

УДК 551.511

ВЛИЯНИЕ НЕГАУССОВОЙ СТАТИСТИКИ АТМОСФЕРНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ НА ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ВНУТРИМЕСЯЧНЫЕ АНОМАЛИИ

© 2017 г. С. В. Логинов^{a, *}, А. В. Елисеев^{b, c, d, **}, И. И. Мохов^{b, e, f}

^aИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055 Томск, Академический пр., 10/3

^bИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017 Москва, Пыжевский пер., 3

^cКазанский федеральный университет
420008 Казань, ул. Кремлевская, 8

^dИнститут прикладной физики РАН
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

^eМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, с. 2

^fМосковский физико-технический институт (государственный университет)
141700 Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер., 9

*E-mail: LogSV13@imces.ru

**E-mail: eliseev@ifaran.ru

Поступила в редакцию 24.02.2016 г.

После доработки 06.05.2016 г.

С использованием данных реанализа JRA-55 в тропосфере Северного полушария для 1976–2014 гг. проведен анализ асимметрии функций распределения вероятности (ФРВ) для ключевых атмосферных переменных. Отличающаяся от нуля асимметрия ФРВ указывает на отклонение ФРВ от нормального распределения. Анализ проводился для двух интервалов временных масштабов: синоптической изменчивости (СИ) – 2–7 сут и низкочастотной изменчивости (НИ) – 9–30 сут. Статистически значимые отклонения от нормального распределения вероятности имеют место в регионах наиболее часто формирования атмосферных бароклинических возмущений – над западными частями океанов средних широт и ниже по потоку в атмосфере. В интервале СИ для всей толщи свободной тропосферы выявляется отрицательная асимметрия вертикальной скорости в изобарических координатах, что согласуется с общим доминированием циклонических аномалий в этом интервале временных масштабов. В интервале НИ асимметрия этой переменной во всей свободной тропосфере положительна, что указывает на доминирование антициклонических аномалий на этих временных масштабах. Для зональной скорости, температуры и геопотенциала знак асимметрии ФРВ для изменчивости с временными масштабами 2–7 сут различен для верхней и нижней свободной тропосферы. Асимметрия ФРВ атмосферных переменных указывает на важную роль межмодового взаимодействия в развитии бароклинических возмущений. Соответствующие отклонения от нормального распределения, выявленные в верхней тропосфере субполярных и полярных широт для синоптической изменчивости, можно связать со взаимодействием этих возмущений и зимнего полярного вихря. Выявленные отклонения распределения вероятности от нормального распределения существенно увеличивают вероятность возникновения больших по абсолютной величине атмосферных аномалий по сравнению со случаем гауссовых ФРВ.

Ключевые слова: атмосферные вариации, атмосферные вихри, функции распределения вероятности

DOI: 10.7868/S0002351517030087

1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферная изменчивость связана с проявлением бароклинической неустойчивости и вихреволновой активностью в атмосфере. При этом детали различных моделей бароклинической неустойчивости заметно различаются между собой. В классической модели Чарни–Иди [1, 2] (см. также [3]) предполагается, что общая пространственная структура атмосферных возмуще-

ний определяется соответствующей структурой наиболее неустойчивой бароклинической волны. При этом задача о развитии этих возмущений становится линейной и не учитывает взаимодействие между различными бароклиническими волнами. Такое взаимодействие, как правило, нелинейно [4] и может быть важным на протяжении большей части жизни бароклинических атмосферных вихрей [5].

Достаточно детальный анализ вариаций в атмосфере как климатообразующего процесса включает анализ функций распределения вероятности (ФРВ) для атмосферных переменных [6–8]. В частности, такой анализ позволяет делать выводы о вкладе нелинейных взаимодействий в развитие бароклинных возмущений [9]. В линейном приближении для атмосферной динамики можно ожидать нормальных выборочных ФРВ основных переменных. Нелинейные взаимодействия, в свою очередь, могут приводить к негауссовым ФРВ.

Кроме того, традиционно атмосферная (метеорологическая) изменчивость подразделяется на компоненты, соответствующие разным интервалам временных и пространственных масштабов [10, 11]: высокочастотные – с периодом < 2 сут и зональные волновым числом $k > 9$, синоптические – с периодом 2–7 сут и $6 \leq k \leq 9$ и низкочастотные – с временными масштабами 10–30 сут и $4 \leq k \leq 6$. Различие пространственно-временных масштабов в этих интервалах, в принципе, способно приводить к разному вкладу нелинейных взаимодействий в общую динамику возникающих возмущений. Это, в свою очередь, может приводить и к различию форм ФРВ атмосферной (метеорологической) изменчивости для отмеченных интервалов временных масштабов.

Следует также иметь в виду, что полный анализ ФРВ атмосферных переменных, как правило, затруднен ввиду недостаточной длины соответствующих временных рядов. В связи с последним часто ограничиваются анализом отдельных характеристик ФРВ, таких как ее асимметрия или эксцесс. Например, асимметрия изменчивости ряда атмосферных переменных в тропосфере с временными масштабами 2–7 сут была проанализирована в [7–9, 12, 13]. Подобный анализ для геопотенциала и при выделении компонент изменчивости в соответствии с их пространственным масштабом в зональном направлении был проведен в [14]. При этом были выявлены существенные отклонения от нормального распределения в регионах генерации бароклинных возмущений над западными частями океанов средних широт. Это указывает на потенциально важную роль нелинейных межволновых взаимодействий в развитии атмосферных (погодных) возмущений и в целом согласуется с результатами [5].

Цель данной работы – развитие подхода, предложенного в [9, 12, 14], с расширением анализа для низкочастотной атмосферной (метеорологической) изменчивости. В частности, при использовании более длинных временных рядов и полосового фильтра с лучшей функцией пропускания детализируются результаты, полученные в [9, 12, 14]. Кроме того, делаются оценки влияния отклонений ФРВ возмущений в земной атмосфере от

гауссовых ФРВ на вероятность возникновения аномалий большой интенсивности.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД АНАЛИЗА

Оценки характеристик изменчивости флуктуаций геопотенциала H , температуры T и компонент скорости ветра (зональной u , меридиональной v , и вертикальной в изобарических координатах ω) были рассчитаны по данным реанализа JRA-55 [15] для 1976–2014 гг. с горизонтальным разрешением 1.25° и временным шагом 6 ч.

Для выделения флуктуаций с временными масштабами от 2.5 до 6 сут в [9, 16] использовался рекурсивный нуль-фазный фильтр Мураками [17]. Этот фильтр удобен при использовании коротких временных рядов из-за своего низкого порядка и, следовательно, малого числа точек, исключаемых из ряда при фильтрации. При выделении флуктуаций большего временного масштаба, например, с периодом 9–30 сут, пропускание фильтра распространяется и в высокочастотную область. Так, например, фильтр Мураками, построенный для интервала временных масштабов 8–30 сут пропускает 16% флуктуаций с масштабами 2–7 сут.

