

УДК 551.583

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ИНДЕКС АКТИВНОСТИ АТМОСФЕРНЫХ БЛОКИРОВАНИЙ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ

© 2022 г. И. И. Мохов^{a, b, *}, А. В. Тимажев^a

^aИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский переулок, д. 3, Москва, 119017 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, строение 2, Москва, 119991 Россия

*e-mail: mokhov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 27.06.2022 г.

После доработки 20.07.2022 г.

Принята к публикации 11.08.2022 г.

Для характеристики суммарной активности атмосферных блокирований (блокингов) для протяженных областей на разных временных интервалах предложен новый интегральный индекс. Интегральный индекс, характеризующий долю площади с атмосферным блокированием в конкретной области в течение определенного временного интервала, использовался в двух версиях — одномерной и более детальной — двумерной. С использованием данных реанализа для 4 десятилетий (1979–2018 гг.) получены оценки степени общей подверженности российских регионов и Северного полушария (СП) в целом действию атмосферных блокирований в разные сезоны и в среднем за год. Наибольшие значения интегрального индекса, зависящего от частоты, длительности и размеров атмосферных блокингов для России и СП в целом получены для летнего сезона. Наибольшая межгодовая изменчивость проявляется в зимние сезоны. С использованием кросс-вейвлетного анализа отмечены существенные различия когерентности межгодовых вариаций интегрального индекса для российских регионов и для СП в целом для разных сезонов. При этом проявляется их значимая когерентность для наиболее долгопериодных (междесятилетних) вариаций сезонных значений интегрального индекса, за исключением весенних сезонов.

Ключевые слова: атмосферные блокинги, интегральный индекс, данные реанализа, корреляционный и кросс-вейвлетный анализ, Северное полушарие, российские регионы, сезонные особенности, межгодовая изменчивость

DOI: 10.31857/S0002351522060116

ВВЕДЕНИЕ

Сильнейшие региональные погодно-климатические аномалии связаны с продолжительными атмосферными блокированиями зонального переноса в тропосфере средних широт, с формированием, в частности, засух летом и морозов зимой. Аномалии атмосферной циркуляции в режимах блокирования (блокинги) длительностью от нескольких суток до двух месяцев приводят к формированию аномалий температурного и гидрологического режимов. Для диагностики особенностей атмосферных блокингов используются разные методы [1–23]. При этом для разных характеристик блокингов, включая их частоту, длительность, интенсивность, размеры проявляются существенные различия в изменениях, вплоть до противоположных. Особенности межгодовой изменчивости и междесятилетних изме-

нений характеристик атмосферных блокингов зависят не только от региона и сезона, но и от временных интервалов, для которых оцениваются долгопериодные тенденции. Это связано, в частности, с особенностями региональной и глобальной климатической изменчивости с влиянием ключевых крупномасштабных мод климатической изменчивости типа явлений Эль-Ниньо/Южного колебания, Северо-Атлантического и мультдесятилетнего Атлантического колебаний, Арктического колебания, Тихоокеанских десятилетней и мультдесятилетней осцилляций и др. [24–28]. Значимо также влияние квазидвухлетней цикличности [29, 30]. Как отмечено в [29], особенности квазидвухлетней цикличности проявляются в изменениях многих характеристик тропосферы и стратосферы в различных широтах — от экваториальных до полярных. В том числе, согласно

[30] учет квазидвухлетней цикличности существенно сказывается на предсказуемости Северо-Атлантического колебания — значимого индикатора атмосферной и климатической изменчивости в Северном полушарии (СП).

С целью совместного учета изменений разных характеристик атмосферных блокингов в [11] предложено оценивать их интегральные эффекты специальной характеристикой — аналогом действия с размерностью [энергия]х[время]. Подобной характеристикой оценивается общий энергетический потенциал атмосферных блокингов за время их существования с учетом возможного притока и оттока энергии для этих образований как открытых подсистем. В данной работе для характеристики атмосферных блокирований предлагается использовать другой интегральный индекс. Наряду с предложенным И.И. Моховым и С.А. Ситновым одномерным вариантом интегрального индекса блокирования (МС-версия интегрального индекса) для оценки суммарной активности атмосферных блокирований для разных регионов и временных интервалов используется двухмерная версия интегрального индекса блокирования (см., напр., [22, 23]).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

В данной работе представлены оценки интегрального индекса атмосферных блокирований с использованием локального индекса блокирования [22, 23]. Интегральный индекс блокирования I_I для долготного сектора $\Delta\lambda$ на временном интервале Δt (длительностью N_τ суток) определялся следующим образом:

$$I_I = \sum N_i(\lambda_i) / N_\tau N_\lambda,$$

где $i = 1, 2, \dots, N_\lambda$, $N_\lambda = \Delta\lambda / \delta\lambda$, $N_i(\lambda_i) = \sum n_{ij}(\lambda_i, t_j)$, n_{ij} — характеризует долю i -ой долготной ячейки с выполнением локальных условий блокирования в j -ый интервал времени, $j = 1, 2, \dots, N_\tau$, $N_\tau = \Delta t / \delta t$, δt — шаг по времени. Величина I_I , характеризующая долю широтно-долготных ячеек анализируемого региона в условиях атмосферного блокирования за весь анализируемый период, далее приводится в процентах.

