

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ В АТМОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

© 2018 г. Н. К. Кононова*, Е. А. Черенкова

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: NinaKononova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.03.2018 г.

Принята в печать 27.07.2018 г.

В статье исследованы колебания атмосферной циркуляции Северного полушария на основе типизации Б.Л. Дзердзеевского, В.М. Курганской и З.М. Витвицкой в период 1899–2016 гг. Проанализирована повторяемость переходов элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) друг в друга в течение всего периода и определены различия в чередовании ЭЦМ по трем циркуляционным эпохам. В ходе исследования выявлены наиболее часто встречающиеся, а также вовсе не встречающиеся переходы. Кроме того, установлено, что при переходе от меридиональной эпохи к зональной произошло не только общее уменьшение продолжительности меридиональных процессов, но и наблюдались изменения в структуре самой меридиональной группы: уменьшение повторяемости ЭЦМ с тремя и двумя далеко отстоящими друг от друга блокирующими процессами (на Сибирь и Америку или Европу и Америку) сопровождалось ростом повторяемости ЭЦМ с двумя близко расположенными блокирующими процессами (например, на Атлантику и Европу). Результаты проведенного нами анализа свидетельствуют о росте неустойчивости атмосферных процессов в течение второй половины XX в. и, особенно, в ее последнее 19-летие. Существенное уменьшение доли переходов ЭЦМ с блокирующими процессами с сохранением элементов предыдущего процесса более чем в два раза в период от первой до третьей циркуляционной эпохи также говорит об увеличении неустойчивости атмосферы, что приводит к росту повторяемости экстремальных погодных явлений на территории России.

Ключевые слова: крупномасштабная атмосферная циркуляция, повторяемость элементарных циркуляционных механизмов, изменение климата, Северное полушарие

DOI: 10.1134/S2587556618060080

Введение. Атмосферные процессы, подверженные постоянным изменениям, оказывают влияние на климат Земли. Наблюдаемое в настоящее время изменение климата характеризуется как продолжающееся потепление [3, 9, 10]. Анализ флуктуаций крупномасштабной атмосферной циркуляции и происходящих в связи с этим климатических изменений проводится с использованием ведущих мод изменчивости барического поля [1, 5, 18, 23, 24] и на основе применения отечественных индексов и типизаций [4, 6, 7, 11, 13, 17, 18, 21, 22, 26].

В статье исследование многолетних колебаний атмосферной циркуляции Северного полушария выполнено с использованием типизации Б.Л. Дзердзеевского, В.М. Курганской и З.М. Витвицкой [7]. Ранее А.С. Чаплыгиной был проведен анализ повторяемости перехода одного ЭЦМ в другой для периода 1899–1954 гг. в целом, для меридиональной и зональной эпох, а также отдельно для циркуляционного сезона зимы [21, 22]. Были выявлены наиболее часто встречающиеся, а также

вовсе не встречающиеся переходы. Установлено, что при переходе от меридиональной эпохи к зональной произошло не только общее уменьшение продолжительности меридиональных процессов, но и наблюдались изменения в структуре самой меридиональной группы: уменьшение повторяемости ЭЦМ с тремя и двумя далеко отстоящими друг от друга блокирующими процессами (на Сибирь и Америку или Европу и Америку) сопровождалось ростом повторяемости ЭЦМ с двумя близко расположенными блокирующими процессами (например, на Атлантику и Европу) [21].

Сравнение результатов аналогичного анализа, проведенного на материале за 1899–2002 гг. [27], с результатами А.С. Чаплыгиной показало, что в конце XX – начале XXI в. наиболее частыми стали переходы ЭЦМ меридиональной южной группы циркуляции в ЭЦМ 12а, наиболее турбулентный ЭЦМ с четырьмя блокирующими процессами и четырьмя выходами южных циклонов. Повторяемость таких переходов по сравнению с первой половиной XX в. возросла в несколько раз. Частая

Таблица 1. Характеристика групп циркуляции атмосферы Северного полушария в типизации Б.Л. Дзердзеевского

Группа циркуляции	Типы ЭЦМ, входящие в группу	Атмосферное давление в Арктике	Количество блокирующих процессов	Количество выходов южных циклонов
Зональная	1 и 2	Высокое	0	2–3
Нарушения зональности	3–7	Высокое	1	2–3
Меридиональная северная	8–12	Высокое	2–4	2–4
Меридиональная южная	13	Низкое	0	3–4

смена противоположных по характеру процессов означает быструю смену погодных условий в регионах, расположенных на пути арктических вторжений и выходов южных циклонов, и, как следствие, рост повторяемости метеорологических экстремумов и связанных с ними опасных природных явлений [8, 14, 19, 20]. Такими регионами в России являются, прежде всего, Северный Кавказ и Дальневосточно-Тихоокеанский регион.

Анализируя чередование ЭЦМ и групп ЭЦМ в XX в., В.И. Мордвинов и соавт. [16] пришли к выводу, что вариации повторяемости ЭЦМ имели вид возмущения, распространявшегося на запад.

Позднее была проанализирована повторяемость переходов ЭЦМ по фазам 11-летних солнечных циклов [27] и наиболее вероятная смена ЭЦМ при магнитных бурях [2, 25]. Выявлено, что при усилении солнечной активности и геомагнитной возмущенности циркуляция атмосферы также становится более возмущенной.

В настоящей работе ставится задача выявить особенности последовательной смены (чередования) ЭЦМ в течение периода 1899–2016 гг. в целом и по трем циркуляционным эпохам, определить наиболее частые переходы каждого ЭЦМ в другие (в % от общего числа переходов конкретного ЭЦМ), а также установить различия в повторяемости переходов между циркуляционными эпохами.

Материалы и методы. Исследование изменений крупномасштабной циркуляции атмосферы Северного полушария проведено с применением классификации ЭЦМ [6, 7]. Расчеты, как и основные положения типизации и Календарь последовательной смены ЭЦМ с данными суточного разрешения, представлены на интернет-сайте <http://www.atmospheric-circulation.ru>. Там же, а также в работах [6, 7, 12] дано подробное описание динамических схем ЭЦМ, поэтому здесь оно не приводится. Приводим только таблицу распределения 13 типов по группам циркуляции (табл. 1).

Анализ повторяемости переходов ЭЦМ за период наблюдений 1899–2016 гг. Как видно из материалов табл. 2, летние зональные ЭЦМ (2а, 2б, 2в)

наиболее часто переходят в ЭЦМ нарушения зональности. ЭЦМ нарушения зональности (3 – 7бл) наиболее часто сменяются меридиональными северными и южными (см. табл. 2). Таким образом, на смену зональным ЭЦМ и ЭЦМ нарушения зональности в основном приходят меридиональные ЭЦМ, межширотный обмен на полушарии усиливается.

ЭЦМ с двумя блокирующими процессами (типы 8–11) переходят как в ЭЦМ с тремя-четырьмя блокирующими процессами (ЭЦМ типа 12), так и в ЭЦМ с циклонической циркуляцией на полюсе (тип 13).

ЭЦМ 13з (меридиональный южный, зимний) сменяется зимними же меридиональными северными ЭЦМ. ЭЦМ 13л переходит в ЭЦМ нарушения зональности и меридиональные северные летние. Таким образом, ЭЦМ типов 12 и 13 достаточно часто переходят друг в друга.

Полученные результаты можно было бы считать выявлением предикторов, позволяющих определять возможные изменения циркуляции атмосферы внутри сезона, однако флуктуации циркуляции атмосферы по циркуляционным эпохам вносят свои коррективы. Анализ повторяемости чередований ЭЦМ по циркуляционным эпохам позволяет выявить изменения, характерные для конкретной эпохи.

Повторяемость переходов ЭЦМ в период меридиональной северной циркуляционной эпохи (1899–1915 гг.). В меридиональную северную циркуляционную эпоху, в отличие от данных, осредненных за весь период, для всех ЭЦМ, кроме ЭЦМ 7ал, повторяемость перехода хотя бы в один из 41 ЭЦМ была не ниже 10% (табл. 3).

Как видно из материалов табл. 3, кроме зональных ЭЦМ над Европейской территорией России (ЕТР) наиболее часто формировались блокирующие процессы. Таким образом, в меридиональной северной циркуляционной эпохе всего отмечались 1592 смены ЭЦМ. Средняя продолжительность существования каждого ЭЦМ составляла 3.9 дня.

Выделено 139 различных переходов ЭЦМ с повторяемостью 10% и более, из них повторяемость

Таблица 2. Относительная повторяемость переходов ЭЦМ (в %) по группам: 1 – зональная, 2 – нарушения зональности, 3 – меридиональная северная, 4 – меридиональная южная в период 1899–2016 гг.

Группы	1		2		3		4		3		3		3		3		3		3		3		4		4		-							
	2а	2б	2в	3	4а	4б	4в	5а	5б	5в	5г	6	7 аз	7 бз	8 бл	8 вз	8 вл	8 гз	8 гл	9а	9б	10б	11а	11б	11в	11г	12 бз	12 бл	12 вз	12 вл	12г	13з	13 л	вт
3	11	9	8	-	3	7	5	-	1	3	2	2	2	-	2	-	4	3	7	6	3	4	1	0	0	1	1	7	2	3	1	1	8	2
4б	10	11	22	7	1	-	8	2	-	-	-	3	1	0	8	-	2	0	9	3	1	7	0	1	-	0	1	1	1	4	-	1	4	5
9а	6	6	4	11	1	3	4	1	1	-	1	9	2	1	5	1	8	2	9	-	5	7	0	1	-	0	2	5	1	6	2	1	9	4
10а	2	5	2	2	13	4	9	3	3	3	5	2	6	6	6	5	-	3	4	5	4	6	4	4	2	4	3	3	4	6	2	4	3	7
10б	5	9	6	2	5	11	6	1	1	3	-	4	1	1	3	1	6	2	8	4	0	-	1	0	1	3	0	5	0	4	1	1	6	5
11а	1	-	-	2	6	1	0	17	16	10	13	2	13	12	-	6	-	8	-	1	3	1	-	9	7	9	14	2	12	1	7	12	0	10
12а	6	4	4	4	5	3	3	3	2	3	5	6	2	5	5	4	11	9	7	12	16	4	4	5	4	4	8	15	9	15	11	8	10	4
12 бз	1	0	-	2	1	0	1	7	9	6	6	0	7	7	2	2	-	11	3	2	7	1	10	11	10	11	-	1	4	1	6	5	1	6
12г	1	1	1	0	-	1	0	1	3	-	5	1	2	4	2	16	2	4	-	1	4	1	5	3	5	7	4	1	5	1	-	8	1	2
13з	1	0	-	3	9	1	3	6	5	9	6	2	9	7	3	12	3	10	1	3	9	2	11	8	13	13	8	2	8	1	12	-	2	2
13л	8	6	7	9	2	12	12	1	0	-	3	11	0	0	11	1	10	3	12	13	11	13	0	1	1	1	1	8	-	9	1	3	-	2

Примечание. Показан фрагмент таблицы с выделенными полужирным шрифтом переходами, встречающимися чаще 10%. В табл. 2 и табл. 3 значения округлены до целых величин.

Таблица 3. Относительная повторяемость переходов ЭЦМ по циркуляционным эпохам (в % для каждой эпохи)

ЭЦМ	1а	1б	2б	3	4а	4б	4в	5а	5б	6	7аз	7ал	7бз	7бл	8а	8бз	8бл	8гз	8гл	9а	10а	10б	11а	11б	11в	12а	12бз	12бл	12вз	12г	13з	13л	вт		
1а	-	0	0	10	0	10	-	0	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	10	0	0	10	0	0	10	0	10
		6	0	4	3	1	-	1	4	4	7	4	6	1	3	0	0	4	-	0	1	4	14	1	1	3	4	3	4	0	4	0	6		
		2	1	3	1	4		1	2	5	6	1	6	0	6	2	1	4		3	2	1	4	1	0	6	7	0	5	3	8	1	1		
	0			0	12	6	0	0	6	0	18	0	0	0	6	0		0	6	0	12	0	12	0	6	0	6	0	6	0	0	0	0		
1б	3	-	-	3	3	2	0	5	3	2	13	0	6	0	5	0	-	3	0	2	6	0	11	8	2	2	6	0	0	0	3	0	8		
	1			4	6	1	1	0	0	5	2	2	1	6	2		2	1	4	5	1	1	2	1	5	6	2	6	4	12	2	2			
	0			0	0	0	10	20	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	30	20	0	0			0	0	0	0	0	0	0	10	0		
2а	0	-	9	28	0	13	6	0	-	6	0	3	-	0	0	0	0	0	3	6	0	6	0	-	-	3	0	9	0	0	0	0	0		
	1		4	7	1	9	2	1		7	1	5		2	6	1	3	0	1	4	1	5	1			7	1	5	1	1	1	10	2		
	0		0	7		14	7	0	0	4		11		7	0	0		0	7	4	11					0	0	18	0	0	0	0	0		
2б	-	-	-	10	-	13	7	0	1	9	-	2	-	5	10	-	0	-	1	6	5	10	-	-	-	3	0	4	1	2	0	0	2		
				7		7	7	1	0	3		1		1	0		5		3	7	5	5				8	1	3	0	0	1	18	3		
	0			0		44	0			0		22	0	0	11		11		11	0	0				0		0		0		0	0	0		
2в	-	-	6	11	-	26	8	-	-	5	-	11	0	5	5	-	3	-	-	2	2	8	-	-	-	0	-	2	-	0	-	5	3		
			3	5		11	8			5		3	3	0	3		0			8	3	5				11	3		3		14	3			

Примечание. Приведен фрагмент таблицы для ЭЦМ зональной группы. В каждой ячейке таблицы первая цифра относится к периоду меридиональной северной циркуляционной эпохи (1899–1915 гг.), вторая цифра – к периоду зональной циркуляционной эпохи (1916–1956 гг.), третья цифра – к периоду меридиональной южной циркуляционной эпохи (1957–2016 гг.). Показан фрагмент таблицы с выделенными полужирным шрифтом переходами, встречающимися чаще 10%.

10–20% отмечалась в 117 переходах, 21–30% – в 18 переходах, а больше 30% – в 4 случаях, в том числе переход ЭЦМ 2в в 4б (44%), ЭЦМ 8гз в 5б (43%) и ЭЦМ 13л в 4б (33%). Из 79 переходов ЭЦМ с блокирующими процессами в 69 переходах в последующем ЭЦМ сохранялись элементы предыдущего состояния.

Повторяемость переходов ЭЦМ в период зональной циркуляционной эпохи (1916–1956 гг.). Переходов с повторяемостью не менее 10% в зональной эпохе меньше в связи с большей ее продолжительностью. В то же время наблюдается сохранение некоторых тенденций. Так, во второй эпохе, как и в первой, сохраняется наибольшая

повторяемость переходов зимних зональных ЭЦМ 1а и 1б в ЭЦМ 11а (14 и 11% соответственно) и в ЭЦМ 7аз (7 и 13%).

После летних зональных ЭЦМ (2а, 2б, 2в) наиболее часто возникает либо блокирующий процесс над Атлантикой (ЭЦМ 3), либо над ЕТР (ЭЦМ 4б). В первой эпохе наиболее частым был переход в блокирующий процесс над ЕТР. Во второй эпохе ЭЦМ 2б с повторяемостью 10% переходит в ЭЦМ 8а и в ЭЦМ 10б. После ЭЦМ 2в с повторяемостью 11% формируется ЭЦМ 7ал (см. табл. 3).

В группе нарушения зональности летний ЭЦМ 3 с повторяемостью 11% сменяется зональным ЭЦМ 2б (в первой эпохе наиболее частым был переход в ЭЦМ 4б и составлял 12%). Летние ЭЦМ 4б и 4в с повторяемостью соответственно 10 и 13% сменяются ЭЦМ 10б и 10а. В первой эпохе это тоже был наиболее частый переход. ЭЦМ 6 с повторяемостью 12% переходит в зональный ЭЦМ 2б и с повторяемостью 14% – в ЭЦМ 7ал.

Зимний ЭЦМ 4а, в отличие от первой эпохи, наиболее часто переходит в ЭЦМ 11б, ЭЦМ 5а–5г – в ЭЦМ 11а. В первой эпохе для ЭЦМ 5а, 5б и 5г этот переход тоже был самым частым. ЭЦМ 7аз и 7бз с повторяемостью соответственно 13 и 17% сменяются ЭЦМ 11а. Отметим, что в первую эпоху для этих ЭЦМ это также был наиболее частый переход.

В зональной циркуляционной эпохе меридиональный северный ЭЦМ 8а с повторяемостью 10% переходил в ЭЦМ 11а. В предыдущей меридиональной северной эпохе тот же переход осуществлялся с повторяемостью 11%. Зимний ЭЦМ 8вз с повторяемостью 10% сменялся ЭЦМ разных групп, но с наибольшей повторяемостью (20%) – ЭЦМ 11а и, как и в первой эпохе, – ЭЦМ 12г. ЭЦМ 8гз также с наибольшей повторяемостью (12%) переходил в ЭЦМ 11а.

Летний ЭЦМ 8вл с наибольшей повторяемостью (29%), как и в первой эпохе, сменялся зональным ЭЦМ 2б. С такой же повторяемостью он переходил в ЭЦМ 7бл, ЭЦМ 8гл переходил либо в ЭЦМ 4б (сохраняется один блокирующий процесс – над ЕТР, в первой эпохе осуществлялся аналогичный переход в ЭЦМ 4в), либо в ЭЦМ 10б (к блокирующему процессу над востоком ЕТР добавляется блокирующий процесс над Америкой).

ЭЦМ теплого полугодия 9а с повторяемостью 10% переходил в ЭЦМ 7ал и 10а. В первой эпохе наиболее частым был переход в ЭЦМ 10а (11%).

ЭЦМ холодного полугодия 9б с повторяемостью 13% переходил в разные ЭЦМ, но с наибольшей повторяемостью (25%) – в ЭЦМ 12бз. ЭЦМ 10а с повторяемостью 9% сменялся ЭЦМ 4б, с повторяемостью 8% – ЭЦМ 7ал, при этом сохранялся другой блокирующий процесс над Америкой. В первой эпохе наиболее частым был переход в

ЭЦМ 11а (11%). Переход в ЭЦМ 4б составлял 8%, а в ЭЦМ 7ал всего 3%.

Летний ЭЦМ 10б с повторяемостью 9% переходил в зональный ЭЦМ 2в и в ЭЦМ нарушения зональности 4б. В первой эпохе ЭЦМ 10б с повторяемостью 11% сменялся ЭЦМ 3 и 10а и с повторяемостью 8% ЭЦМ 7бл.

Зимние ЭЦМ 11а–11в с повторяемостью 7–10% переходили в ЭЦМ 5б, при этом из двух оставалось одно арктическое вторжение – на Восточную Сибирь. С повторяемостью 3–7% они переходили в ЭЦМ 7бз, при этом оставалось другое вторжение – на Америку. С повторяемостью 10–21% ЭЦМ 11б, 11в и 11г сменялись ЭЦМ 11а, при этом происходило небольшое смещение блокирующих процессов над Сибирью и Америкой. ЭЦМ 11а–11г с повторяемостью 9–15% переходили в ЭЦМ 12бз, при этом к двум существующим блокирующим процессам добавлялся блокирующий процесс над Атлантикой. ЭЦМ 12бз в свою очередь наиболее часто переходил в ЭЦМ 11а и 11б, при этом разрушался блокирующий процесс над Атлантикой. Зимний ЭЦМ 12вз также наиболее часто переходил в ЭЦМ 11а.

Летний ЭЦМ 12бл наиболее часто переходил в ЭЦМ 7ал, при этом разрушались блокирующие процессы над Сибирью и Атлантикой. ЭЦМ 12вл наиболее часто переходил в ЭЦМ 10а, при этом разрушался блокирующий процесс над Охотским морем и сохранялся – над Америкой и Сибирью.

Летний меридиональный южный ЭЦМ 13л наиболее часто сменялся ЭЦМ 3 (блокирующий процесс над Атлантикой). В первой эпохе наиболее часто он переходил в ЭЦМ 4б – блокирующий процесс над ЕТР.

Таким образом, в зональной циркуляционной эпохе всего отмечалась 3632 смены ЭЦМ. Средняя продолжительность отдельного ЭЦМ составляла 4.2 дня (что на 0.3 дня больше, чем в первой эпохе).

Выделено всего 72 различных перехода ЭЦМ с повторяемостью 10% и более, из них повторяемость 10–20% отмечалась в 66 переходах и 21–30% – в 6 переходах: ЭЦМ 2а в ЭЦМ 3 (28%), ЭЦМ 2в в ЭЦМ 4б (26%), ЭЦМ 8бл в ЭЦМ 2б (29%) и в ЭЦМ 7бл (29%), ЭЦМ 9б в ЭЦМ 12бз (25%), а также ЭЦМ 11г в ЭЦМ 11а (21%). Из 47 переходов ЭЦМ с блокирующими процессами только в 23 в последующем ЭЦМ сохранялись элементы предыдущего.

Повторяемость переходов ЭЦМ в меридиональную южную циркуляционную эпоху (1957–2016 гг.). Меридиональная южная циркуляционная эпоха отличается наибольшей продолжительностью (60 лет) и значительным разнообразием переходов, за счет чего уменьшилось количество ЭЦМ, в которые осуществляются переходы с повторяемостью 10% и больше. При этом возрастает по-

вторяемость переходов в ЭЦМ меридиональной южной группы циркуляции (см. табл. 3).

Так, ЭЦМ 1а с наибольшей повторяемостью 8% переходит в ЭЦМ 13з. В первую эпоху такой переход отсутствовал, во вторую составлял 4%. ЭЦМ 1б с повторяемостью 12% переходит в ЭЦМ 13з. Переход в ЭЦМ 13з в первой эпохе отсутствовал, во второй составлял 3%.

ЭЦМ 2а, 2б и 2в с повторяемостью 10, 18 и 14% переходят в ЭЦМ 13л, ЭЦМ 13з с повторяемостью 12% сменяется ЭЦМ 11а, а ЭЦМ 13л с повторяемостью 11% переходит в ЭЦМ 12а. Всего в меридиональной южной циркуляционной эпохе отмечалось 7008 случаев смены ЭЦМ. Средняя продолжительность отдельного ЭЦМ составляла 2.9 дня.

Выделен 61 переход ЭЦМ с повторяемостью 10% и более, из них повторяемость 10–20% отмечалась в 55 случаях и более 20% – в 6 случаях, при этом в 21% переходов наблюдался переход ЭЦМ 12а в ЭЦМ 12вл, ЭЦМ 13л в ЭЦМ 4в и ЭЦМ 13з в ЭЦМ 11а, а в 22% переходов – ЭЦМ 13л в ЭЦМ 10б. Наибольшая доля переходов (27%) приходится на переходы ЭЦМ 13л в ЭЦМ 4б и в ЭЦМ 8гл.

Из 45 переходов ЭЦМ с блокирующими процессами только в 16 в последующем ЭЦМ сохранялись элементы предыдущего. Уменьшение на протяжении XX – начала XXI в. количества переходов ЭЦМ с сохранением элементов предыдущего процесса также свидетельствует о росте неустойчивости атмосферы, что приводит к увеличению повторяемости экстремальных погодных явлений на территории России [3, 9, 10, 14, 19].

Отсутствующие переходы. В результате анализа статистики повторяемости ЭЦМ выявились и отсутствующие переходы за весь период в 118 лет. Помимо вполне естественного отсутствия переходов летних ЭЦМ в зимние и наоборот, обнаруживаются и отсутствующие переходы внутри одноименных сезонов. Например, ЭЦМ холодного полугодия 4а ни разу не перешел в ЭЦМ 5в; ЭЦМ 5а – в ЭЦМ 4а; ЭЦМ 5б – в ЭЦМ 4а, 7бз и 8вз; ЭЦМ 5г – в 5в и 9б; ЭЦМ 7аз – в 5в и 8вз; ЭЦМ 8а – в 5в; ЭЦМ 9б – в 5в, 5г и 8вз. Выявились и двойные отсутствующие переходы: между ЭЦМ 4а и 5в, а также ЭЦМ 5г и 9б, то есть не только ЭЦМ 4а ни разу не переходил в ЭЦМ 5в, но и ЭЦМ 5в не переходил в ЭЦМ 4а.

Среди летних типов отсутствующих переходов значительно меньше. Так, ЭЦМ 2в и 8бл ни разу не перешли в ЭЦМ 8гл, ЭЦМ 8вл – в ЭЦМ 10а, а ЭЦМ 10а – в ЭЦМ 8вл. Следовательно, летом выявился двойной отсутствующий переход: между ЭЦМ 8вл и 10а.

Сведения о наиболее частых и не встречающихся переходах между ЭЦМ могут быть исполь-

зованы в анализе развития циркуляционных процессов на короткий период времени.

Изменение средней продолжительности непрерывного существования отдельного ЭЦМ. Изменение повторяемости переходов одних ЭЦМ в другие тесно связано с изменением непрерывной продолжительности каждого ЭЦМ и является показателем устойчивости атмосферных процессов.

В первой эпохе (рисунок а) продолжительность одного ЭЦМ составляла в среднем 3.9 дня, при этом средняя продолжительность зональных ЭЦМ была 4.1 дня, нарушения зональности – 4.2 дня, меридиональных северных – 4.3 дня, а меридиональных южных – 3.4. Наиболее продолжительными (в среднем 5 дней) оказались ЭЦМ 2б, 4б, 4в, 5б, 5г, 8гл, 10б, 11а, 11б, наименее – ЭЦМ 13з (2.6 дня).

Во второй эпохе непрерывная продолжительность ЭЦМ несколько увеличилась и составляла в среднем 4.2 дня; продолжительность зональных ЭЦМ была 4 дня, нарушения зональности – 4.31, меридиональных северных – 4.4, а меридиональных южных – 4.5 дня. Наиболее продолжительными (в среднем 5 дней) оказались ЭЦМ 2б, 5а, 5г, 10б, 11а, 11б, 11в, 12бз, 13л. ЭЦМ со средней продолжительностью меньше 4-х дней не отмечались.

В третьей эпохе продолжительность каждого отдельного ЭЦМ составляла в среднем 2.9 дня; при этом продолжительность зональных ЭЦМ была 2.8 дня, нарушения зональности – 2.7 дня, меридиональных северных – 2.9 дня, а меридиональных южных – 4.7 дня. Наиболее продолжительными оказались ЭЦМ 13з (4.3 дня) и ЭЦМ 13л (5.2 дня). Как видим, от второй эпохи к третьей неустойчивость атмосферы возросла. Более устойчивыми стали только ЭЦМ с циклонической циркуляцией у Северного полюса.

Анализ изменения продолжительности непрерывного существования отдельных ЭЦМ внутри третьей эпохи по периодам с однородным характером циркуляции атмосферы (рисунок б) показал, что самым неустойчивым оказался период 1998–2016 гг., в который происходит смена тенденций: уменьшение суммарной годовой продолжительности меридиональных южных ЭЦМ и рост – меридиональных северных (блокирующих процессов) [13]. Средняя продолжительность отдельного случая ЭЦМ в это 19-летие составляет 2.31 дня, при этом продолжительность зональных ЭЦМ была 1.6 дня, нарушения зональности – 2.1 дня, меридиональных северных – 2.5 дня, а меридиональных южных – 4.3 дня. Наиболее продолжительным оказался ЭЦМ 13л (4.8 дня). Таким образом, средняя продолжительность

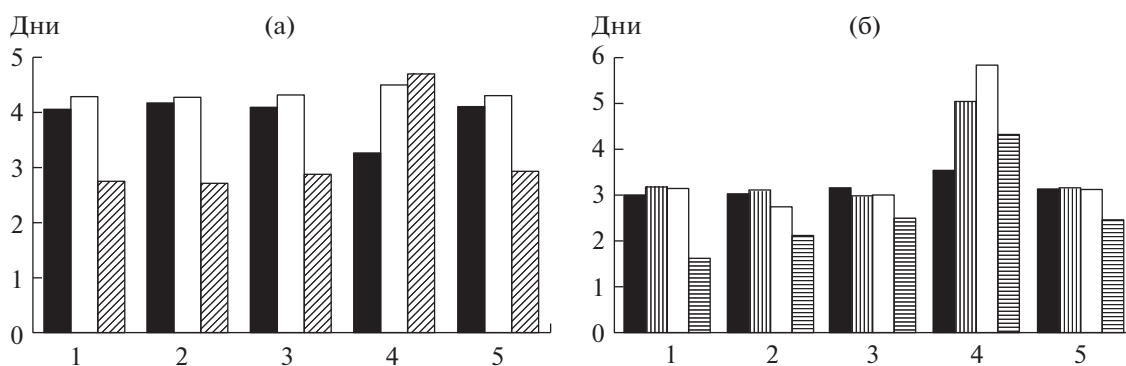


Рис. 1. Средняя непрерывная продолжительность ЭЦМ (в днях) по группам циркуляции: зональная (1), нарушение зональности (2), меридиональная северная (3), меридиональная южная (4) и среднее по всем группам (5). а) по эпохам в период 1899–2016 гг.: ■ – меридиональная северная, □ – зональная циркуляционная, ▨ – меридиональная южная; б) внутри меридиональной южной циркуляционной эпохи в период 1957–2016 гг.: ■ – 1957–1969 гг., ▤ – 1970–1980 гг., □ – 1981–1997 гг., ▨ – 1998–2016 гг.

ЭЦМ в течение третьей эпохи уменьшалась, особенно существенно в современный период.

Выводы. Установлено, что в период 1899–2016 гг. от первой циркуляционной эпохи к третьей эпохе уменьшалось количество переходов с повторяемостью не менее 10%. Это означает, что возрастала повторяемость “случайных” переходов, с малой повторяемостью. Показано, что в то же время наблюдалось существенное уменьшение от 86 до 36% доли переходов ЭЦМ с блокирующими процессами с сохранением элементов предыдущего процесса. В третьей циркуляционной эпохе в период 1957–2016 гг. в связи с большой повторяемостью ЭЦМ 13з и 13л преобладали переходы именно в эти ЭЦМ. Такие изменения можно проследить по всем группам циркуляции.

Выявлены переходы ЭЦМ, не отмечавшиеся ни разу за весь рассмотренный период в 118 лет.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о росте неустойчивости атмосферы в течение второй половины XX в. и, особенно, в последнее 19-летие, что отражается на характере погоды и приводит к увеличению повторяемости экстремальных погодных явлений на территории России.

Благодарности. Анализ циркуляционных режимов в высоких широтах выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-17-00647), а исследование переходов ЭЦМ, приводящих к повышенной повторяемости экстремальных погодно-климатических явлений в субарктических регионах, осуществлено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 118-05-60216), а на юге ЕТР и на Дальнем Востоке – в рамках Программы Президиума РАН №51.

Acknowledgments. Analysis of circulation regimes at high latitudes was fulfilled with financial support of

the Russian Science Foundation, project no. 14-17-00647; the study of transitions of ECM in subarctic regions, leading to increased frequency of extreme weather and climate events was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-05-60216, and by RAS Presidium program № 51 – in the south of European Russia and in the Russian Far East.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Особенности изменчивости циклонической активности умеренных широт Северного полушария, связанные с ведущими модами атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2015. Т. 2. С. 14–40.
2. Вальчук Т.Е., Кононова Н.К. Экстремальные события на Солнце в проявлениях тропосферной циркуляции на Земле // *Тр. IX Пулковской Международной конференции по физике Солнца “Солнечная активность как фактор космической погоды”* (4–9 июля 2005 г. Санкт-Петербург). 2006. С. 5–10.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / ред. Г.В. Алексеев и др. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. СПб.: Государственный научный центр Российской Федерации “Арктический и антарктический научно-исследовательский институт” Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 2014. 1009 с.
4. Гирс А.А. Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 488 с.
5. Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Клещенко Л.К., Аристова Л.Н. Статистический анализ сезонных индексов блокирования в северном полушарии // *Тр. ВНИИГМИ-МЦД*. 2003. Вып. 171. С. 127–150.