В данной работе используется полосовой частотный фильтр (ПЧФ) с ослаблением 25 дБ в низкочастотной полосе поглощения и 40 дБ в высокочастотной области. Он основан на нерекурсивном фильтре с конечной импульсной характеристикой, использующем весовое окно Хемминга. Для устранения постоянного фазового сдвига отфильтрованные данные пропускались через фильтр в прямом и обратном направлениях. Фильтрация проводилась для интервала синоптической изменчивости (СИ) с временными масштабами 2–7 сут [9–11, 16, 18] и интервала низкочастотной изменчивости (НИ) с временными масштабами 9–30 сут, связанного с формированием блокирующих антициклонов в атмосфере (хотя временной масштаб крупных окклюдированных циклонов с вертикальным масштабом, сравнимым с толщиной тропосферы, также находится в интервале НИ) и выделенного по их длительности [10, 11, 19–25]. Перекрытие используемого в данной работе фильтра между интервалами СИ и НИ составило доли процента (рис. 1).

Следует отметить, что в [22] использовался альтернативный подход к выделению низкочастотного масштаба, связанный с анализом горизонтальных масштабов соответствующих аномалий, а не их временных масштабов. В [14] анализ пространственных (а не временных) масштабов был использован для выделения синоптических вариаций. Подход, использованный в данной работе, представляется более удобным для анализа полей в эйлеровых координатах.

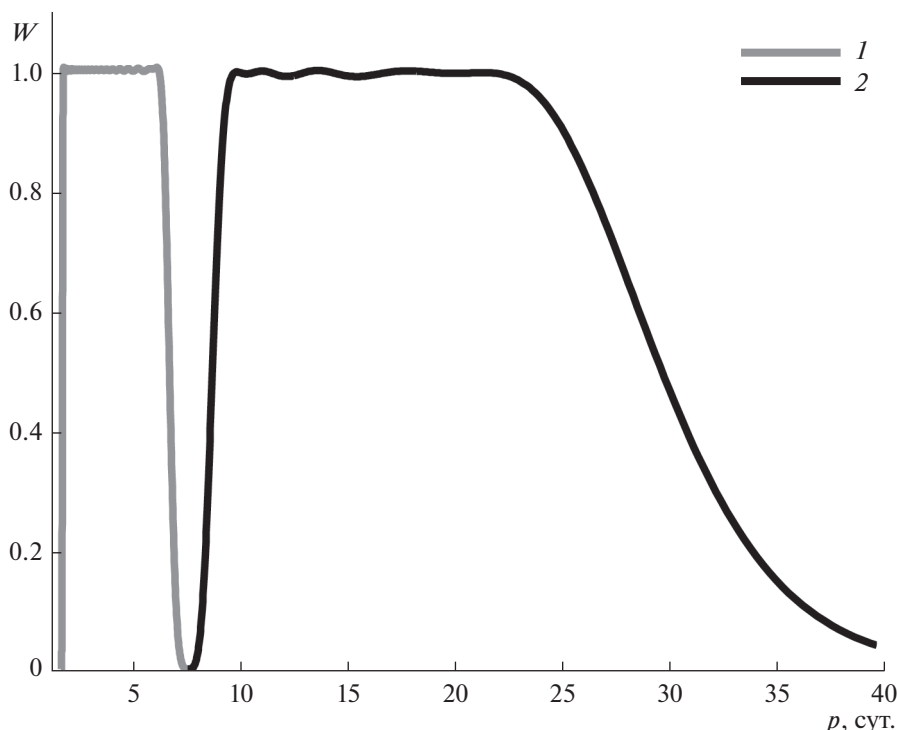


Рис. 1. Передаточная функция W используемого полосового фильтра в зависимости от периода p для интервалов синоптической и низкочастотной изменчивости (1 и 2 соответственно).

В качестве характеристики отклонения выборочной ФРВ (ВФРВ), полученной в результате фильтрации вариаций X' (центрированных по построению) от нормального используется асимметрия S :

$$S_X = \langle X'^3 \rangle / \sigma_X^3, \tag{1}$$

где σ_X – стандартное отклонение ряда X' , угловые скобки означают математическое ожидание. Для нормально распределенного случайного процесса $S_X = 0$. Однако для нормально распределенного временного ряда конечной длины стандартное отклонение оценки S для нормального процесса равно [9, 12, 14]

$$\sigma_{S,G} = (6 / N_{\text{eff}})^{1/2}, \tag{2}$$

где N_{eff} – количество степеней свободы фильтрованного ряда, вычисляемое как $N_{\text{eff}} = N(1 - r_1)$, где N – длина этого ряда, r_1 – его коэффициент корреляции с единичным лагом [9]. Величину

$$s = S_X / \sigma_{S,G} \tag{3}$$

можно использовать в качестве характеристики отклонения от нормального распределения вероятности [9, 14].

Следует иметь в виду, что подобный подход, строго говоря, применим лишь к временным рядам, а не к случайным полям. В случае случайного поля в эйлеровых координатах в ряде точек нуле-

вая гипотеза (в данной работе формулируемая как нормальность ВФРВ) в силу статистических закономерностей будет отвергнута ошибочно. При этом взаимная корреляция в соседних узлах пространственной сетки, которая используется для представления данных, может привести к проявлению ложных структурных особенностей достаточно большого пространственного масштаба [26]. В связи с этим статистическая значимость полученных результатов для поля S оценивалась методом FDR (false discovery rate; алгоритм BY01 из [26]).

Унимодальная ФРВ φ может быть приближена старшими слагаемыми ряда Эджворта [27]:

$$\varphi(\xi) \approx \varphi_G(\xi) - (S/6)\varphi_G'''(\xi), \tag{4}$$

где $\xi = X'/\sigma$, σ – стандартное отклонение X' , $\varphi_G(\xi)$ – нормальная ФРВ с единичной дисперсией, $\varphi_G'''(\xi)$ – ее третья производная. В этом случае вероятности того, что $X' > p$ и $X' < q$ соответственно равны

$$A_{+,p} = \int_p^\infty \varphi(\xi) d\xi = 1/2[1 - \text{erf}(p/\sqrt{2})] + M \exp(-p^2/2)(p^2 - 1) = A_{+,p,G} + M \exp(-p^2/2)(p^2 - 1), \tag{5}$$

