

УДК 551.513

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

В.И. Мордвинов, Е.В. Девятова, О.А. Оздобихина

EMPIRICAL RESEARCH AND MATHEMATICAL MODELING OF WINTERTIME LOW-FREQUENCY ATMOSPHERIC DISTURBANCES

V.I. Mordvinov, E.V. Devyatova, O.A. Oznobikhina

В работе с помощью метода одноточечных корреляций со сдвигом по времени по данным NCEP/NCAR Reanalysis исследуются низкочастотные возмущения в зимней атмосфере над Азией и приводятся результаты моделирования этих возмущений с помощью линеаризованной баротропной квазигеострофической модели.

In this work the wintertime low-frequency atmospheric disturbances over Asia are investigated, using lag-correlation patterns derived from time-filtered NCEP/NCAR Reanalysis data in the grid point 55 N, 108 E. The model simulations of these disturbances propagation in the quasigeostrophic approximation are realized.

Методика и данные

Для эмпирического исследования низкочастотных атмосферных возмущений был применен метод одноточечных корреляций со сдвигом по времени [Blackmon et al., 1984]. В качестве исходных данных были использованы среднесуточные значения зональной составляющей скорости ветра (U) в узлах регулярной сетки $2.5 \times 2.5^\circ$ архива NCEP/NCAR Reanalysis [Kalnay et al., 1996]. Временные ряды U обрабатывались следующим образом. Сначала скользящим средним выделялись колебания в диапазоне 5–30 сут. Затем со сдвигом по времени (от –9 до +6 сут для стратосферы, от –10 до +8 сут для тропосферы) рассчитывались распределения коэффициентов корреляции зональной скорости в узлах сетки $2.5 \times 2.5^\circ$ относительно вариаций U в реперной точке над Азией (55° N, 108° E). Для расчета корреляций был выбран интервал времени с 15 января по 15 марта – период наиболее интенсивной и неустойчивой циркуляции в стратосфере. Рассчитанные распределения коэффициентов корреляции усреднялись затем за 10-летние интервалы времени с целью удаления случайной составляющей. В данной работе приводятся распределения, осредненные за 1980–1990 гг.

Результаты эмпирического исследования

Стратосфера

На рис. 1 приведены распределения изокоррелят зональной составляющей скорости со сдвигом по времени, рассчитанные относительно реперной точки с координатами 55° N, 108° E на уровне 10 гПа. Изокорреляты нанесены в диапазоне от ± 0.1 до ± 0.9 . Изокоррелята 0.1 близка к уровню случайного фона, однако неплохо описывает крупномасштабную пространственную структуру колебаний, изокоррелята ± 0.2 уже явно характеризует структуру колебаний.

Динамику распределений можно представить в виде суммы двух компонентов. Компонент 1 – крупномасштабные аномалии, вращающиеся вокруг Северного полюса с востока на запад в высоких и умеренных широтах с периодом около 28 сут. Эти аномалии напоминают по структуре нормальные моды, амплитуда которых уменьшается от полюса к экватору, причем структура аномалий и скорость их пе-

ремещения вдоль параллелей неплохо соответствуют нормальной моде Y_4^1 , имеющей период 28.08 сут [Madden, 2007]. Компонент 2 – дрейфующие с востока на запад спиральные конфигурации, протяженность которых, увеличиваясь со временем, достигает при максимальных сдвигах более 360° по долготе. В цилиндрической проекции спирали представляют собой почти прямые линии, вытянутые с северо-востока на юго-запад и пересекающие экватор, что указывает на возможность переноса возмущений через экватор. Так как в тропической стратосфере в этот период преобладают направленные на запад ветры, подобная особенность не кажется тривиальной.

Суперпозиции компонентов 1 и 2 получаются при расчетах относительно большинства реперных точек в умеренных широтах Северного полушария за исключением района Северной Атлантики.

