные результаты, по крайней мере, при низком разрешении не подтверждают исходное предположение, что локализованные возмущения при заданном распределении циклонов и антициклонов могут перемещаться к полюсу и приводить к разрушению Полярного вихря. В случае с одним антициклоном мы видим, что существенной деформации полярного вихря не происходит. В случае с двумя антициклонами полярный вихрь значительно деформируется и разрушается, однако, не типичным для ВСП образом. Возможно, причиной является несовершенство модели, но может быть неверно исходное предположение о характере возмущений, которые приводят к крутильным колебаниям.

Список литературы

- Бекорюков В.И., Бугаева И.В., Захаров Г.Р. и др. О вкладе динамических процессов в формирование anomalно низких значений общего содержания озона в Северном полушарии // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9, № 9. С. 1233–1242.
- Бурлуцкий Р.Ф., Рафаилова Х.Х., Семенов В.Г., Храбров Ю.Б. Колебания общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1967. С. 152–200.
- Варгин П.Н., Володин Е.М. Анализ воспроизведения динамических процессов в стратосфере климатической моделью ИВМ РАН // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 1. 2016. С. 3–18
- Кочеткова О.С., Мордвинов В.И., Руднева М.А. Анализ факторов, влияющих на возникновение стратосферных потеплений // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т. 27, № 08. С. 719–727.
- Погорельцев А.И. Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вадцилляциями // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43, № 4. С. 463–475.
- Руднева М. А., Кочеткова О. С., Мордвинов В. И. Долговременные изменения внезапных стратосферных потеплений // *Изв. ИГУ.ку Серия «Науки о Земле»*. 2013. № 2. С. 148–156.
- Labitzke K. On the mutual relation between stratosphere and troposphere during period of stratospheric warming in winter // *J. Appl. Meteor.* 1965. V. 4. P. 91–99.
- Perlwitz J., Harnik N. Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection // *J. Clim.* 2003. V. 16. P. 3011–3026.