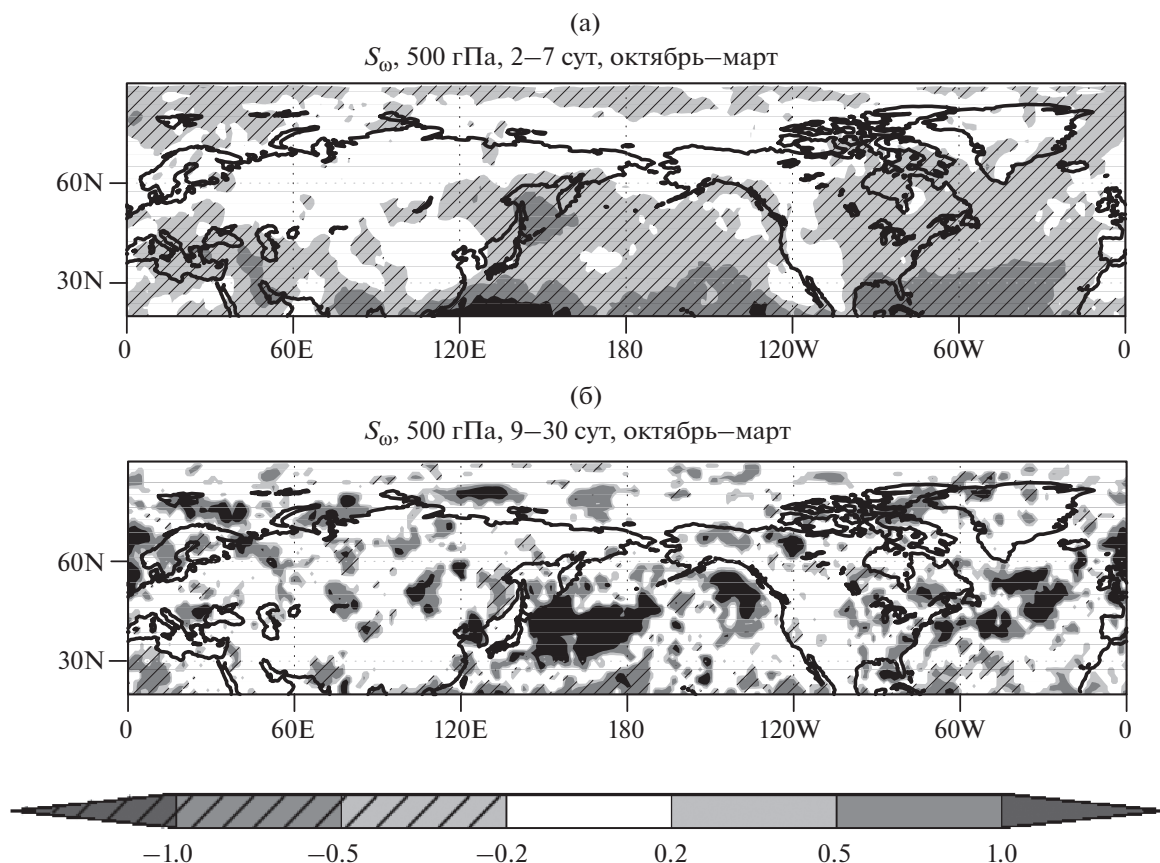


Рис. 2. Асимметрия выборочной функции распределения вероятности вертикальной скорости ω на уровне 500 гПа в октябре–марте для интервалов временных масштабов 2–7 сут (а) и 9–30 сут (б). Поля сглажены 9-точечным квадратным пространственным фильтром. Отмечены лишь узлы расчетной сетки с $|s| > 2$ ($s = S_{\chi}/\sigma_{S, G}$, см. (3)).

$$\begin{aligned}
 A_{-,q} &= \int_{-\infty}^q \varphi(\xi) d\xi = 1/2[1 + \operatorname{erf}(q/\sqrt{2})] - \\
 &- M \exp(-q^2/2) (q^2 - 1) = \\
 &= A_{-,q,G} - M \exp(-q^2/2) (q^2 - 1),
 \end{aligned} \quad (6)$$

где $M = S/[6(2\pi)^{1/2}]$, $\operatorname{erf}(\cdot)$ – функция ошибок. В свою очередь, отношения $A_{+,p}/A_{+,p,G}$ и $A_{-,q}/A_{-,q,G}$ при положительном p и отрицательном q соответственно характеризуют влияние негауссовости ФРВ на вероятности развития больших по модулю аномалий X' . Для компактности в дальнейшем будет использоваться комбинация этих отношений при $q = -p$:

$$R_p = \begin{cases} A_{+,p}/A_{+,p,G} & \text{при } S > 0, \\ A_{-,-p}/A_{-,-p,G} & \text{при } S < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Анализ проводился отдельно для холодного (октябрь–март) и теплого (апрель–сентябрь) полугодий в Северном полушарии. Для всех переменных результаты анализа различаются не принципиально для разных полугодий. В связи с этим в

данной работе приведены количественные оценки только для холодного полугодия с более высокой статистической значимостью полученных результатов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Асимметрия функции распределения вероятности аномалий атмосферных переменных

Для асимметрии вертикальной скорости в изобарических координатах S_{ω} (здесь и далее нижний индекс характеризует соответствующую атмосферную переменную) для обоих анализируемых интервалов временных масштабов характерна однородная по вертикали структура. Полученная для интервала синоптических масштабов асимметрия выборочной функции распределения вероятности отрицательна во все сезоны в большинстве регионов вне тропиков с типичными значениями от -0.2 до -1 (рис. 2а). Это согласуется с [9], но при этом характеризуется более высокой статистической значимостью (что можно связать с большей длиной анализируемых данных) и получено с ис-