Тропосфера

На рис. 2 приведены распределения изокоррелят зональной составляющей скорости со сдвигом по времени, рассчитанные относительно реперной точки с координатами 55° N, 108° E на уровне 500 гПа. Видно, что динамика возмущений тесно связана с бегущими волнами. Начинаясь в районе северного побережья Сибири, возмущения смещаются сначала в южном направлении, а затем вдоль Тибета на восток и выходят на Дальневосточное побережье Тихого океана в широтной зоне $30\text{--}50^\circ$ N. Эта часть траектории возмущений напоминает распространение волны, огибающей дальневосточную ложбину Полярного вихря [Simmons et al., 1983]. Правда, размеры аномалий на корреляционных картах слишком велики для использования лучевого приближения. Возможна и другая интерпретация. На уровне 500 гПа возмущения встречают сильную западную струю, играющую роль волновода для планетарных волн. На волноводное распространение волн в западном потоке обращал внимание Бранстатор [Branstator, 1984]. Субтропическое струйное течение препятствует движению возмущений к югу [Branstator, 1984]. В нижней тропосфере (иллюстрация не приводится) возмущения достигают более низких широт. Кроме «круговорота» возмущений над восточной частью Евразии устой-

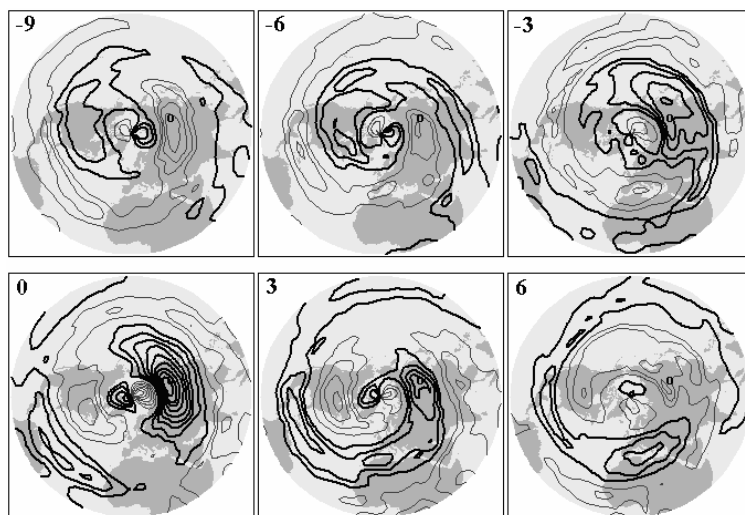


Рис. 1. Распределения коэффициентов корреляции колебаний зональной скорости в узлах сетки относительно колебаний зональной скорости в точке 55° N 108° E, рассчитанных за период с 15 января по 15 марта. Интервал осреднения 1980–1990 гг. Уровень 10 гПа.

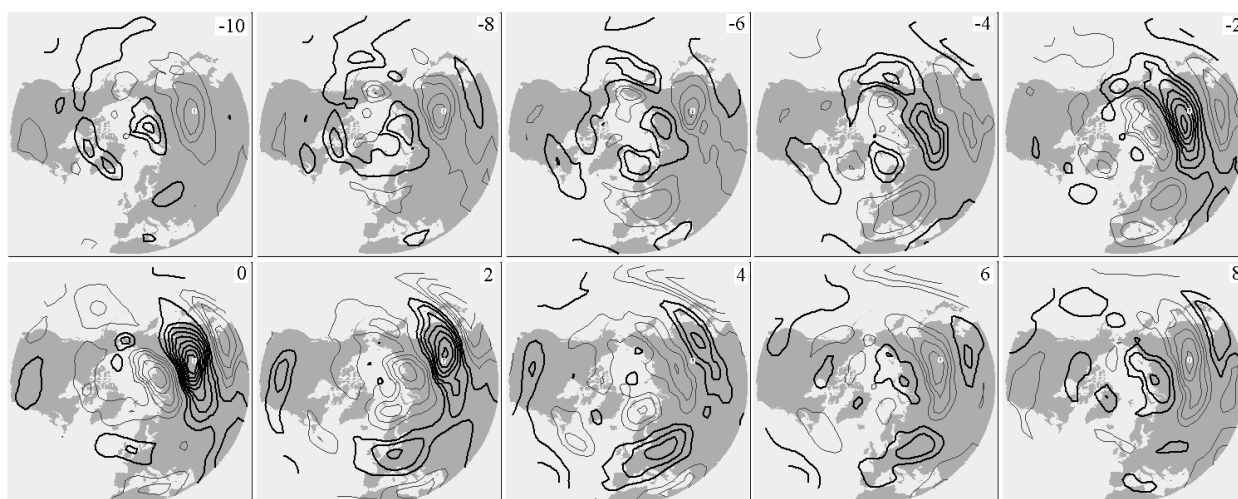


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для уровня 500 гПа.