6. *Дзердзеевский Б.Л.* Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии // Междувед. Геофиз. Комитет. Матер. метеорол. исслед. М.: Институт географии АН СССР, 1968. 240 с.
7. *Дзердзеевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.* Типизация циркуляционных механизмов в Северном полушарии и характеристика синоптических сезонов // Тр. науч.-исслед. учреждений Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. М.—Л.: Гидрометиздат, 1946. 80 с.
8. *Добровольский С.Г., Истомина М.Н.* Наводнения мира. М.: ГЕОС, 2006. 262 с.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2015 г. М.: Росгидромет, 2016. 68 с. URL: <http://meteorf.ru>.
10. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 г. М.: Росгидромет, 2017. 63 с. URL: <http://meteorf.ru>.
11. Каталог макросиноптических процессов по классификации Г.Я. Вангенгейма 1891—1962 гг. ААНИИ. Л.: Гидрометеоздат, 1962.
12. *Кононова Н.К.* Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
13. *Кононова Н.К.* Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX—XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 127—156.
14. *Котляков В.М. и др.* Особенности катастрофических природных процессов на Северном Кавказе на рубеже XX—XXI вв. Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы (в восьми томах). Т. 3. Опасные природные явления на поверхности суши: механизм и катастрофические следствия. М.: ИГ РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 190—209.
15. *Мещерская А.В., Маргасов В.Г., Образцова М.З., Григор О.Ю.* Снижение антициклоничности (рост циклоничности) на севере Евразии в связи с глобальным потеплением климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 2001. № 6. С. 15—24.
16. *Мордвинов В.И., Тихомолов Е.М., Караханян А.А.* Закономерности чередования форм атмосферной циркуляции над Северным полушарием в XX веке в связи с проблемой солнечно-земных связей // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 2001. Вып. 113. С. 192—201.
17. *Мохов И.И.* Диагностика и структура климатической системы. Л.: Гидрометеоздат, 1993. 268 с.
18. *Попова В.В., Шмакин А.Б.* Влияние Северо-Атлантического колебания на многолетний гидротермический режим Северной Евразии. I. Статистический анализ данных наблюдений // Метеорология и гидрология. 2003. № 5. С. 62—74.
19. Природные опасности России. Монография в шести томах. Т. 5. Гидрометеорологические опасности. М.: Крук, 2001. 295 с.
20. *Сейнова И.Б., Золотарев Е.А.* Ледники и сели Приэльбрусья. (Эволюция оледенения и селевой активности). М.: МГУ, Научный мир. 2001. 203 с.
21. *Чаплыгина А.С.* Статистический анализ чередования типов циркуляции атмосферы // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 12. С. 1832—1843.
22. *Чаплыгина А.С.* О повторяемости и порядке чередования элементарных циркуляционных механизмов в зимнем сезоне // Результаты исследований по международным геофиз. проектам. Метеорологические исследования. Циркуляционные и климатические эпохи северного полушария в первой половине XX века. Сб. статей № 13. Междувед. геофиз. комитет при Президиуме АН СССР. М.: Наука, 1968. С. 19—30.
23. *Черенкова Е.А.* Региональные особенности изменения летней температуры в Западной Сибири во второй половине XX—начале XXI века // Изв. РАН. Сер. геогр. 2016. № 4. С. 52—61.
24. *Черенкова Е.А., Семенов В.А.* Связь зимних осадков на территории Европы с изменениями ледовитости арктического бассейна, температуры океана и атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2017. № 42. С. 238—247.
25. *Chernavskaya M.M., Kononova N.K., Val'chuk T.E.* Correlation between atmospheric circulation processes over the northern hemisphere and parameter of solar variability during 1899—2003 // Advances in Space Research (JASR). 2006. V. 37. Issue 8. P. 1640—1645.
26. *Kononova N.K.* Fluctuations of Northern Hemisphere atmospheric circulation in 1899—2002 // Proceedings of the International Conference “Mathematical Methods in Geophysics”. Novosibirsk: Inst. of Comp. Math. and Math. Geoph. Publ., 2003. Part II. P. 405—408.
27. *Valchuk T.E., Kononova N.K.* Solar Cycles in Atmosphere Circulation. Proceedings of the International Conference “Problems of Geocosmos”. (May 24—28, 2004. St. Petersburg, Russia). P. 379—383.

Reiteration of the Elementary Circulation Mechanisms in the Atmosphere of the Northern Hemisphere

N. K. Kononova and E. A. Cherenkova

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

e-mail: NinaKononova@yandex.ru

Received March 20, 2017

Accepted July 27, 2018

The oscillations of the atmospheric circulation of the Northern Hemisphere in the period 1899–2016 according to the classification of B.L. Dzerdzeevskii, V.M. Kurganskaya, Z.M. Vitvitskaya were studied in the paper. The reiteration of switches of the elementary circulation mechanisms (ECMs) into each other during the study period was analyzed and the differences in the alternation of the ECMs in the three circulation epochs were determined. During the study the most common, as well as not occurring switches were identified. In addition, it was found that in the transition from the meridional epoch to the zonal there was not only a general decrease in the duration of meridional processes, but also changes in the structure of the meridional group were observed. Reduction of the reiteration of the ECMs with three and two far removed from each other blocking processes (on Siberia and America or on Europe and America) was accompanied by the growth of the reiteration of the ECMs with two closely spaced blocking processes (for example, on the Atlantic and Europe). The results of the analysis show the increase in the instability of atmospheric processes during the second half of the 20th century, and especially in the last 19 years. The significant decrease in the share of the ECM switches with blocking processes with preservation of the previous process elements more than twice during the period from the first to the third circulating epoch also indicates an increase in the instability of the atmosphere, which leads to an increase in the reiteration of extreme weather events in Russia.

Keywords: global atmospheric circulation, reiteration of elementary circulation mechanisms, climate change, Northern Hemisphere.

REFERENCES

- Bardin M.Yu., Platova T.V., Samokhina O.F. Specific features of variability of cyclone activity in Northern Extratropics, associated with leading atmospheric circulation modes in Atlantic-European sector. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2015, no. 2, pp. 14–40. (In Russ.).
- Val'chuk T.E., Kononova N.K. Extreme events on the Sun in manifestations of tropospheric circulation on the Earth. In *Trudy IX Pulkovskoi mezhdunarodnoi konferentsii po fizike Solntsa "Solnechnaya aktivnost' kak faktor kosmicheskoi pogody", 4–9 iyulya 2005* [Proceedings of the 9th Pulkovo International Conference on Sun Physics "Solar Activity as a Factor of Space Weather", 4–9 July 2005]. St. Petersburg, 2006, pp. 5–10. (In Russ.).
- Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Changes and Their Impact on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2014. 1009 p.
- Girs A.A. *Makrosirkulyatsionnyi metod dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov* [Macrocirculation Method of Long-term Meteorological Forecasts]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1974. 488 p.
- Gruza G.V., Ran'kova E.Ya., Kleshchenko L.K., Aris-tova L.N. Statistical analysis of seasonal blocking indices in the Northern Hemisphere. *Trudy VNIIGMI-MTsD*, 2003, no. 171, pp. 127–150. (In Russ.).
- Dzerdzeevskii B.L. *Tsirkulyatsionnye mekhanizmy v atmosfere severnogo polushariya v XX stoletii* [Circulation Mechanisms in the Atmosphere of the Northern Hemisphere in the 20th Century]. Moscow: Inst. Geogr. Akad. Nauk SSSR, 1968. 240 p.
- Dzerdzeevskii B.L., Kurganskaya V.M., Vitvitskaya Z.M. *Tipizatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov v Severnom polusharii i kharakteristika sinopticheskikh sezonov* [Classification of the Circulation Mechanisms in the Northern Hemisphere and the Characteristics of the Synoptic Seasons]. Moscow-Leningrad: Gidrometizdat Publ., 1946. 80 p.
- Dobrovolsky S.G., Istomina M.N. *Navodneniya mira* [The Floods of the World]. Moscow: GEOS Publ., 2006. 262 p.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2015 god* [Report on the Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2015]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2016. 68 p.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2016 god* [Report on the Climate Features on the Territory of the Russian Federation in 2016]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2017. 63 p.
- Katalog makrosinopticheskikh protsessov po klassifikatsii G.Ya. Vangengeima 1891–1962* [Catalog of Macrosynoptic Processes According to the Classification of G.Ya. Wangengeim in 1891–1962]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1962.
- Kononova N.K. *Klassifikatsiya tsirkulyatsionnykh mekhanizmov Severnogo polushariya po B.L. Dzerdzeevskomu* [Classification of the Circulation Mechanisms of the Northern Hemisphere According to B.L. Dzerdzeevskii]. Moscow: Voentekhnizdat Publ., 2009. 372 p.
- Kononova N.K. Changes in the Atmospheric circulation in the Northern Hemisphere in the 20th–21st centuries and their consequences for the climate. *Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2015, no. 1, pp. 127–156. (In Russ.).
- Kotlyakov V.M. et al. *Osobennosti katastroficheskikh prirodnykh protsessov na Severnom Kavkaze na rubezhe XX – XXI vekov. Izmenenie okruzhayushchei sredy i klimata: prirodnye i svyazannye s nimi tekhnogennye katastrofy (v vos'mi tomakh). T. 3. Opasnye prirodnye yavleniya na poverkhnosti sush: mekhanizm i katastroficheskie sledstviya* [Features of the Catastrophic Natural Processes in the Northern Caucasus at the Turn of the 20th–21st Centuries. Environmental and Climate Change: Natural and Technogenic Catastrophes (in Eight Volumes). Vol. 3. Dangerous Natural Phenomena on the Land Surface: Mechanism and Catastrophic Consequences]. Moscow: Inst. Geogr. Ross. Akad. Nauk. Inst. Fiziki Zemli Ross. Akad. Nauk Publ., 2008, pp. 190–209.
- Meshcherskaya A.V., Margasov V.G., Obratsova M.Z., Grigor O.Yu. Reduction of anticyclone activity (growth

- of cyclone activity) in the North of Eurasia due to global warming. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2001, no. 6, pp. 15–24. (In Russ.).
16. Mordvinov V.I., Tikhomolov E.M., Karakhyan A.A. Regularities in the alternation of atmospheric circulation patterns over the Northern Hemisphere in the 20th century in connection with the problem of solar-terrestrial relations. *Issledovaniya po Geomagnetizmu, Aeronomii i Fizike Solntsa*, 2001, no. 113, pp. 192–201. (In Russ.).
17. Mokhov I.I. *Diagnostika i struktura klimaticheskoi sistemy* [Diagnosis and Structure of Climate System]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1993. 268 p.
18. Popova V.V., Shmakina A.B. Influence of the North Atlantic Oscillation on multiyear hydrological and thermal regime of northern Eurasia. I. Statistical analysis of observational data. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2003, no. 5, pp. 62–74. (In Russ.).
19. *Prirodnye opasnosti Rossii. Tom 5. Gidrometeorologicheskie opasnosti* [Natural Hazards of Russia. Vol. 5. Hydrometeorological Hazards]. Moscow: Kruk Publ., 2001. 295 p.
20. Seinova I.B., Zolotarev E.A. *Ledniki i seli Priel'brus'ya. (Evolyutsiya oledeneniya i selevoi aktivnosti)* [Glaciers and Mudflows of the Elbrus Region. (Evolution of Glaciation and Mudflow Activity)]. Moscow: Mosk. Gos. Univ., Nauchnyi Mir Publ., 2001. 203 p.
21. Chaplygina A.S. Statistical analysis of alternation of types of atmospheric circulation. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geofiz.*, 1961, no. 12, pp. 1832–1843. (In Russ.).
22. Chaplygina A.S. On the frequency and order of alternation of elementary circulation mechanisms in winter season. In *Rezul'taty issledovaniy po mezhdunarodnym geofiz. proektam. Meteorologicheskie issledovaniya. Tsirkulyatsionnye i klimaticheskie epokhi severnogo polushariya v pervoi polovine XX veka. Sb. statei № 13. Mezhdoved. geofiz. komitet pri Prezidiume AN SSSR* [Results of International Geophysics Research Projects. Meteorological Researches. Circulation and Climatic Epochs in the Northern Hemisphere in the first half of the 20th century. Vol. 13. Interdepart. Committee on Geophysics at the Presidium of the USSR Acad. of Sci.]. Moscow: Nauka Publ., 1968, pp. 19–30. (In Russ.).
23. Cherenkova E.A. Regional peculiarities of summer temperature changes in Western Siberia in the second half of the 20th–early 21st centuries. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 4, pp. 52–61. (In Russ.).
24. Cherenkova E.A., Semenov V.A. A link between winter precipitation in Europe and the Arctic Sea ice cover, sea surface temperature, and atmospheric circulation. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, no. 42, pp. 238–247. (In Russ.).
25. Chernavskaya M.M., Kononova N.K., Val'chuk T.E. Correlation between atmospheric circulation processes over the northern hemisphere and parameter of solar variability during 1899–2003. *Adv. Space Res.*, 2006, no. 37 (8), pp. 1640–1645.
26. Kononova N.K. Fluctuations of Northern Hemisphere atmospheric circulation in 1899–2002. In *Proceedings of the International Conference "Mathematical Methods in Geophysics"*. Novosibirsk: IVMiMG SO RAN Publ. 2003, part II, pp. 405–408.
27. Valchuk T.E., Kononova N.K. Solar Cycles in Atmosphere Circulation. In *Proceedings of the International Conference "Problems of Geocosmos". May 24–28, 2004*. St. Petersburg, 2004, pp. 379–383.