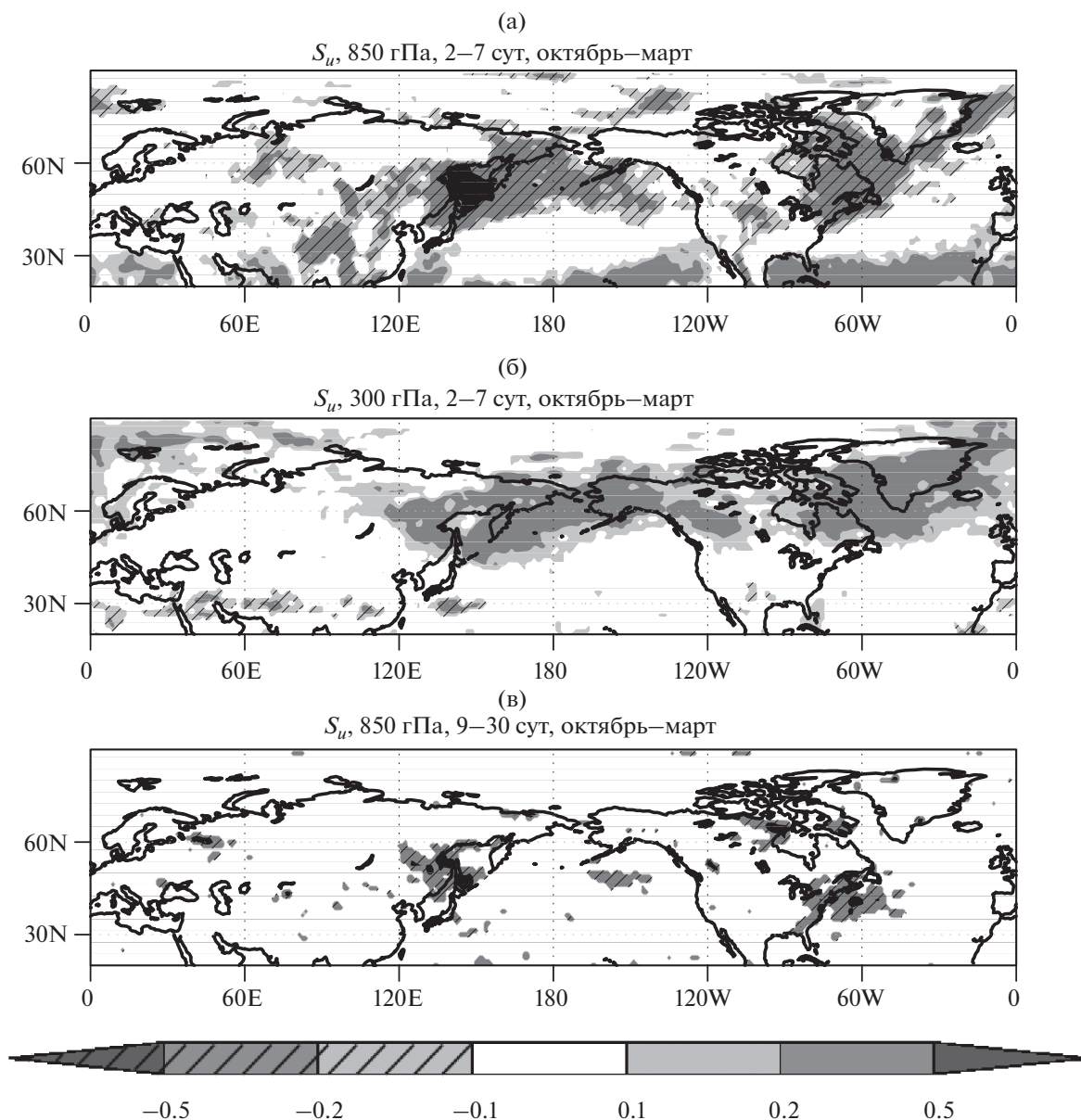


Рис. 3. Аналогично рис. 2, но для асимметрии выборочной функции распределения вероятности зональной скорости в октябре–марте для интервала временных масштабов 2–7 сут на уровнях 850 и 300 гПа (а и б соответственно) и интервала временных масштабов 9–30 сут на уровне 850 гПа (в).

пользованием другого полосового фильтра и другого массива данных – в [9] использовался реанализ ERA-40. Полученные результаты согласуются также с [12], где использовались данные реанализа NCEP-NCAR без полосовой фильтрации. В [9] отрицательная асимметрия ω в СИ была интерпретирована, во-первых, как отражение доминирования в этом интервале временных масштабов циклонических возмущений над антициклоническими, во-вторых – как результат нелинейного взаимодействия различных циклонических бароклинных мод между собой. Для НИ над западными частями океанов средних широт и в регионах, расположенных ниже их по потоку в атмосфере,

отмечены статистически значимые положительные величины S_ω с типичными значениями от +0.2 до +1 (рис. 2б). В этих регионах отмечается наиболее значимое взаимодействие низкочастотных атмосферных вихрей со средним потоком [28]. Как следствие, такая положительная асимметрия может быть связана со взаимодействием антициклонических возмущений со средним потоком (см. также [29, 30]).

Характерной особенностью асимметрии ВФРВ других переменных для интервала масштабов 2–7 сут является смена знака S в средней тропосфере. При этом для интервала 9–30 сут знак асимметрии

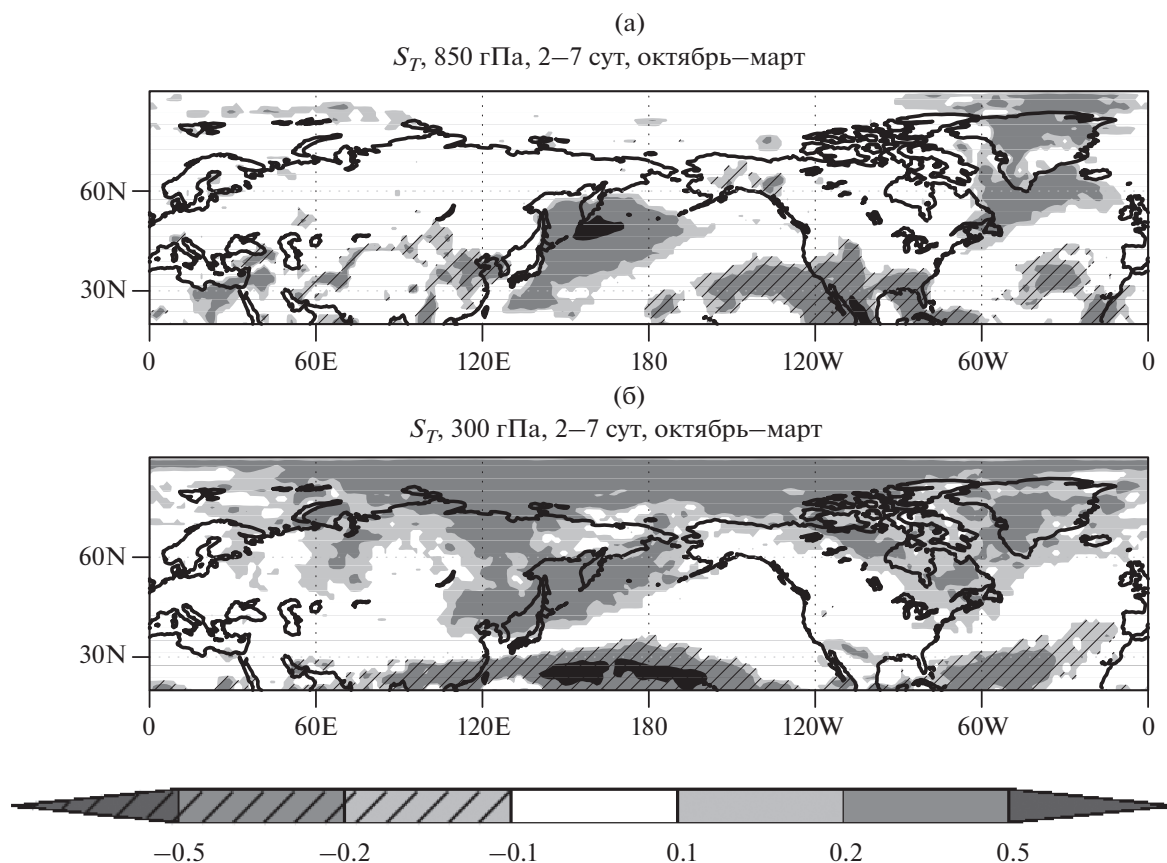


Рис. 4. Аналогично рис. 2, но для асимметрии выборочной функции распределения вероятности температуры в октябрь–марте для интервала временных масштабов 2–7 сут на уровнях 850 гПа (а) и 300 гПа (б).