чивой особенностью корреляционной картины является цуг аномалий над западной частью материка.

Модель

Для моделирования возмущений использовалось уравнение сохранения квазигеострофического потенциального вихря в сферической системе координат, в котором учитывались турбулентная вязкость и мелкомасштабное трение [Holton, 2004]:

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

где ψ – функция тока, R – источник завихренности (в общем случае зависящий от времени), r – коэффициент рэлеевского трения в пограничном слое, K – коэффициент горизонтальной диффузии, $\mu = \cos \theta$, a – радиус Земли, Ω – угловая скорость вращения Земли.

В стратосфере (рис. 3, а) источник завихренности R был задан в соответствии с результатами предварительного эмпирического анализа в виде

волны, бегущей вдоль северного побережья Евразии с востока на запад (компонента 1):

$$R = \partial(\Delta \bar{\psi}) / \partial t = A \operatorname{Re} \left\{ e^{i[k\lambda + \sigma t]} e^{-\left[(\lambda - \lambda_0)^2 / d_1 + (\theta - \theta_0)^2 / d_2 \right]} \right\},$$

$$\sigma = 2\pi / T, \quad T = 28 \text{ сут.}$$

В тропосфере (рис. 3, б) источник завихренности представлял собой волну, перемещающуюся по траектории, пересекающей восточную часть Евразии с северо-запада на юго-восток – так, как видно на картах одноточечных корреляций.

Результаты моделирования

Стратосфера

На рис. 4 приведены возмущения функции тока на тринадцатый день в стереографической и цилиндрической проекциях. Слева – для профиля угловой скорости $\alpha \sim \text{const}$ (западный перенос на всех широтах), справа – для профиля угловой скорости $\alpha \sim \sin^3(3\theta)$, моделирующего полосу восточных ветров