В качестве локального индекса для детектирования атмосферных блокирований можно использовать разные подходы (см., напр., [14, 20]). В частности, блокирования западного переноса в тропосфере средних широт достаточно просто диагностируются с использованием подхода, предложенного в [2], и его модификации в [5]. Согласно [2] атмосферное блокирование можно диагностировать индексом I , определяемым для каждой дол-

готы λ разностью значений геопотенциальной высоты H на уровне 500 гПа между субтропическими (40° с.ш.) и субполярными (60° с.ш.) широтами:

$$I(\lambda) = H(\lambda)_{40^\circ N} - H(\lambda)_{60^\circ N}.$$

Области атмосферного блокирования с характерным масштабом порядка масштаба Обухова для баротропной атмосферы проявляются при выполнении условий

$$I < 0,$$

$$I(\lambda - 15^\circ) + I(\lambda) + I(\lambda + 15^\circ) < 0,$$

в диапазоне долгот не менее 30° от $(\lambda - 15^\circ)$ до $(\lambda + 15^\circ)$ в течение не менее 5 суток.

Интегральный индекс блокирования I_I можно определить также с использованием двухмерного локального индекса блокирования — с детектированием широтно-долготных ячеек с атмосферным блокированием (с шагом $\delta\phi$ по широте и $\delta\lambda$ по долготе) [23] (МТ-версия интегрального индекса — $I_I(\Pi)$), в отличие от использовавшегося в [22] интегрального индекса, зависящего только от долготы без широтной детализации — одномерного индекса (МС-версии — $I_I(I)$). В данной работе представлены оценки двухмерного интегрального индекса блокирования с использованием локального критерия блокирования, определяемого аналогично [10] с необходимым условием его выполнения не менее 5 суток подряд. В том числе представлены результаты анализа атмосферных блокирований в широтном поясе 40 – 75° с.ш. и отдельно в евразийском (российском) секторе от 20° в.д. до 180° в.д. Анализировались также особенности режимов атмосферных блокирований в Евро-Атлантическом (60° з.д.– 60° в.д.) и Тихоокеанском (150° в.д.– 120° з.д.) секторах.

При анализе использовались данные реанализа NCEP/DOE (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>) с широтно-долготным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ для 40-летнего периода 1979–2018 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 приведены межгодовые вариации интегрального индекса активности атмосферных блокирований $I_I(\%)$ для СП в целом для летнего (а, в) и зимнего (б, г) сезонов с использованием одномерного (а, б) и двухмерного (в, г) индексов блокирования. Сравнение рис. 1а, 1б и рис. 1в, 1г свидетельствует о том, что оценки I_I с использованием одномерного индекса могут существенно превышать полученные с использованием более детального двухмерного индекса. Это связано с тем, что в случае I область блокирования, при вы-

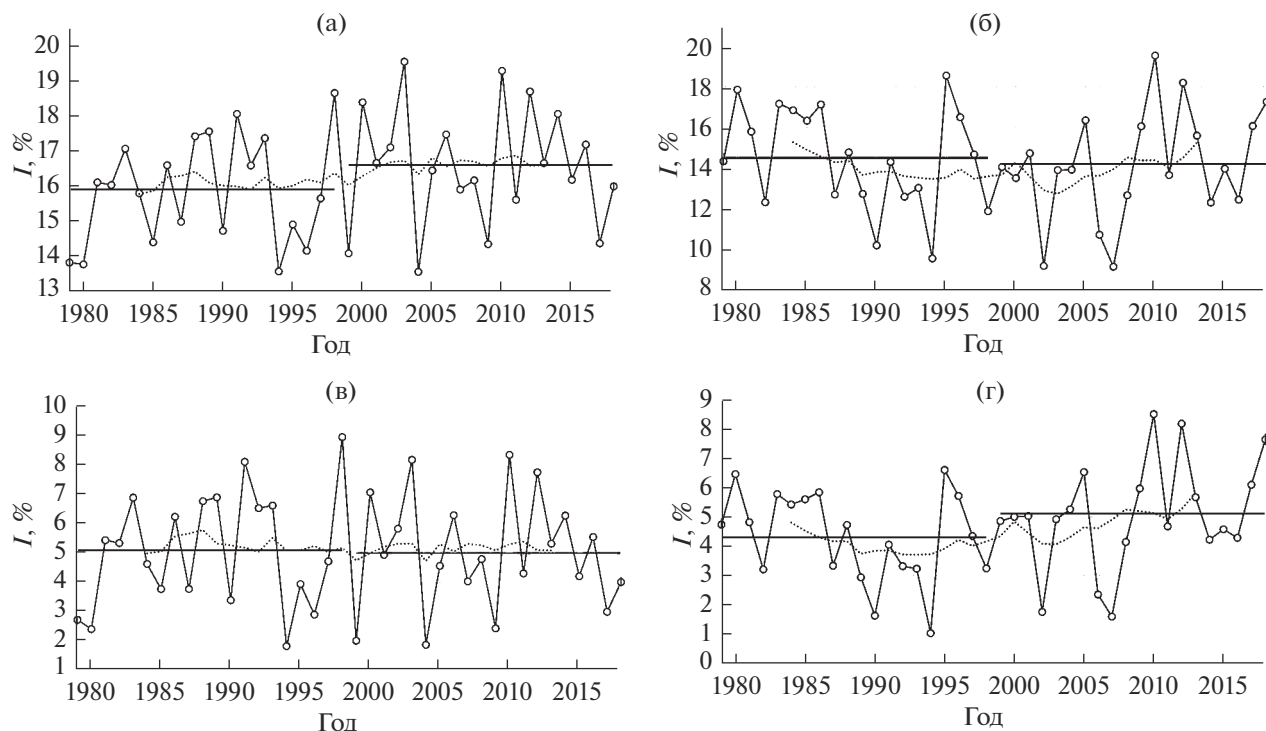


Рис. 1. Межгодовые вариации интегрального индекса активности атмосферных блокирований I_I (в %) для СП в целом для летнего (а, в) и зимнего (б, г) сезонов с использованием одномерного (а, б) и двухмерного (в, г) интегральных индексов блокирования. Горизонтальными линиями отмечены средние значения индекса I_I для периодов 1979–1998 гг и 1999–2018 гг., пунктир соответствует 11-летнему скользящему осреднению.

полнении локального условия распространяется на весь широтный пояс $40\text{--}75^\circ$ с.ш. и это может быть оценкой сверху при определении интегрального индекса блокирования. Следует отметить, что при значительном различии средних значений I_I для двух рассматриваемых версий особенности межгодовых вариаций их среднесезонных значений для СП в целом подобны.

На рис. 2 представлены соответствующие межгодовые вариации интегрального индекса активности атмосферных блокирований I_I (%) для России в целом для летнего (а, в) и зимнего (б, г) сезонов с использованием одномерного (а, б) и двухмерного (в, г) индексов блокирования. Сравнение рис. 2а, 2б и рис. 2в, 2г для России в целом также, как и сравнение 1а, 1б и рис. 1в, 1г для СП в целом, свидетельствует о том, что оценки I_I с использованием одномерного индекса (МС-версия) могут в три и более раз превышать полученные с использованием двухмерного индекса (МТ-версия). При этом особенности межгодовых вариаций их среднесезонных значений для России в целом при использовании обеих версий интегрального индекса также подобны как для летних сезонов, так и для зимних.

В изменениях интегрального индекса атмосферных блокирований в течение последних десятилетий стоит выделить некоторые особенности межгодовых и более долгопериодных вариаций. В частности, в летние сезоны высокие значения I_I для СП в целом и одномерной и в двухмерной версиях получены в 2003 г. и 2010 г., когда были отмечены сильнейшие волны жары в Западной Европе и на европейской территории России (рис. 1а, в). Высокие значения I_I для получены также для 1998 г. и 2012 г. При этом для перехода между 2003 г. и 2004 г., а также для переходов между 1998 г. и 1999 г. и между 1993 г. и 1994 г. отмечено сильное межгодовое падение летних значений I_I для СП в целом. Сильный межгодовой рост летних значений I_I для СП в целом получен для перехода между 2009 г. и 2010 г., а также для перехода между 1999 г. и 2000 г. В последние годы — после 2010 г. — проявилась тенденция уменьшения интегрального индекса летних блокирований I_I в СП, а до этого на фоне общего роста межгодовых вариаций и максимальных значений I_I для их средних 11-летних значений в целом отмечался слабый рост. При этом для зимних сезонов на фоне большой межгодовой изменчивости в

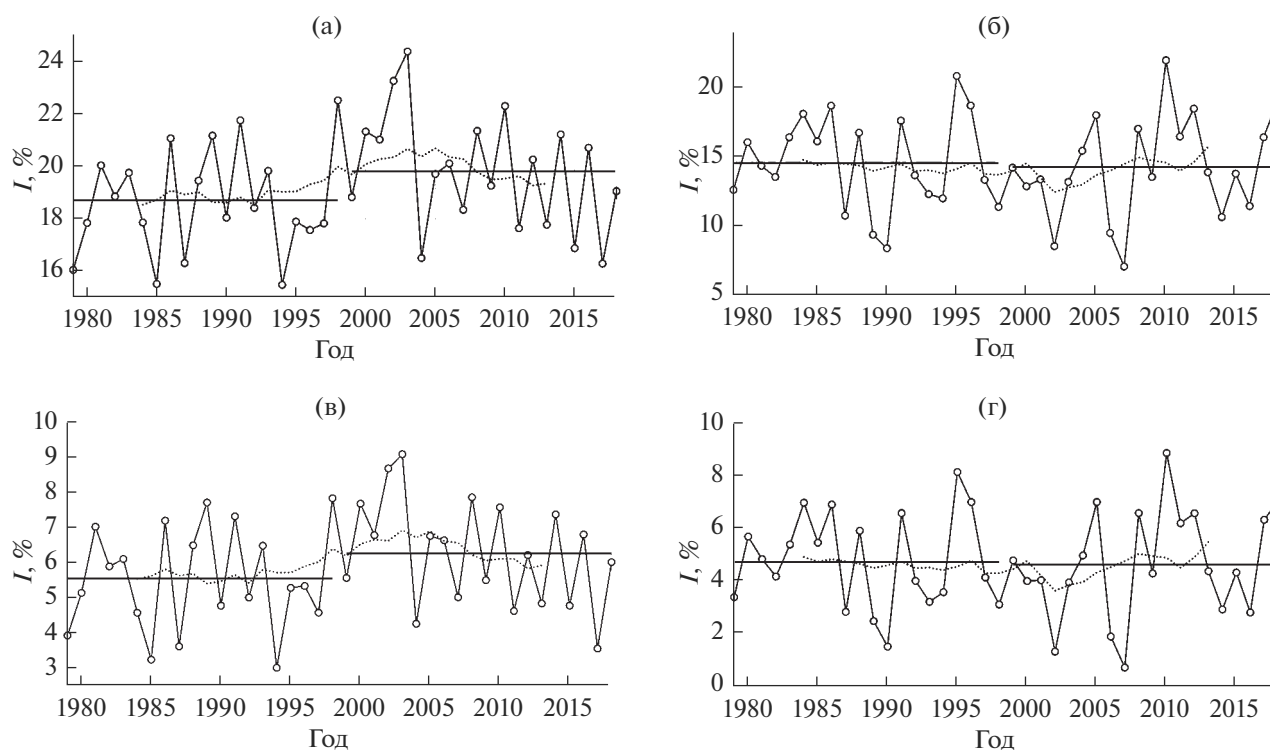


Рис. 2. Межгодовые вариации интегрального индекса активности атмосферных блокирований I_I для России в целом для летнего (а, в) и зимнего (б, г) сезонов с использованием одномерного (а, б) и двухмерного (в, г) интегральных индексов блокирования. Горизонтальными линиями отмечены средние значения индекса I_I для периодов 1979–1998 гг и 1999–2018 гг., пунктир соответствует 11-летнему скользящему осреднению.

последние годы проявилась тенденция увеличения средних 11-летних значений I_I (рис. 1б, 1г). Наибольшие зимние значения I_I получены для 2010 г., а также для 2012 г. и 1995 г.

Для России в целом наряду с общими для СП в целом проявлениями межгодовых и более долго-периодных вариаций I_I отмечаются заметные особенности (рис. 2). В частности, общая тенденция роста интегрального индекса летних блокирований для России в целом, проявляющаяся на фоне большой межгодовой изменчивости, сменяется тенденцией уменьшения с середины 2000-х гг. В отличие от СП в целом для России в целом не столь значительно отмечается максимум I_I летом 2010 г., хотя в это лето было отмечено рекордный по общей продолжительности режим атмосферного блокирования над европейской территорией России. При этом, в отличие от СП в целом, для России в целом наряду с максимумом I_I летом 2003 г. отмечено высокое значение интегрального индекса атмосферного блокирования летом 2002 г., когда отмечалась сильная жара в российских регионах. Наибольшие зимние значения I_I для России в целом получены для 2010 г. и 1995 г., как и для СП в

целом, но с существенно менее значимым зимним максимумом I_I в 2012 г.

Степень подобия межгодовых вариаций $I_I(I)$ и $I_I(II)$ можно количественно оценить с использованием корреляционного анализа. В табл. 1 приведены результаты линейных регрессий

$$I_I(I) = k_0 + k_1 I_I(II),$$

для двух версий интегральных индексов $I_I(I)$ и $I_I(II)$ для разных сезонов и в среднем за год для России и СП в целом. Соответствующий коэффициент корреляции r характеризует тесноту их связи, а величиной коэффициента линейной регрессии k_1 оценивается параметр чувствительности $dI_I(I)/dI_I(II)$ одномерного интегрального индекса $I_I(I)$ к изменению величины двухмерного интегрального индекса $I_I(II)$.

Согласно табл. 1 корреляция среднесезонных значений одномерного и двухмерного интегральных индексов блокирования высокая — с коэффициентами корреляции не менее 0.91. Наибольшие коэффициенты корреляции — для летних и зимних сезонов — не менее 0.98. Для среднегодовых значений интегральных индексов связь также характеризуется высокой статистической значимостью, хотя коэффициенты корреляции меньше

Таблица 1. Среднегодовые и среднесезонные оценки коэффициентов линейной регрессии k_1 и корреляции r для соответствующих значений двухмерного и одномерного интегральных индексов в Северном полушарии и России для 40-летнего периода (1979–2018 гг.). В скобках приведены среднеквадратические отклонения (СКО)

Пространственное осреднение	Временной интервал	Коэффициент линейной регрессии k_1 ($\pm$ СКО)	Коэффициент корреляции r
Северное полушарие	Год	1.3 (± 0.14)	0.68
	Зима	1.5 (± 0.04)	0.99
	Весна	1.2 (± 0.02)	0.92
	Лето	0.8 (± 0.02)	0.98
	Осень	1.6 (± 0.04)	0.91
Россия	Год	1.7 (± 0.09)	0.87
	Зима	1.8 (± 0.04)	0.98
	Весна	1.1 (± 0.03)	0.91
	Лето	1.4 (± 0.05)	0.98
	Осень	1.6 (± 0.04)	0.93

Таблица 2. Среднегодовые и среднесезонные оценки коэффициентов линейной регрессии K_1 и корреляции r для значений интегрального индекса блокирования в России и СП в целом с использованием одномерного и двухмерного интегральных индексов блокирования для 40-летнего периода (1979–2018 гг.). В скобках приведены СКО

Интегральный индекс блокирования	Временной интервал	Коэффициент линейной регрессии K_1 ($\pm$ СКО)	Коэффициент корреляции r
Одномерный	Год	0.8 (± 0.08)	0.71
	Зима	1.2 (± 0.11)	0.86
	Весна	0.9 (± 0.10)	0.82
	Лето	1.1 (± 0.12)	0.83
	Осень	1.0 (± 0.13)	0.79
Двухмерный	Год	0.9 (± 0.06)	0.78
	Зима	0.9 (± 0.10)	0.83
	Весна	0.9 (± 0.11)	0.77
	Лето	0.6 (± 0.08)	0.77
	Осень	1.0 (± 0.13)	0.78

(особенно для СП в целом), чем для среднесезонных значений. Следует отметить, что согласно полученным коэффициентам регрессий общая изменчивость $I_I(I)$ больше, чем общая изменчивость $I_I(II)$, за исключением летних сезонов для СП в целом.

Аналогично можно количественно оценить степень подобию межгодовых вариаций интегральных индексов блокирования для разных регионов и для СП в целом. В табл. 2 приведены результаты линейных регрессий

$$I_I(\text{регион}) = K_0 + K_1 I_I(\text{СП}),$$

для интегральных индексов $I_I(\text{регион})$ для России на $I_I(\text{СП})$ для СП в целом для разных сезонов и в среднем за год. Коэффициенты корреляции ха-

рактеризуют тесноту их связи, а величиной коэффициента линейной регрессии K_1 оценивается параметр чувствительности $dI_I(\text{регион})/dI_I(\text{СП})$ интегрального индекса $I_I(\text{регион})$ для России к изменению величины соответствующего интегрального индекса $I_I(\text{СП})$ для СП в целом.

Согласно табл. 2 связь среднесезонных и среднегодовых значений интегральных индексов блокирования для России и СП в целом статистически значимая с высокими коэффициентами корреляции. Наибольшие значения коэффициентов корреляции – для зимних сезонов. Согласно полученным оценкам коэффициентов регрессий амплитуда вариаций I_I для России близка к амплитуде соответствующих вариаций I_I для СП в целом, за исключением летних сезонов при использовании двухмерного интегрального индекса.

Таблица 3. Среднегодовые и среднесезонные оценки интегрального индекса блокинговой активности (%) в Северном полушарии и России для 40-летнего периода (1979–2018 гг.) и для двух 20-летних подпериодов (1979–1998 гг. и 1999–2018 гг.) с использованием одномерного индекса блокирования $I_I(I)$. В скобках приведены СКО

Пространственное осреднение	Временной интервал	средние значения $I_I(I)$ ($\pm$ СКО) [%]		
		1979–1998 гг.	1999–2018 гг.	1979–2018 гг.
Северное полушарие	Год	14.6 ($\pm$ 1.3)	15.0 ($\pm$ 1.2)	14.8 ($\pm$ 1.2)
	Зима	14.5 ($\pm$ 2.5)	14.2 ($\pm$ 2.7)	14.3 ($\pm$ 2.6)
	Весна	14.8 ($\pm$ 2.2)	14.4 ($\pm$ 2.3)	14.6 ($\pm$ 2.2)
	Лето	15.9 ($\pm$ 1.5)	16.6 ($\pm$ 1.7)	16.2 ($\pm$ 1.6)
	Осень	13.3 ($\pm$ 2.1)	14.5 ($\pm$ 2.3)	13.9 ($\pm$ 2.2)
Россия	Год	14.9 ($\pm$ 2.4)	15.0 ($\pm$ 2.7)	15.0 ($\pm$ 2.5)
	Зима	14.5 ($\pm$ 3.4)	14.2 ($\pm$ 3.7)	14.3 ($\pm$ 3.5)
	Весна	13.8 ($\pm$ 1.9)	12.9 ($\pm$ 1.8)	13.4 ($\pm$ 1.9)
	Лето	18.7 ($\pm$ 2.0)	19.8 ($\pm$ 2.2)	19.2 ($\pm$ 2.2)
	Осень	12.4 ($\pm$ 2.1)	13.2 ($\pm$ 2.4)	12.8 ($\pm$ 2.3)

Таблица 4. Среднегодовые и среднесезонные оценки интегрального индекса блокинговой активности (%) в Северном полушарии и России для 40-летнего периода (1979–2018 гг.) и для двух 20-летних подпериодов (1979–1998 гг. и 1999–2018 гг.) с использованием двухмерного индекса блокирования $I_I(II)$. В скобках приведены СКО

Пространственное осреднение	Временной интервал	Средние значения $I_I(II)$ ($\pm$ СКО) [%]		
		1979–1998 гг.	1999–2018 гг.	1979–2018 гг.
Северное полушарие	Год	4.3 ($\pm$ 1.6)	4.5 ($\pm$ 1.7)	4.4 ($\pm$ 1.6)
	Зима	4.3 ($\pm$ 1.8)	5.1 ($\pm$ 2.1)	4.7 ($\pm$ 2.0)
	Весна	4.3 ($\pm$ 1.2)	4.2 ($\pm$ 1.1)	4.3 ($\pm$ 1.1)
	Лето	5.1 ($\pm$ 1.7)	5.0 ($\pm$ 1.7)	5.0 ($\pm$ 1.7)
	Осень	3.4 ($\pm$ 1.1)	3.5 ($\pm$ 1.0)	3.4 ($\pm$ 1.0)
Россия	Год	4.2 ($\pm$ 1.8)	4.3 ($\pm$ 2.1)	4.2 ($\pm$ 1.9)
	Зима	4.7 ($\pm$ 1.8)	4.6 ($\pm$ 2.1)	4.7 ($\pm$ 1.9)
	Весна	3.7 ($\pm$ 1.2)	3.2 ($\pm$ 1.3)	3.4 ($\pm$ 1.2)
	Лето	5.6 ($\pm$ 1.5)	6.3 ($\pm$ 1.5)	5.9 ($\pm$ 1.5)
	Осень	2.8 ($\pm$ 1.4)	2.9 ($\pm$ 1.4)	2.9 ($\pm$ 1.4)

В табл. 3 представлены среднегодовые и среднесезонные количественные оценки интегрального индекса блокинговой активности (одномерная версия) в СП и России для 40-летнего периода (1979–2018 гг.) и для двух 20-летних периодов (1979–1998 гг. и 1999–2018 гг.), а также соответствующие среднеквадратические отклонения (СКО).

Согласно табл. 3 оценки сверху для значений интегрального индекса I_I в среднем около 15% для СП и для России в целом. Для СП и российских

регионов наибольшие значения I_I отмечены для летнего сезона, а наименьшие — для осеннего сезона. При этом наибольшая межгодовая изменчивость, характеризуемая СКО, выявлена для зимних сезонов. Наименьшая межгодовая изменчивость интегрального индекса блокинговой активности в российских регионах отмечена для весенних сезонов, а для СП в целом — для летних сезонов. Сравнение режимов атмосферных блокирований для двух 20-летних подпериодов (1999–2018 гг. и 1979–1998 гг.) выявляет общее

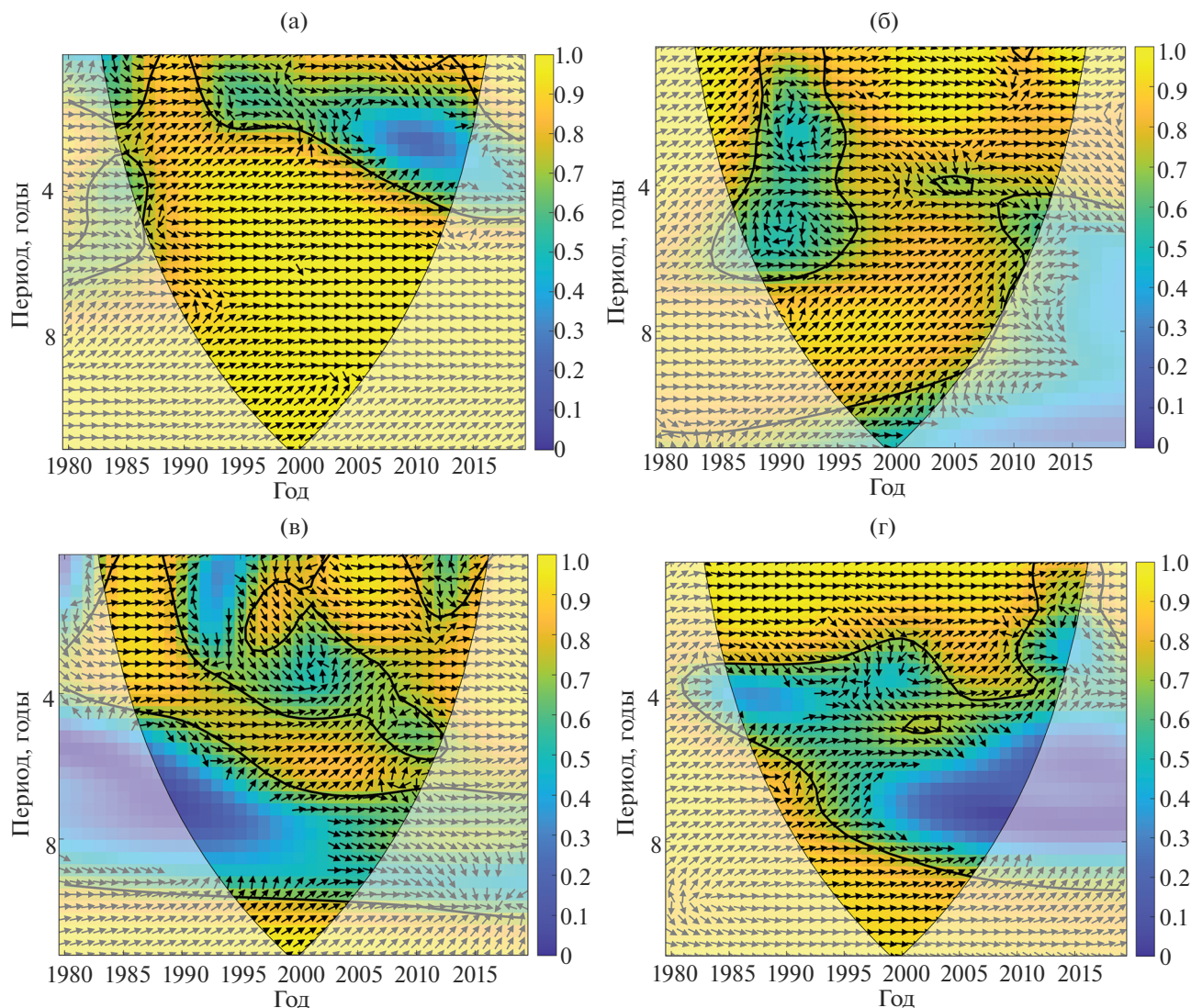


Рис. 3. Когерентность интегрального индекса блокирования $I_I(I)$ (одномерная версия) для России и СП в целом для периода 1979–2018 гг. в разные сезоны: (а) зима, (б) весна, (в) лето, (г) осень. Ординаты — период в годах. Выделены области со значимой когерентностью (на уровне 95%), стрелки характеризуют фазовый сдвиг (стрелка вправо — син-фазность, влево — противофазность), отмечены также области краевых эффектов.

увеличение межгодовой изменчивости для всех сезонов, кроме весеннего сезона в российских регионах. При этом для среднесезонных значений отмечено общее увеличение интегрального индекса атмосферных блокирований летом и осенью и уменьшение — зимой и весной.

В табл. 4 представлены соответствующие среднегодовые и среднесезонные количественные оценки с двухмерной версией интегрального индекса блокинговой активности в СП и России для 40-летнего периода (1979–2018 гг.) и для двух 20-летних подпериодов (1979–1998 гг. и 1999–2018 гг.). Согласно табл. 2 более детальные оценки интегрального индекса I_I в среднем за год менее 5%

для России и СП в целом. Наибольшие значения I_I для российских регионов, как и при использовании одномерной версии интегрального индекса блокинговой активности, отмечены для летнего сезона. Для СП в целом наибольшие значения интегрального индекса в двухмерной версии получены для летнего и зимнего сезонов. Отмечено существенное изменение величины среднезимнего интегрального индекса для СП в целом между двумя 20-летними подпериодами — 1979–1998 гг. и 1999–2018 гг. (с увеличением почти на 19%). Это связано с наибольшей изменчивостью для зимних сезонов. Для российских регионов выявлено существенное увеличение среднелетнего инте-

грального индекса между 1979–1998 гг. и 1999–2018 гг. — более, чем на 12%. Минимальные среднесезонные значения интегрального индекса для России и СП в целом получены для осенних сезонов. Наименьшая межгодовая изменчивость интегрального индекса блокинговой активности в российских регионах отмечена для весенних сезонов, а для СП в целом — для осенних и весенних сезонов.

Получены также оценки того, в какой степени межгодовые вариации интегрального индекса блокирования для российских регионов когерентны с соответствующими вариациями для СП в целом с использованием кросс-вейвлетного анализа. На рис. 3 приведены полученные оценки когерентности интегрального индекса блокирования (МС-версия) для России и Северного полушария в целом для периода 1979–2018 гг. в разные сезоны.

Согласно рис. 3 когерентность межгодовых вариаций интегрального индекса для российских регионов и для СП в целом существенно различается для разных сезонов. При этом, за исключением весенних сезонов, для остальных сезонов отмечена значимая когерентность для наиболее долгопериодных (междесятилетних) вариаций сезонных значений интегрального индекса. Значительное ослабление когерентности интегрального индекса блокирования для России и СП в целом выявлено в последние десятилетия для летних сезонов (рис. 3в), а также для весенних сезонов (рис. 3б). В то же время в последние годы проявилось общее увеличение когерентности межгодовых вариаций интегрального индекса блокирования для российских регионов и полушария в целом для осенних сезонов (рис. 3г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены оценки степени общей подверженности российских регионов и СП в целом действию атмосферных блокирований на основе предложенного интегрального индекса с использованием данных реанализа для периода 1979–2018 гг. Использование подобных интегральных индексов, характеризующих режимы атмосферных блокирований в целом с учетом их размеров, длительности и частоты, целесообразно, в частности, при анализе причин крупномасштабных погодно-климатических аномалий, в том числе засух и пожаров в летние сезоны. Согласно результатам анализа данных дистанционного зондирования и данных реанализа для последних десятилетий вклад в дисперсию межгодовых изменений площадей пожаров и потоков в атмосферу продуктов горения на территории России, связан-

ных с атмосферными блокировками, может достигать и даже превышать 40% (см., также [22, 30]).

Представлены количественные оценки интегрального индекса при разной степени детализации локальных условий атмосферных блокирований с использованием более грубого одномерного критерия и более детального — двухмерного. При их количественном различии особенности межгодовой изменчивости при использовании одномерного и двухмерного критериев получены подобными для всех сезонов. Это свидетельствует о значимости даже грубых оценок изменений интегрального индекса блокинговой активности для протяженных регионов.

Оценки среднесезонных и среднегодовых оценок интегрального индекса для России и СП в целом близки. Наибольшие значения интегрального индекса блокирования для России и СП в целом получены для летних сезонов, а наибольшая межгодовая изменчивость — для зимних сезонов. При отмеченных с использованием кросс-вейвлетного анализа существенных различиях когерентности межгодовых вариаций среднесезонных значений интегрального индекса блокирования для российских регионов и для СП в целом отмечена их значимая когерентность для наиболее долгопериодных (междесятилетних) вариаций среднесезонных значений, кроме весенних сезонов.

Следует отметить, что представленные оценки получены при ряде условий, которые требуют дальнейших уточнений. Это касается, в частности, широтных границ для областей формирования атмосферных блокирований, различающихся, вообще говоря, для разных регионов и сезонов и зависящих от климатических изменений. В том числе, необходим также дополнительный анализ роли пространственного разрешения используемых данных при определении особенностей различных типов атмосферных блокирований.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ (№ 19-17-00240).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rex D.F.* Blocking action in the middle troposphere and its effect on regional climate. Part II: The climatology of blocking action // *Tellus*. 1950. V. 2. P. 275–301.
2. *Lejenas H., Okland H.* Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data // *Tellus A*. 1983. V. 35. P. 350–362.
3. *Обухов А.М., Курганский М.В., Татарская М.С.* Динамические условия возникновения засух и других крупномасштабных погодных аномалий // *Метеорология и гидрология*. 1984. № 10. С. 5–13.

4. Груза Г.В., Коровкина Л.В. Сезонные особенности пространственного распределения индексов блокирования в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 1991. № 3. С. 108–110.
5. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus. 1990. V. 42A. P. 343–365.
6. Hansen A.R., Sutera A. A comparison between planetary-wave flow regimes and blocking // Tellus A. 1993. V. 45. P. 281–288.
7. Мохов И.И., Пемухов В.К. Блокинг и тенденции их изменений // Доклады АН. 1997. Т. 357. № 5. С. 687–689.
8. 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. P. 181–195.
9. Pelly J.L., Hoskins B.J. A new perspective on blocking // J. Atmos. Sci. 2003. V. 60. P. 743–755.
10. Scherrer S., Croci-Maspoli M., Schwiertz C., Appenzeller C. Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region // Intern. J. Climatol. 2006. V. 26. P. 233–249.
11. Мохов И.И. Действие как интегральная характеристика климатических структур: Оценки для атмосферных блокингов // Доклады АН. 2006. Т. 409. № 3. С. 403–406.
12. Barriopedro D., Garcia-Herrera R., Lupo A.R., Hernandez E. A climatology of Northern Hemisphere blocking // J. Climate. 2006. V. 19. P. 1042–1063.
13. Diao Y., Li J., Luo D. A new blocking index and its application: Blocking action in the Northern Hemisphere // J. Clim. 2006. V. 19. P. 4819–4839.
14. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорология и гидрология. 2010. № 11. С. 5–18.
15. Мохов И.И., Акперов М.Г., Прокофьева М.А., Тимажев А.А., Лупо А.Р., Ле Трет Э. Блокинг в Северном полушарии и Евро-Атлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // Доклады АН. 2013. Т. 449. № 5. С. 582–586.
16. 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.
17. Barnes E.A., Slingo J., Woollings T. A methodology for the comparison of blocking climatologies across indices, models and climate scenarios // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 38. P. 2467–2481.
18. Мохов И.И., Тимажев А.В. Модельные оценки возможных изменений атмосферных блокирований в Северном полушарии при RCP-сценариях антропогенных воздействий // Доклады АН. 2015. Т. 460. № 2. С. 210–214.
19. Jensen A.D., Lupo A.R., Mokhov I.I., Akperov M.G., Reynolds D.D. Integrated regional enstrophy and block intensity as a measure of Kolmogorov entropy // Atmosphere. 2017. V. 8 (12). 237. <https://doi.org/10.3390/atmos8120237>
20. Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 5–16.
21. Pinheiro M.C., Ullrich P.A., Grotjahn R. Atmospheric blocking and intercomparison of objective detection methods: flow field characteristics // Clim. Dyn. 2019. V. 53. № 7–8. P. 4189–4216.
22. Мохов И.И., Ситнов С.А., Цидилина М.Н., Воронова О.С. Эмиссии в атмосферу NO₂ при лесных пожарах на территории России в связи с атмосферными блокированиями // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 6. С. 395–399.
23. Mokhov I.I., Timazhev A.V. Integral index of blocking activity in the atmosphere of Northern Hemisphere during last decades // Research Activities in Earth System Modelling. E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. S. 2. P. 15–16.
24. Chen T.-C. and Yoon J.-H. Interdecadal variation of the North Pacific wintertime blocking // Mon. Wea. Rev. 2002. V. 130. P. 3136–3143.
25. Li F., Orsolini Y.J., Wang H., Gao Y., and He S. Atlantic multidecadal oscillation modulates the impacts of Arctic sea ice decline // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 2497–2506.
26. Lupo A.R., Jensen A.D., Mokhov I.I., Timazhev A., Eichler T., and Efe B. Changes in global blocking character during recent decades // Atmos. 2019. V. 10 (2). P. 92. <https://doi.org/10.3390/atmos10020092>
27. Мохов И.И., Тимажев А.В. Повторяемость летних атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультдесятилетней осцилляций // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 3. С. 1–11.
28. Renwick J.A. and Wallace J.M. Relationships between North Pacific wintertime blocking, El Nino, and PNA pattern // Mon. Wea. Rev. 1996. V. 124. P. 2071–2076.
29. Гледзер Е.Б., Обухов А.М. Квазидвухлетняя цикличность как параметрическое явление в климатической системе // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. № 11. С. 1154–1158.
30. Pan X., Wang G., Yang P. Introducing driving-force information increases the predictability of the North Atlantic Oscillation // Atmos. Oceanic Sci. Lett. 2019. V. 12 (5). P. 329–336.
31. Мохов И.И., Бондур В.Г., Ситнов С.А., Воронова О.С. Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокированиями // ДАН. Науки о Земле. 2020. Т. 495. № 2. С. 61–66.

Integral Index of Atmospheric Blocking Activity in the Northern Hemisphere in Recent Decades

I. I. Mokhov^{1, 2, *} and A. V. Timazhev¹

¹*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky pereulok, 3, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, 1, building 2, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: mokhov@ifaran.ru*

To characterize the total activity of atmospheric blockings for extended areas at different time intervals, a new integral index is proposed. The integral index, which characterizes the proportion of the area with atmospheric blocking in a particular area during a certain time interval, was used in two versions – one-dimensional and more detailed – two-dimensional. Using reanalysis data for 4 decades (1979–2018), estimates were obtained of the degree of total exposure of Russian regions and the Northern Hemisphere (NH) as a whole to the action of atmospheric blockings in different seasons and for the whole year. The highest values of the integral index, which depends on the frequency, duration, and size of atmospheric blockings for Russia and the NH as a whole, were obtained for the summer season. The greatest interannual variability is manifested in winter seasons. Using cross-wavelet analysis, significant differences in the coherence of interannual variations of the integral index for Russian regions and for the NH as a whole for different seasons were noted. At the same time, their significant coherence is manifested for the most long-term (interdecadal) variations of the seasonal values of the integral index, with the exception of spring seasons.

Keywords: atmospheric blockings, integral index, reanalysis data, correlation and cross-wavelet analysis, Northern Hemisphere, Russian regions, seasonal features, interannual variability