не меняется в анализируемом слое атмосферы. Для большинства регионов в первом интервале временных масштабов отклонения от нормальной ФРВ являются статистически значимыми: вероятность ошибочного непринятия нулевой гипотезы о нормальности не превышает 5%. Для второго интервала временных масштабов статистическая значимость значительно меньше, и значимые отклонения от нормальной ФРВ отмечаются лишь в ограниченном числе регионов.

Асимметрия зональной скорости S_u отрицательна для интервала СИ в нижней тропосфере средних широт, особенно над океанами (рис. 3а). Ее значения в этих регионах меняются от -0.1 до -1 . В средней тропосфере эта асимметрия статистически незначима в этих регионах, а в верхней становится положительной, но с меньшими по модулю значениями (≤ 0.5 ; рис. 3б). Эти результаты также согласуются с [9, 12]. Для НИ статистически значимые отрицательные оценки S_u , по модулю не превышающие 0.5, выявляются только в нижней тропосфере для основных регионов генерации бароклинных возмущений в атмосфере (рис. 3в). Отрицательная асимметрия зонального ветра в этом интервале временных масштабов

проявляется также для ряда континентальных регионов средних широт, например над Европой, над севером Северной Америки и на Дальнем Востоке. В первых двух регионах она, по-видимому, связана с атмосферными блокировками, в частности, зимой [21, 31]. При этом $S_u < 0$ может быть интерпретирована как проявление замедления базового потока при формировании блокирующих антициклонов. Следует, однако, отметить, что в других регионах частого развития блокирующих образований в атмосфере [21, 31] не выявлена статистически значимая ненулевая S_u . В регионе Дальнего Востока отрицательные значения S_u могут быть связаны с муссонной активностью.

Для меридионального ветра результаты для СИ в целом подобны полученным в [9, 12] и характеризуются меньшими по сравнению с зональным ветром и другими переменными горизонтальными масштабами. Для НИ асимметрия ВФРВ оценена статистически незначимой.

Для температуры над океанами средних и субполярных широт для СИ асимметрия положительна (рис. 4) в согласии с результатами [9, 12]. При этом области, где S_T отличается от нуля статистически значимо, различаются для нижней и

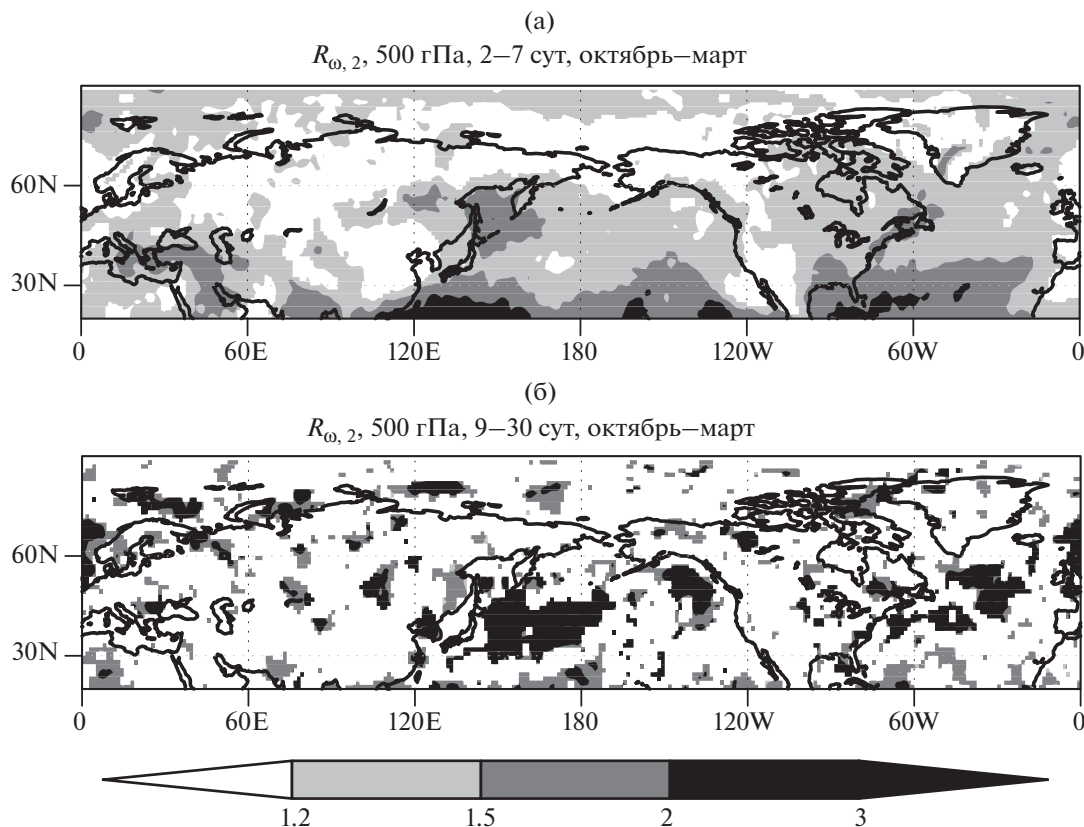


Рис. 5. Отношение R_p (см. (7)) для вертикальной скорости ω на уровне 500 гПа в октябре–марте для интервалов временных масштабов 2–7 сут (а) и 9–30 сут (б). Поля сглажены 9-точечным квадратным пространственным фильтром. Отмечены лишь узлы расчетной сетки с $|s| > 2$ (см. (3)).

верхней тропосферы. В нижней тропосфере они расположены в западных океанических регионах генерации бароклинной неустойчивости, где S_u меняется от 0.1 до 1. В верхней тропосфере, наряду с отмеченными океаническими регионами, положительная статистически значимая асимметрия (с типичными значениями в несколько десятых) выявлена также в субполярных и высоких широтах. Она может быть связана со взаимодействием волн Россби с полярным вихрем. В средней тропосфере статистическая значимость отличных от нуля значений S_T минимальна.

Для геопотенциала в обоих интервалах временных масштабов результаты подобны полученным для температуры, но с худшей статистической значимостью. При этом для СИ результаты согласуются с полученными в [12, 14].

3.2. Влияние асимметрии функций распределения вероятности на вероятность развития больших по абсолютной величине аномалий

Влияние асимметрии ФРВ на вероятность развития больших по абсолютной величине аномалий атмосферных (метеорологических) перемен-

ных может быть оценено с использованием (7). Для компактности в данной работе обсуждается лишь случай $p = 2$. Этот случай для нормального распределения соответствует аномалиям, абсолютные значения которых находятся в верхнем положительном (отрицательном) 5%-ном интервале при положительной (отрицательной) асимметрии.

Для СИ вертикальной скорости в большинстве регионов на всех высотах в свободной тропосфере эта вероятность увеличивается в полтора-два раза по сравнению со случаем нормального распределения вероятности вертикальной скорости (рис. 5а). Для НИ регионы заметного и статистически значимого отличия $R_{\omega, 2}$ от единицы выявлены лишь над западной частью океанов в средних широтах (рис. 5б). Однако значения $R_{\omega, 2}$ для интервала временных масштабов 9–30 сут в этих регионах больше, чем для СИ, в ряде узлов расчетной сетки достигая пяти.

Для аномалий зональной скорости с временными масштабами в интервале 2–7 сут в регионах со статистически значимой S_u значения $R_{u, 2}$ достигают двух в нижней тропосфере и полтора – в

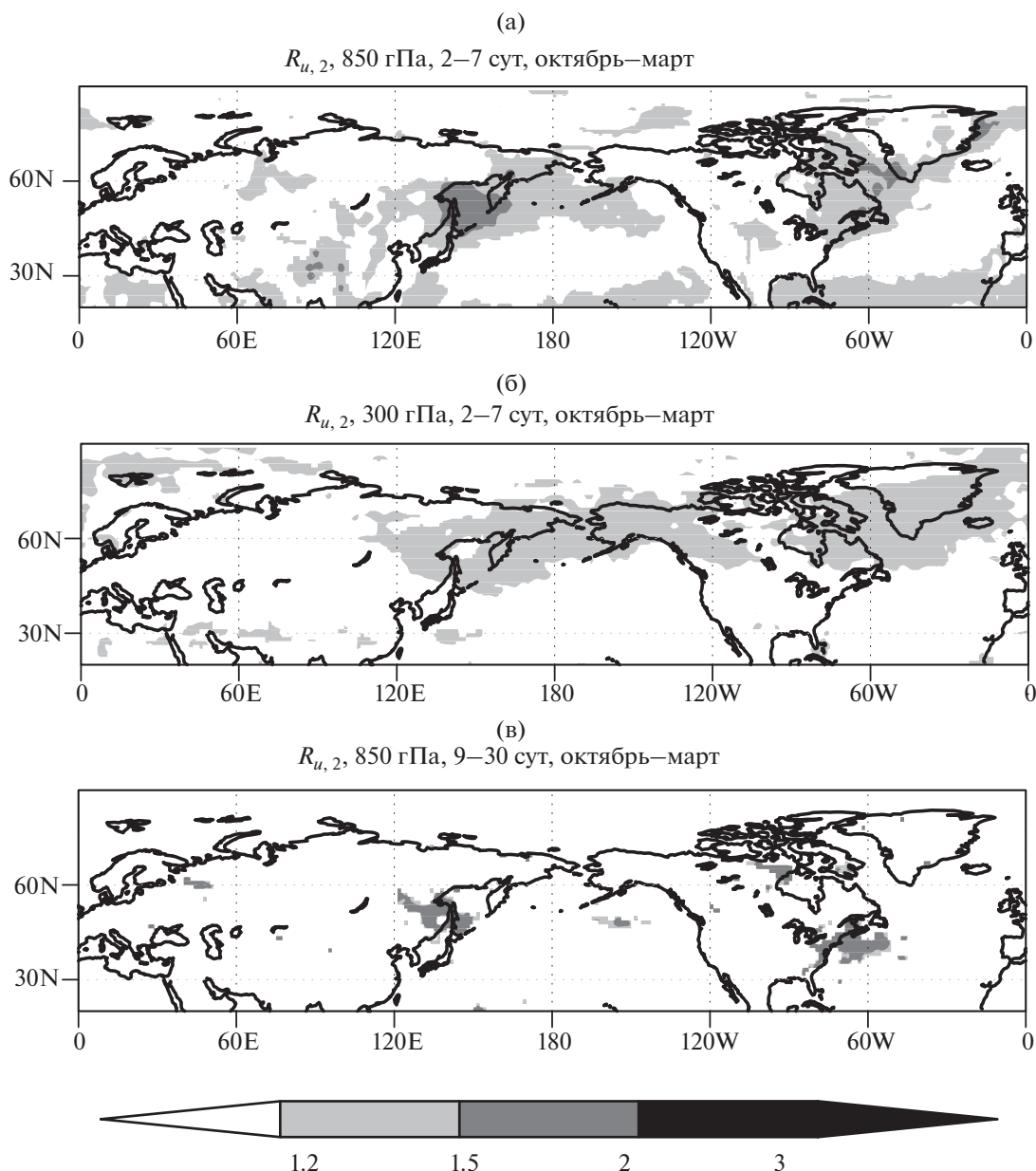


Рис. 6. Аналогично рис. 5, но для зональной скорости в октябре–марте для интервала временных масштабов 2–7 сут на уровнях 850 и 300 гПа (а и б соответственно) и интервала временных масштабов 9–30 сут на уровне 850 гПа (в).

верхней (рис. 6а, 6б). Для НИ размер регионов с $R_{u,2} > 1.2$ мал даже в нижней тропосфере, а сами эти регионы относятся к областям генерации бароклинных возмущений над западной частью океанов средних широт (рис. 6в). При этом в нижней тропосфере отмеченных регионов $R_{u,2}$ достигает двух.

Для температуры в СИ в регионах над западной частью океанов средних широт в нижней тропосфере выявляются области с $R_{T,2}$, достигающим

2 (рис. 7а). К верхней тропосфере в этих регионах $R_{T,2}$ уменьшается примерно до 1.5, но проявляются регионы с подобными значениями в высоких широтах.

Как и для асимметрии, результаты влияния негауссовости атмосферных (погодных) аномалий на вероятность возникновения больших по абсолютной величине аномалий геопотенциала подобны соответствующим результатам для температуры.