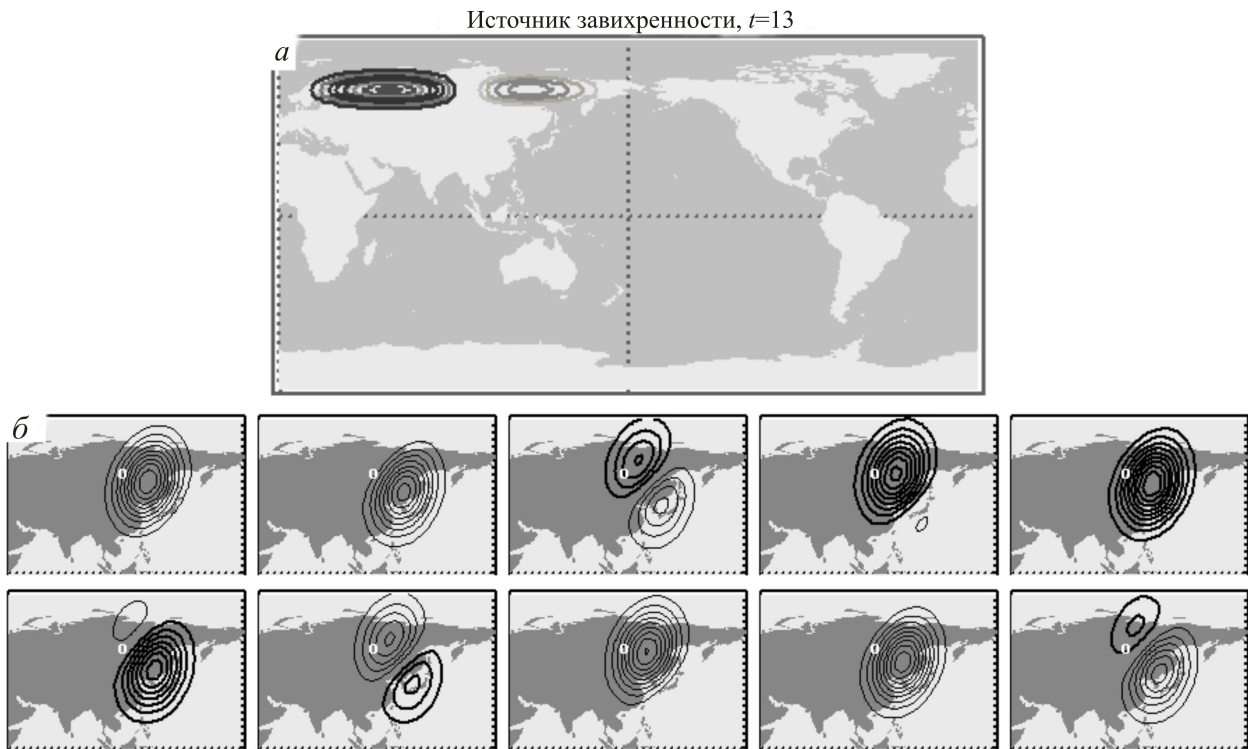


Рис. 3. Источники завихренности в стратосфере, перемещающиеся вдоль северного побережья Евразии с востока на запад (а). Изображены источники завихренности в момент времени $t=13$ сут. Конфигурации источника завихренности в тропосфере в дни, для которых выполнялись модельные расчеты (б).

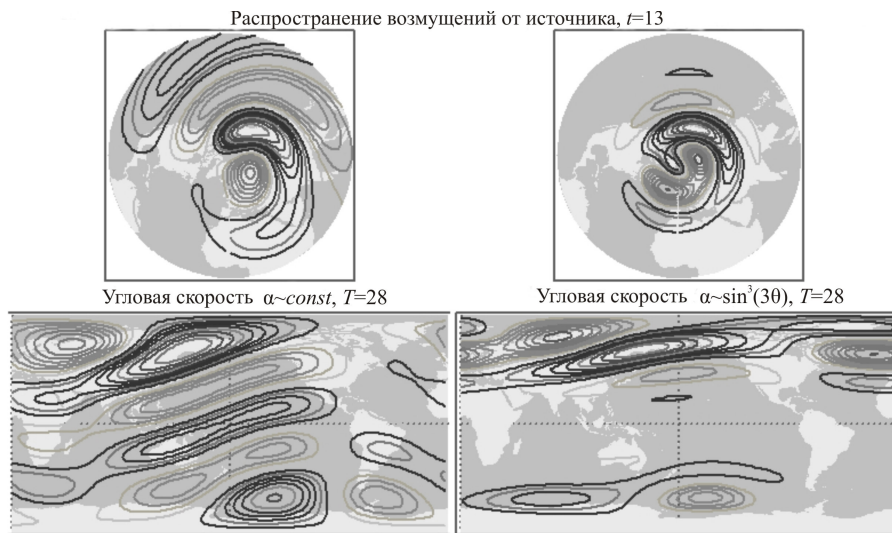


Рис. 4. Возмущения функции тока в стратосфере на тринадцатый день в стереографической и цилиндрической проекциях. Слева – для угловой скорости $\alpha \sim \text{const}$, справа – для $\alpha \sim \text{const}$ угловой скорости $\alpha \sim \sin^3(3\theta)$. Изолинии функции тока построены в относительных единицах. Серыми линиями обозначены изолинии положительных значений функции тока, черными – отрицательных.

в тропиках. Изолинии функции тока построены в относительных единицах. Разложение функции тока проводилось до $n=10$. Были заданы следующие параметры источника:

$$m = 2, \lambda_0 = 30 \times 2.5 = 75^\circ, \theta_0 = 37.5^\circ,$$

$$\Delta\lambda = 1000 \times (2.5)^2 = 6250^\circ,$$

$$\Delta\theta = 10 \times (2.5)^2 = 62.5^\circ.$$

Серыми линиями на рисунке показаны изолинии положительных значений функции тока, черными –

отрицательных. Полная картина динамики возмущений напоминает динамику реальных возмущений, выделенных с помощью метода одноточечных корреляций. Как можно видеть на приведенных рисунках, спиральные конфигурации появляются и в Южном полушарии даже при наличии в тропиках полосы восточных ветров. Это также соответствует реальным данным, однако не исключено, что причиной возникновения сверхдальнего распространения возмущений на рис. 4 являются особенности метода моделирования.

Тропосфера

На рис. 5, а приведены распределения возмуще-

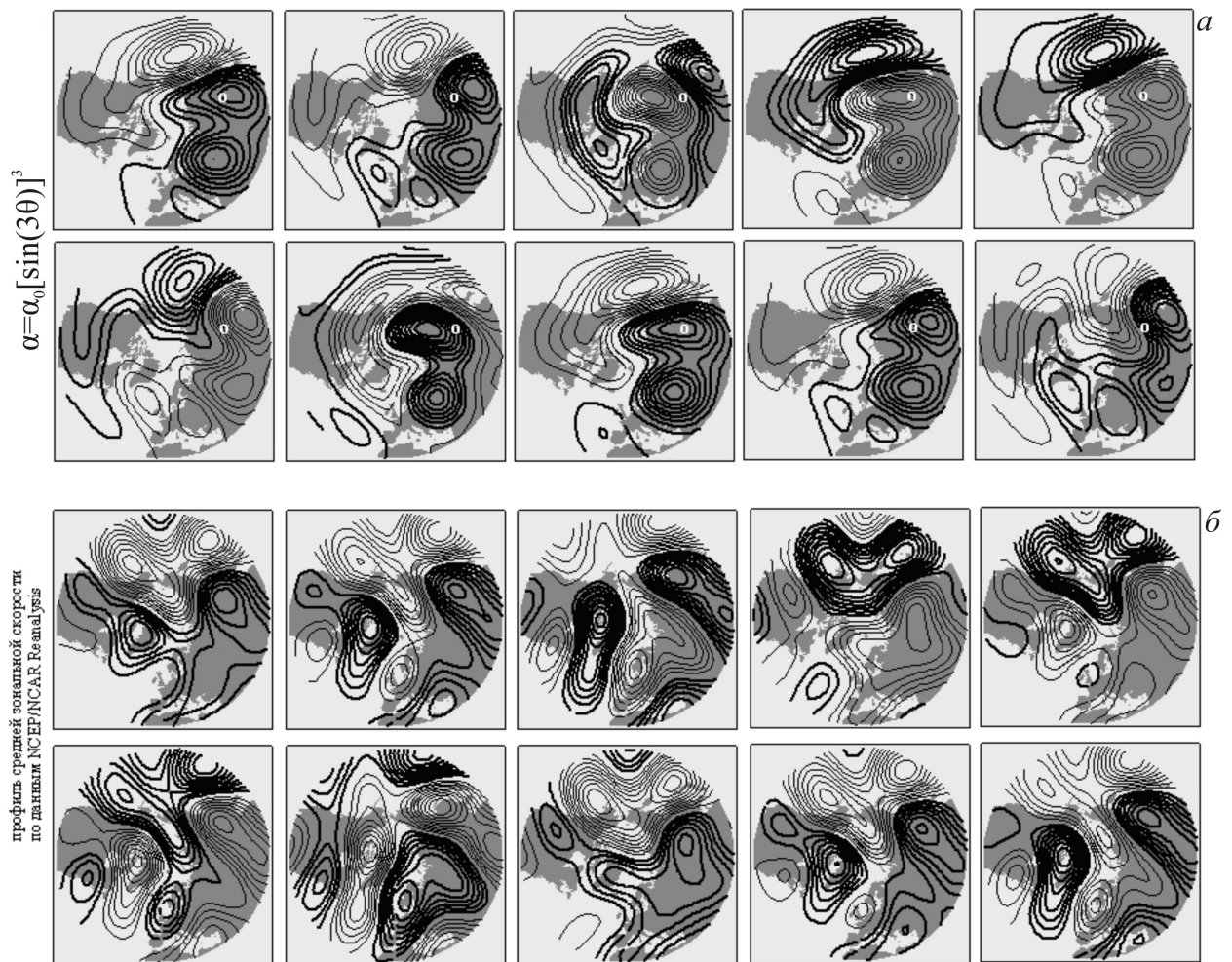


Рис. 5. Распределения возмущений функции тока, построенные для профиля средней зональной скорости $\alpha = \alpha_0 [\sin(3\theta)]^3$ (а). Расчеты возмущений функции тока для профиля средней зональной скорости, полученного по данным NCEP/NCAR Reanalysis на уровне 500 гПа в январе 1980 г. (б). Меридиональная компонента скорости для обоих случаев равна нулю.