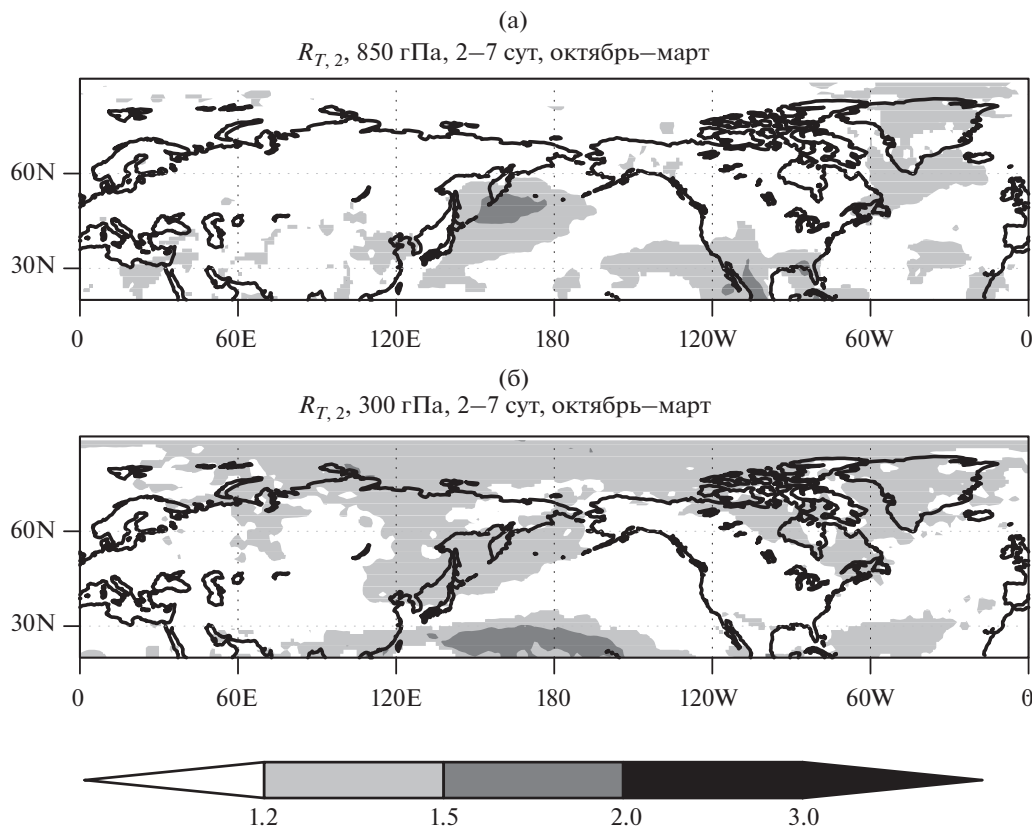


Рис. 7. Аналогично рис. 5, но для температуры в октябре–марте для интервала временных масштабов 2–7 сут на уровнях 850 гПа (а) и 300 гПа (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием данных реанализа JRA-55 в тропосфере Северного полушария для 1976–2014 гг. с горизонтальным разрешением 1.25° и временным шагом 6 ч оценено влияние отклонений функций распределения вероятности значений атмосферных переменных от нормальных ФРВ. Анализ проводился для двух интервалов временных масштабов: синоптической изменчивости (2–7 сут) и низкочастотной изменчивости (9–30 сут), выделенных с использованием полосового фильтра.

Статистически значимые отклонения асимметрии ФРВ от нулевого значения (соответствующего нормальному распределению вероятности) отмечены, прежде всего, для регионов генерации бароклинных возмущений в атмосфере. В интервале временных масштабов, соответствующем синоптической (низкочастотной) изменчивости, во всей толще свободной тропосферы выявляется отрицательная (положительная) асимметрия вертикальной скорости в изобарических координатах. Это согласуется с общим доминированием циклонических (антициклонических) аномалий в этом интервале временных масштабов (см. также [13]). Для зональной скорости, температуры и геопотенциала знак асимметрии ФРВ для изменчивости с вре-

менными масштабами 2–7 сут различен для верхней и нижней свободной тропосферы. Полученные результаты для интервала синоптической изменчивости согласуются с [9, 12, 14], но получены по другому массиву данных и с использованием другого полосового фильтра.

Ненулевая асимметрия ФРВ атмосферных переменных в нижней свободной тропосфере (а для вертикальной скорости – во всей толще свободной тропосферы) указывает на отличие функций распределения вероятности аномалий с временными масштабами от 2 до 30 сут от нормального распределения. Такое отличие в целом соответствует теоретическим результатам, указывающим на важную роль взаимодействий между отдельными бароклинными волнами при развитии бароклинных возмущений (более подробно см. [5, 9]). Соответствующие отклонения от нормального распределения, выявленные в верхней атмосфере субполярных и полярных широт для синоптической изменчивости, могут быть связаны со взаимодействием этих возмущений и зимнего полярного вихря.

Для низкочастотной изменчивости атмосферных переменных статистическая значимость полученных результатов ниже, чем для синоптической. Одной из причин этого может быть меньшая роль нелинейных взаимодействий в формировании этой

изменчивости. Кроме того, из-за большего времени автокорреляции число степеней свободы в НИ меньше, чем в СИ и может быть недостаточным для получения статистически значимых результатов.

Отклонения распределения вероятности для атмосферной изменчивости, выявленные в данной работе, существенно влияют на оценки вероятности возникновения больших по абсолютной величине погодных аномалий. Для обоих интервалов временных масштабов вероятность развития атмосферных аномалий, по модулю превышающих удвоенное стандартное отклонение, увеличивается в полтора-два раза по сравнению со случаем нормальных ФРВ в регионах генерации бароклинных возмущений над западной частью океанов средних широт. Для низкочастотной изменчивости вертикальной скорости это увеличение достигает пятикратного значения. Следует, однако, отметить, что теорема о сходимости ряда Эджворта неизвестна. Как следствие, соответствующие количественные (но не качественные) результаты могут оказаться чувствительны к неучету следующих слагаемых в этом ряде.

В данной работе не рассматривались характеристики ФРВ для атмосферного пограничного слоя. Следует отметить, что негауссовость статистических распределений ветра у поверхности может быть связана с трением в пограничном слое, коэффициент которого нелинейно связан со скоростью самого ветра [32].

Авторы выражают благодарность Ю. Куртсу, В.К. Петухову, А.М. Фейгину и О.Г. Чхетиани за полезные обсуждения, а также рецензенту за конструктивные замечания к предыдущей версии статьи. Работа выполнена при поддержке грантов Правительства РФ (соглашение 14.Z50.31.0033 с ИПФ РАН), РФФИ и в рамках программ РАН. Результаты анализа атмосферной изменчивости в связи с особенностями циклонической и антициклонической активности, в частности в средних широтах, получены при поддержке гранта РНФ-14-17-00806. Результаты, связанные с арктическими широтами, получены при поддержке гранта РНФ-14-17-00647.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Charney J.G.* The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current // *J. Meteorol.* 1947. V. 4. № 5. P. 135–162.
2. *Eady E.T.* Long waves and cyclone waves // *Tellus.* 1949. V. 1. № 3. P. 33–52.
3. *Калашник М.В.* О резонансном и квазирезонансном возбуждении бароклинных волн в модели Иди // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51. № 6. С. 648–657.
4. *Гледзер Е.Б., Должанский Ф.В., Обухов А.М.* Системы гидродинамического типа и их применение. М.: Наука, 1981. 368 с.
5. *Farrell B.F.* The initial growth of disturbances in a baroclinic flow // *J. Atmos. Sci.* 1982. V. 39. № 8. P. 1663–1686.
6. *Монин А.С.* Введение в теорию климата. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 246 с.
7. *Акперов М.Г., Бардин М.Ю., Володин Е.М. и др.* Функции распределения вероятностей циклонов и антициклонов по данным реанализа и модели климата ИВМ РАН // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43. № 6. С. 764–772.
8. *Голицын Г.С., Мохов И.И., Акперов М.Г. и др.* Функции распределения вероятности для циклонов и антициклонов в период 1952–2000 гг.: инструмент для определения изменений глобального климата // *ДАН.* 2007. Т. 413. № 2. С. 254–256.
9. *Petoukhov V., Eliseev A.V., Klein R. et al.* On statistics of the free-troposphere synoptic component: an evaluation of skewnesses and mixed third-order moments contribution to the synoptic dynamics and fluxes of heat and humidity // *Tellus A.* 2008. V. 60. № 1. P. 11–31.
10. *Blackmon M.L., Wallace J.M., Lau N.-C. et al.* An observational study of the Northern Hemisphere winter-time circulation // *J. Atmos. Sci.* 1977. V. 34. № 7. P. 1040–1053.
11. *Blackmon M.L., Lee Y-H., Wallace J.M.* Horizontal structure of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41. № 6. P. 961–980.
12. *Perron M., Sura P.* Climatology of non-Gaussian atmospheric statistics // *J. Climate.* 2013. V. 26. № 3. P. 1063–1083.
13. *Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А.* Циклон-антициклонная асимметрия в атмосфере экваториальных широт Северного полушария // *ДАН.* 2015. Т. 462. № 6. С. 711–715.
14. *Holzer M.* Asymmetric geopotential height fluctuations from symmetric winds // *J. Atmos. Sci.* 1996. V. 53. № 10. P. 1361–1379.
15. *Kobayashi S., Ota Y., Harada Y. et al.* The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics // *J. Meteor. Soc. Japan.* 2015. V. 93. № 1. P. 5–48.
16. *Christoph M., Ulbrich U., Haak U.* Faster determination of the intraseasonal variability of storm tracks using Murakami's recursive filter // *Mon. Wea. Rev.* 1995. V. 123. № 2. P. 578–581.
17. *Murakami M.* Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area // *Mon. Wea. Rev.* 1979. V. 107. № 8. P. 994–1013.
18. *Hoskins B.J., Hodges K.I.* New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 59. № 6. P. 1041–1061.
19. *Мохов И.И., Петухов В.К.* Блоклинги и тенденции их изменения // *ДАН.* 1997. Т. 337. № 5. С. 687–689.
20. *Lupo A.R., Oglesby R.J., Mokhov I.I.* Climatological features of blocking anticyclones: a study of Northern Hemisphere CCM1 model blocking events in present-day and double CO₂ concentration atmospheres // *Clim. Dyn.* 1997. V. 13. № 3. P. 181–195.
21. *Barriopedro D., Garcia-Herrera R., Lupo A.R. et al.* A climatology of Northern Hemisphere blocking // *J. Climate.* 2006. V. 19. № 5. P. 1042–1063.
22. *Луно А.Р., Мохов И.И., Достоглоу С.И.* др. Оценка влияния процессов планетарного масштаба с анализом фазовых траекторий и энтропии на распад

- блокингов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 52–60.
23. Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А и др. Блокинги в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // ДАН. 2013. Т. 449. № 5. С. 582–586.
 24. Mokhov I.I., Timazhev A.V., Lupo A.R. Changes in atmospheric blocking characteristics within Euro-Atlantic region and Northern Hemisphere as a whole in the 21st century from model simulations using RCP anthropogenic scenarios // Glob. Planet. Change. 2014. V. 122. P. 265–270.
 25. Мохов И.И., Тимажев А.В. Модельные оценки возможных изменений атмосферных блокировок в Северном полушарии при RCP-сценариях антропогенных воздействий // ДАН. 2015. Т. 460. № 2. С. 210–214.
 26. Ventura V., Paciorek C.J., Risbey J.S. Controlling the proportion of falsely rejected hypotheses when conducting multiple tests with climatological data // J. Climate. 2004. T. 17. № 22. С. 4343–4356.
 27. Кендалл М., Стюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966. 588 с.
 28. Hoskins B.J., James I.N., White G.H. The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems // J. Atmos. Sci. 1983. V. 40. № 7. P. 1595–1612.
 29. Charney J.G., DeVore J.G. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking // J. Atmos. Sci. 1979. V. 36. № 7. P. 1205–1216.
 30. Buizza R., Palmer T.N. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation // J. Atmos. Sci. 1995. V. 52. № 9. P. 1434–1456.
 31. Wiedenmann J.M., Lupo A.R., Mokhov I.I. et al. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic // J. Climate. 2002. V. 15. № 21. P. 3459–3473.
 32. Monahan A.H. The probability distribution of sea surface wind speeds. Pt I: Theory and SeaWinds observations // J. Climate. 2006. V. 19. № 4. P. 497–520.

Impact of Non-Gaussian Statistics of Atmospheric Variables on Extreme Intramonth Anomalies

S. V. Loginov^{a,*}, A. V. Eliseev^{b,c,d,**}, and I. I. Mokhov^{b,e,f}

^a Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Akademicheskii pr. 10/3, Tomsk, 634055 Russia

^b Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 3, Moscow, 119017 Russia

^c Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya 8, Kazan, 420008 Russia

^d Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Ul'yanova 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

^e Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia

^f Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Institutskii per. 9, Dolgoprudny, Moscow oblast, 141700 Russia

*e-mail: LogSV13@imces.ru

**e-mail: eliseev@ifaran.ru

Received February 24, 2016; in final form, May 6, 2016

Abstract—The analysis of asymmetry of probability distribution functions (PDF) is carried out for key atmospheric variables using the JRA-55 reanalysis data in the troposphere of the Northern Hemisphere for 1976–2014. The nonzero asymmetry of the PDF indicates the deviation of the PDF from the normal distribution. The analysis was carried out for two time-scale intervals: synoptic variability (SV) of 2–7 days and low-frequency variability (LV) of 9–30 days. Statistically significant deviations from the normal probability distribution occur in the regions of the most frequent formation of atmospheric baroclinic perturbations, i.e., over the western parts of the oceans in midlatitudes and downstream in the atmosphere. In the SV time-scale interval, a negative asymmetry of the vertical velocity is revealed in isobaric coordinates for the entire thickness of the free troposphere, which agrees with the overall dominance of cyclonic anomalies in this interval of time scales. In the LV interval, the asymmetry of this variable in the entire free troposphere is positive, which indicates the dominance of anticyclonic anomalies at these time scales. For the zonal velocity, temperature, and geopotential, the asymmetry sign of the PDF for variability with time scales of 2–7 days is different for the upper and lower free troposphere. The asymmetry of the PDF for atmospheric variables indicates the important role of the intermode interaction in the formation of baroclinic perturbations. The corresponding deviations of synoptic variability from the normal distribution, which is found in the upper troposphere of the subpolar and polar latitudes, can be related to the interaction of these perturbations with the winter polar vortex. These deviations of PDF from the normal distribution substantially increase the probability of the appearance of large (in absolute value) anomalies as compared to the case of the Gaussian PDF.

Keywords: atmospheric variations, atmospheric vortices, probability distribution function