ний функции тока, построенные для профиля средней зональной скорости $\alpha = \alpha_0 [\sin(3\theta)]^3$. Меридиональная компонента скорости принималась равной нулю. Рисунок воспроизводит одну из основных особенностей одноточечных корреляций – «круговорот» возмущений над восточной и северной частями Евразии. По результатам моделирования видно, что этот круговорот является следствием меридионального перемещения источника возмущений и динамики северного луча планетарных волн. Находят объяснение и особенности дальних связей к западу от полюса одноточечных корреляций в Сибири. Цуг волн с хорошо выраженной аномалией над Европой отчетливо виден на рис. 5, а и гораздо слабее в случае однородного западного переноса (рисунок не приводится). Очевидно, возникновение возмущений в этой области или их усиление является следствием отражения волн от восточного потока в тропиках.

«Круговорот» возмущений в восточной и северной частях континента, цуги волн к западу от источника возмущений видны и в том случае, если средний поток задается по данным наблюдений. На рис. 5, б приведены расчеты дисперсии двумерных волн Россби для профиля средней зональной скорости, полученного по данным NCEP/NCAR Reanalysis на

уровне 500 гПа в январе 1980 г. Меридиональная компонента скорости при расчете возмущений принималась равной нулю. Распределение зональной скорости предварительно сглаживалось. Для этого из разложения поля скорости по сферическим гармоникам исключались компоненты с $n > 6$. Динамика возмущений в реальном поле скорости оказалась сложнее, чем при задании гладкого аналитического профиля угловой скорости, однако основные особенности картины одноточечных корреляций сохранились. Хорошо видны «круговорот» возмущений над восточной частью Евразии и цуги волн к западу от источника.

Заключение

С помощью метода одноточечных корреляций со сдвигом по времени по данным NCEP/NCAR Reanalysis исследованы низкочастотные возмущения в зимней атмосфере над Азией и приведены результаты моделирования этих возмущений с помощью линейризованной баротропной квазигеострофической модели циркуляции. В стратосфере выделены два типа возмущений: аномалии, вращающиеся с востока на запад с периодом около 28 сут, и развивающиеся над Евразией спиральные конфигурации,

вероятно представляющие собой двумерные волны Россби, излучаемые возмущениями первого типа. При задании в модели в качестве источника возмущения первого типа в результате расчетов были получены аномалии, имеющие вид характерных спиралей, структура и динамика которых напоминают реальные стратосферные спиральные конфигурации. В тропосфере обнаружено движение возмущений над Азией, напоминающее круговорот с периодом около 16 сут, – бегущие возмущения пересекают восточную часть континента с северо-запада на юго-восток и затем вдоль океанического побережья возвращаются на север. В западной части континентов при этом периодически возникают и разрушаются цепочки аномалий. Моделирование позволило объяснить особенности одноточечных корреляций над континентами дисперсией двумерных волн Россби от бегущих источников. Был воспроизведен «круговорот» возмущений над Азией и цуги волн к западу от полюса одноточечных корреляций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Blackmon M.L., Lee Y.-H., Wallace J.M., Hsu H.-H. Time variation of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales as deduced from Lag-correlation statistics // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41, N 6. P. 981–991.

Branstator G. The relationship between zonal mean flow and quasi-stationary waves in the midtroposphere // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41, N 14. P. 2163–2178.

Holton J.R. *An Introduction to Dynamic Meteorology: Fourth Edition.* 2004. 535 p. (Intern. Geophys. Ser. V. 88).

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis project // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1996. V. 77. P. 437–471.

Madden R.A. Large-scale, free Rossby waves in the atmosphere – an update // *Tellus.* 2007. V. 59A. P. 571–590.

Simmons A.J., Wallace J.M., Branstator G.W. Barotropic wave propagation and instability, and atmospheric teleconnection patterns // *J. Atmos. Sci.* 1983. V. 40, N 6. P. 1363–1392.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск