

# Связь температуры воздуха, осадков и баланса массы ледников с макроциркуляционными процессами на северо-востоке Сибири и Полярном Урале

М.Д. Ананичева, Н.К. Кононова

Институт географии РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 4 марта 2007 г.

Представлена к печати А.Н. Кренке

Проанализировано влияние элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) на состояние баланса массы ледников и корреляции ЭЦМ с летними температурами и осадками холодного периода; выделены селеопасные и лавиноопасные ЭЦМ.

## Введение

В настоящей работе проанализированы связи климатических и гляциологических характеристик, влияющих на режим ледников, с циркулирующей атмосферой в Северном полушарии. Циркуляция атмосферы представлена в типизации Б.Л. Дзердзеевского [7, 8, 17–19]. Каталогизация макроциркуляционных процессов (элементарных циркуляционных механизмов — ЭЦМ) ведется с 1899 г. по настоящее время [9, 10, 13, 14]. Для анализа выбраны северо-восток Сибири (Северный массив гор Сунтар-Хаята) и Полярный Урал.

Температурный и влажностный режим для первого региона исследован на основе рядов средних месячных температур воздуха и сумм осадков 21 метеостанции, отобранной с учетом охвата всей территории, а для второго региона — четырех станций. Использованы данные ВНИИГМИ-МЦД и Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН [22], а также [5]. В горах Сунтар-Хаята выбран Ледник № 31, баланс массы которого получен на основе измерений и расчетов в [3] за 1957–2000 гг., а на Полярном Урале — ледник ИГАН, колебания летнего и зимнего баланса массы которого также установлены путем реконструкции по данным наблюдений за XX столетие [20].

Мы проанализировали связь циркуляционной ситуации над северо-востоком Сибири и Полярным Уралом с метеорологическими и гляциологическими параметрами по наибольшему числу высоких корреляций (относительно других) различных ЭЦМ с температурой теплого ( $T_{лет}$ ), осадками холодного ( $X_{ме}$ ) периодов и годового/зимнего/летнего баланса ( $B_n$ ,  $B_{зим}$ ,  $B_{лет}$ ) ледников. Твердая фракция осадков  $X_{ме}$  рассчитана с помощью метода Э.Г. Богдановой по универсальным зависимостям ее доли в их годовой сумме от средней месячной температуры для определенных интервалов высот [4].

В целом коэффициенты корреляции между климатическими/гляциологическими параметрами и повторяемостью отдельных ЭЦМ в году невелики и не могут считаться значимыми в традиционном

понимании ( $R=0,3-0,6$ ). Однако нужно учесть, что анализируются длинные ряды (календарь ЭЦМ с 1899 по 2005 г.,  $T_{лет}$ ,  $X_{ме}$ ,  $B_n$ ,  $B_{зим}$ ,  $B_{лет}$  — с 1930-х годов до 2000 г). Исходя из вывода, сделанного на основе корреляции длинных статистических рядов [21], можно рассматривать полученные связи как минимум значимые относительно друг друга. Ожидать высоких корреляций в данном случае не приходится в силу разнородности по своей «природе» связываемых характеристик: повторяемости типов (частота процесса) и составляющих баланса массы ледника: температуры — осадков (интенсивность). Однако связь между суммарной повторяемостью определяющих эти характеристики типов ЭЦМ и  $T_{лет}$ ,  $X_{ме}$  (также в сумме для станций определенных районов) более высокая — от 0,4 до 0,7, что позволяет перейти к количественным оценкам осадков и температуры по суммарной повторяемости благоприятных типов ЭЦМ для соответствующих районов.

## Регионы исследований

Горные районы для настоящего исследования (рис. 1) выбраны неслучайно. Согласно данным ВНИИГМИ-МЦД (г. Обнинск) по аномалиям (отклонения от средних за 1961–1990 гг.) осредненной по территории России средней за зиму (декабрь–февраль) температуры воздуха за 1939–2006 гг. на втором месте после южно-европейского региона находится именно северо-восток Сибири (коэффициент линейного тренда равен  $0,34^\circ\text{C}/10$  лет). Коэффициент тренда для весеннего периода немного ниже —  $0,24^\circ\text{C}/10$  лет, а для летнего он составляет  $0,7^\circ\text{C}/10$  лет (данные официального сайта ВНИИГМИ-МЦД [23]).

Температурный режим на северо-востоке Сибири в XX в. представляется наиболее существенным фактором значительных изменений размеров ледников (их значительного отступления). По-видимому, исследуемый район аномален с точки зрения потепления климата в конце XX в. [1, 2].

На Полярном Урале, в отличие от востока Якутии, не наблюдается интенсивного потепления. По нашим расчетам, годовые тренды температуры на

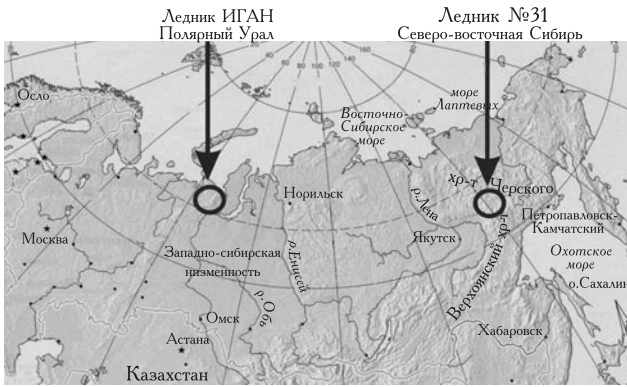


Рис. 1. Карта сравниваемых регионов с указанием месторасположения изучаемых ледников  
 Fig. 1. Map of the study regions with glacier locations

трех метеостанциях из четырех отрицательные, тренды летней температуры за последние 50 лет слабо положительные, либо нулевые. По данным ВНИИГМИ-МЦД, коэффициенты линейного тренда, обобщенные по материалам всех станций района, куда входит Полярный Урал, нулевые для зимних температур (за 1939–2006 гг.), незначительные для летних —  $0,08^{\circ}\text{C}/10$  лет и существенны только для температур переходных сезонов —  $0,24^{\circ}\text{C}/10$  лет.

Значения баланса массы ледников Полярного Урала, демонстрируя цикличность, в целом колеблются около нуля, в то время как для Ледника № 31 (горы Сунтар-Хаята) в последние десятилетия они отрицательны и продолжают уменьшаться, а ледник — отступать. Таким образом, эти регионы в настоящее время находятся в различных гляциоклиматических условиях, что дает почву для сравнительного анализа.

Внутренние территории северо-востока Сибири, отличающиеся наибольшей степенью континентальности климата в Евразии, охватывают обширные котловины — Оймяконскую, Янскую, Момо-Селеняхскую, невысокие (до 1500 м над ур. моря) нагорья (Верхоянское, Колымское, Эльгинское), высокие (до 3500 м) хребты с массивами ледников — Сунтар-Хаята, Черского, Верхоянский (Орулган), менее высокие гребни гор без ледников — Сегте-Дабан, Улахан-Бом, Омсугчанский и др. Климат отличается контрастами между очень холодными и сухими котловинами, межгорными долинами («полюса холода» Евразии) и более влажным с менее суровыми температурными условиями высокогорьем.

Для Уральских гор, вытянутых с севера на юг, характерно большое разнообразие климатических условий. Хребты не достигают снеговой линии, т.е. аккумуляция снега, обусловленная атмосферными осадками, на подавляющей площади недостаточна для питания ледников из-за значительного таяния летом. Тем не менее особые погодные условия (продолжительные и сильные ветры в течение холодного периода) обуславливают снегонакопление, превышающее количество выпадающих атмосферных осадков

в 1,5–2 раза вследствие их интенсивного перераспределения [16]. Благодаря этому в северной части горной страны (Полярный и Приполярный Урал) существуют ледники, занимающие часть каров, ранее вмещавших более обширное оледенение.

### Связь летних и зимних типов ЭЦМ с климатическими характеристиками

Была проведена корреляция температуры воздуха за теплое полугодие и осадков за холодное с продолжительностью ЭЦМ, действующих в соответствующие полугодия. Для северо-востока корреляция выполнена по данным 21 метеостанции, находящихся между  $60$  и  $70^{\circ}$  с.ш. и  $128$  и  $156^{\circ}$  в.д. Из 20 ЭЦМ, характерных для теплого полугодия, 16 (2а, 2б, 2в, 3, 4б, 4в, 6, 7ал, 7бл, 8а, 8гл, 9а, 10а, 10б, 12бл, 13л) относятся к широтной (зональной) группе циркуляции для рассматриваемого района, что видно на динамических схемах ЭЦМ [7, 15]. При всех указанных ЭЦМ на эту территорию приходят циклонические серии с запада и юго-запада. Только при ЭЦМ 6 на самом востоке региона, восточнее  $160^{\circ}$  в.д. происходит арктическое вторжение — меридиональное смещение отрога арктического антициклона к югу и соединение его с субтропическим антициклоном (блокирующий процесс). Четыре ЭЦМ (8бл, 8вл, 12а, 12вл) относятся к долготной (меридиональной) группе циркуляции. При их действии по рассматриваемой территории проходят блокирующие процессы.

Из 21 ЭЦМ холодного полугодия при пяти (4а, 7аз, 7бз, 9б, 13з) район исследований находится под влиянием западных циклонов, а южнее располагается мощный сибирский антициклон. При остальных ЭЦМ над Восточной Сибирью развивается блокирующий процесс (полоса повышенного давления соединяет сибирский антициклон с арктическим), и эта территория оказывается в области повышенного давления.

Прохождение циклонов в теплое полугодие по территории с резко континентальным климатом способствует, как правило, понижению температуры воздуха, особенно в области холодного фронта. Однако, поскольку рельеф северо-восточной Сибири — это чередование горных хребтов с высокими плоскими котловинами, реакция температуры воздуха на прохождение циклона в разных ее частях будет неодинакова. Так, на наветренных склонах при вынужденном поднятии воздуха по склону происходит дополнительное понижение температуры. На подветренных склонах отмечается фёновый эффект: повышение температуры при нисходящем движении воздуха по склону.

ЭЦМ, продолжительность ( $D$ ) которых на большей части территории связана положительными или отрицательными корреляциями с летней температурой воздуха, представлены ниже:

положительные корреляции	отрицательные корреляции
2а, 2в, 8вл, 9а, 12бл, 13л	2б, 3, 4б, 4в, 6, 7ал, 7бл, 8а, 8бл, 10а, 10б, 12а, 12вл

Таблица 1

Характеристики некоторых ЭЦМ и корреляции их суммарной продолжительности с температурой воздуха		Число станций, на которых корреляция температуры воздуха с суммарной продолжительностью (число дней) ЭЦМ*	
ЭЦМ	Характеристики		
		положительная	отрицательная
2а	циклоны приходят с юго-запада	16 из 21 (5)**	
2б	циклоны смещаются с запада по побережью Северного Ледовитого океана		14 из 21 (8)
2в	выход южных и юго-западных циклонов	13 (3)	
3	циклоны приходят с запада и перемещаются между 60–70° с.ш.		13 (6)
4б	циклоны приходят с запада и перемещаются между 60–70° с.ш.		17 (9)
4в	прохождение циклонов преимущественно по берегу Северного Ледовитого океана		18 (6)
6	к западу от 160° в.д. перемещаются западные циклоны между 60 и 70° с.ш.; восточнее 160° в.д. происходит арктическое вторжение		13 (4) (восток и запад региона)
7 ал	перемещение циклонов с запада в северной и южной части региона	(3) (в северной части региона)	12 (2)
7 бл	циклоны проходят по берегу Северного Ледовитого океана, смещаясь к югу региона в восточной части		16 (5)
8 а	способствует перемещению циклонов с запада в полосе 60–70° с.ш.		14 (4)
8 бл	арктическое вторжение между 100 и 120° в.д. и восточнее отмечается малоградиентная область пониженного давления, которую почти не задевают юго-западные циклоны, перемещающиеся от берегов Камчатки на Аляску		16 (3)
8вл	арктические вторжения распространяются на весь регион	14 (1) (Арка)	(1) (Сахаджи)
8 гл	развитие циклонической деятельности		20 (8)
9а	циклоны идут по берегу Северного Ледовитого океана, в восточной части региона смещаясь к Камчатке; между долготами 110–130° и широтами 60–68° располагается область повышенного давления	17 (9)	
10а	западные циклоны проходят по северу региона; южнее располагается антициклон (при ЭЦМ 10а) или малоградиентная область пониженного давления (при ЭЦМ 10б)	(1) (Эльген) 10б	19 (6) 10а
10б			15 (3) 10б
12 а	весь регион подвержен арктическому вторжению; действует в любое время года, преимущественно весной	(1) (Арка)	12 (4)
12 бл	способствует перемещению над регионом юго-западных циклонов. С запада и востока регион окружен областями арктических вторжений	13 (4) (2)	
12 вл	на регион направлено арктическое вторжение; с запада и востока к региону примыкают области выхода южных циклонов	1 (Арка)	17 (6)
13 л	приносит южные и юго-западные циклоны на всю Восточную Сибирь; атлантические циклоны проходят по Северному Ледовитому океану вблизи Северного полюса	14 (9) 1 (Арка)	

\*Всего проанализированы данные 21 метеостанции.

\*\*В скобках указано количество станций, для которых корреляции значимы.

В табл. 1 кратко охарактеризованы ЭЦМ, при которых отмечаются положительная или отрицательная корреляции температуры воздуха с суммарной продолжительностью (числом дней) ЭЦМ.

ЭЦМ, с которыми отмечаются значимые корреляции летней температуры воздуха для северо-востока Сибири, представлены в табл. 2.

Мы также рассмотрели корреляции ЭЦМ зимнего периода с твердыми и общими осадками по дан-

ным 20 метеостанций, расположенных на северо-востоке Сибири. Преобладающие положительные и отрицательные корреляции распределились следующим образом:

положительные	отрицательные
1б, 4а, 7аз, 9б, 11б, 11г, 12а, 12бз	1а, 7бз, 8бз, 8гз, 11а, 11в, 12вз, 13з

Таблица 2

ЭЦМ со значимыми корреляциями температуры воздуха по данным разных метеостанций

Метеостанция	Положительные корреляции	Отрицательные корреляции
Аллах-Юнь	13л	2а, 2б
Арка	6, 8вл, 12а, 12вл	13л
Агаякан	2б, 9а, 13л	4б, 4в, 7бл, 8а
Батагал	2в, 8бл, 13л	4б, 7бл, 8бл, 12бл
Делянки	3	2а, 7бл, 10а, 12а
Эльген	2а, 8а, 10б	2б, 3, 4в, 6, 8гл, 12а, 12бл, 12вл
Лема		6, 8гл, 12вл
Хатынах	2в	2б, 8гл, 10а, 12вл
Нера	2в, 8а	3
Каньон	9а	10а, 12а, 12вл
Омсукчан		2б, 4б, 12а, 12вл.
Оймякон	9а, 13л	2б, 2в, 4б, 4в, 8бл, 8гл, 10а
Палатка	2а, 6, 7ал, 8а, 9а, 12бл	3, 10б
Сусуман	9а, 13л	2б, 4б, 8бл, 8гл, 10а, 12вл
Сахаджи	2а, 4в, 7ал, 12бл	3, 8вл
Сурен-Кюэль	3, 7ал, 9а, 12бл	4в
Томпо	9а, 12бл	6
Уега	8бл, 8гл, 13л	3, 4б, 6, 7бл
Усть-Мома	2а, 13л	2б, 3, 4б, 7ал, 8а
Верхоянск	9а, 13л	4б, 4в, 8а, 8гл, 10б
Западная	2а, 9а, 13л	2б, 2в, 3, 4б, 4в, 7ал, 7бл, 8а, 8гл, 10а, 10б

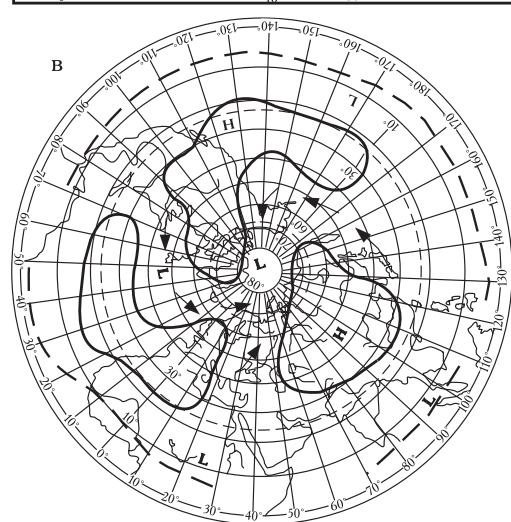
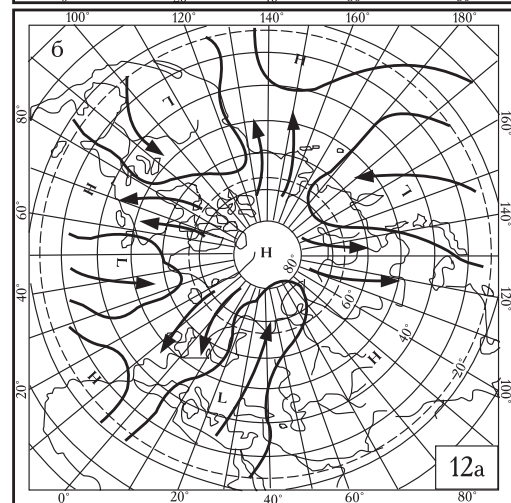
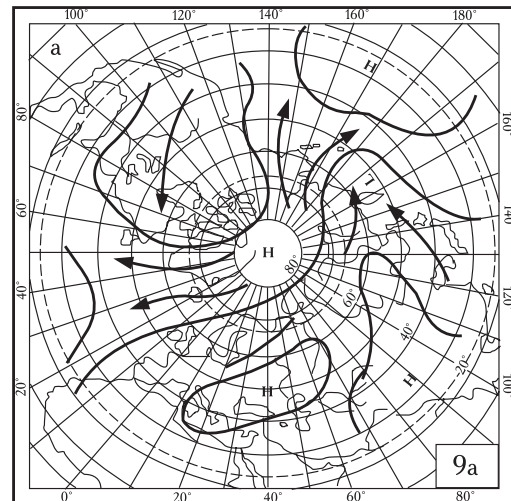


Рис. 2. Динамические схемы ЭЦМ: а — ЭЦМ 9а: антициклон в полярной области. Развиваются два блокирующих процесса: через Гренландию на Атлантику и через Аляску на Тихий океан. Отмечаются три одновременных выхода южных циклонов: с юго-запада Северной Америки на Лабрадор и северо-запад Атлантики, со Средиземного моря на северо-восток Европы и вдоль Тихоокеанского побережья Азии; б — ЭЦМ 12а: мощный антициклон в полярной области. Блокирующие процессы развиваются в четырех секторах полушария: в Сибирском, в восточной части Американского и западной части Атлантического, на западе Европейского и востоке Атлантического, на востоке Тихоокеанского. Выходы южных циклонов происходят одновременно в четырех секторах: в центральной части Атлантического, в восточной части Европейского (средиземноморские циклоны), вдоль Тихоокеанского побережья Азии, на центральную часть Северной Америки; в — ЭЦМ 13з: над полярным бассейном располагается область низкого давления. Блокирующие процессы отсутствуют. Выходы южных циклонов отмечаются одновременно в трех секторах: Атлантическом, Тихоокеанском, в восточной части Европейского (средиземноморские циклоны)

Fig. 2. Dynamic schemes of ECM: ECM 9a: Two northern intrusions: via Greenland and Atlantic, via Alaska to Pacific Ocean; three southern cyclones: from SW of North America to Labrador and NW of Atlantic, from SW to NE of Europe, along the Pacific coast of Asia; ECM 12a: Over the polar basin there is an intensive anticyclone. Blocking processes develop in 4 sectors of the Northern Hemisphere: in Siberian, in the eastern part of American one and western part of Atlantic sector, in the west of European sector and east of Atlantic one, in the east of Pacific; ECM 13z: Over the polar basin there is a low pressure area. Blockings are absent, outlets of southern cyclones are noted in three sectors — Atlantic, Pacific, in the eastern part of European one (Mediterranean cyclones)

Таблица 3

Суммарная годовая продолжительность ЭЦМ (в днях) и характер ее тренда					
ЭЦМ	Средняя продолжительность за 1899–2005 гг	Средняя продолжительность за 1996–2005 гг.	Современные изменения тренда		
			начало, год	положение относительно среднего	
1а	5,53	3,0	1967	ниже	
1б	5,28	2,0	1988	ниже	
2а	4,75	1,8	1992	ниже	
2б	7,82	0,3	1993	почти не встречается	
2в	3,93	0,2	1993	почти не встречается	
3	11,51	9,9	1998	около среднего	
4а	3,08	1,4	1989	ниже	
4б	12,1	2,6	1997	ниже	
4в	7,87	1,9	1988	ниже	
6*	6,83	7,1	1989	около среднего	
7аз	10,1	4,9	1987	ниже	
7ал	9,34	4,3	1971	ниже	
7бз	6,45	2,9	1990	ниже	
7бл	5,50	0,3	1996	почти не встречается	
8а	12,17	10,0	1988	ниже	
8бз	3,87	1,3	1989	ниже	
8бл*	3,42	4,0	1979	преимущественно выше	
8вл*	2,53	4,8	1996	выше	
8гз*	2,50	9,5	1997	преимущественно выше	
9а**	11,52	20,6	1981	почти вдвое выше	
9б**	4,81	9,5	1981	почти вдвое выше	
10а	16,37	5,5	1961	втрое ниже	
10б	11,07	6,1	1996	ниже	
11а	24,51	14,5	1979	ниже	
11б	11,65	4,8	1982	ниже	
11в	7,22	6,4	1986	около среднего	
11г*	6,27	8,3	1989	выше	
12а**	16,31	36,9	1993	вдвое выше	
12бз	16,05	16,7	1952	около среднего, с 2000 г. выше среднего	
12бл*	8,38	9,6	1993	выше	
12вз	10,83	6,7	1973	ниже	
12вл*	6,1	7,8	1999	выше	
13з**	20,43	54,9	1963	выше	
13л**	24,63	68,9	1962	выше	

\*Продолжительность ЭЦМ превышает среднее многолетнее значение и продолжает расти.

\*\*ЭЦМ, продолжительность которых существенно превышает среднюю многолетнюю.

Заметим, что при ЭЦМ 12а, который действует в течение всего года, отмечаются отрицательные корреляции с температурой воздуха и положительные — с твердыми осадками. Таким образом, выделились ЭЦМ, заметно влияющие на летние температуры и зимние осадки на северо-востоке Сибири.

Проанализируем многолетние изменения годовой продолжительности указанных ЭЦМ. В частно-

сти, анализ многолетних изменений длительности каждого ЭЦМ позволил выделить те типы циркуляции, продолжительность которых в последнее десятилетие превышает среднее многолетнее значение ( $D_{cp}$ ), и продолжает расти (в табл. 3 они отмечены звездочкой). Это ЭЦМ 6, 8бл, 8вл, 8гз, 11г, 12бл, 12вл. Типы, продолжительность которых существенно превышает среднюю многолетнюю (9а,

9б, 12а, 13з, 13л), отмечены двумя звездочками. В сумме насчитывается 12 ЭЦМ, из которых 8вл, 9а, 12бл и 13л вызывают повышение летних температур; 6, 8бл, 12а и 12вл — понижение; ЭЦМ 9б и 11г способствуют увеличению зимних осадков; ЭЦМ 8гз и 13з — их уменьшению.

Для Полярного Урала наилучшие корреляции летних температур и твердых осадков отмечаются с ЭЦМ летнего периода: 12а и 13з, а также 9а. При ЭЦМ 9а на Полярный Урал выходят южные циклоны, формирующиеся над западной частью Средиземного моря (рис. 2). ЭЦМ 9а встречается в течение всего теплого полугодия, с марта по сентябрь, с наибольшей повторяемостью в первой декаде июня [15]. Суммарная годовая продолжительность этого ЭЦМ с 1981 г. превышает среднюю многолетнюю величину иногда в 2–3 раза.

Относительно высокая корреляция с летней температурой (положительная для станции Салехард и отрицательная для станции Березово) наблюдается при ЭЦМ 12а, когда Полярный Урал находится на границе теплой и холодной воздушных масс (см. рис. 2б). В зависимости от положения барических полей на Полярном Урале возможно либо сильное потепление, либо столь же сильное похолодание. Этот ЭЦМ встречается в течение всего года, но наибольшая повторяемость приходится на май. С 1993 г. намечился рост суммарной продолжительности таких процессов, и в последние годы она превышает  $D_{ср}$  более чем втрое. Относительно высокие корреляции твердых осадков отмечаются с зимними типами ЭЦМ, в первую очередь с 13з (три станции из четырех), когда над Арктикой наблюдается циклоническая циркуляция, поддерживаемая южными циклонами, которые направляются к полюсу с Тихого и Атлантического океанов, а также из восточной части Средиземного моря через Полярный Урал (см. рис. 2в). Кроме того, осадки на Полярный Урал приносят с запада атлантические циклоны, так что при этом ЭЦМ суммарное их количество здесь велико. ЭЦМ 13з действует с сентября по апрель, наибольшая повторяемость отмечается в первой половине декабря. Суммарная годовая продолжительность этого ЭЦМ постоянно росла и в 1997 г. достигла максимума за весь период наблюдений с 1899 г. (108 дней в году). В последние годы она снижается, но все же превышает среднее значение более, чем вдвое.

На рис. 3 даны графики суммарной продолжительности ЭЦМ, определяющих зимние осадки, а также антициклонические и циклонические условия в теплый период года. Как видно на рисунках, суммарная продолжительность ЭЦМ, приносящих осадки зимой, колеблется приблизительно в одинаковых пределах (100–160 дней) в течение XX в., явной тенденции к уменьшению твердых осадков (а, значит, и аккумуляции) не наблюдается; суммарная продолжительность ЭЦМ, приносящих теплую погоду без осадков летом, в последние десятилетия сократилась, соответственно можно ожидать замедления интен-

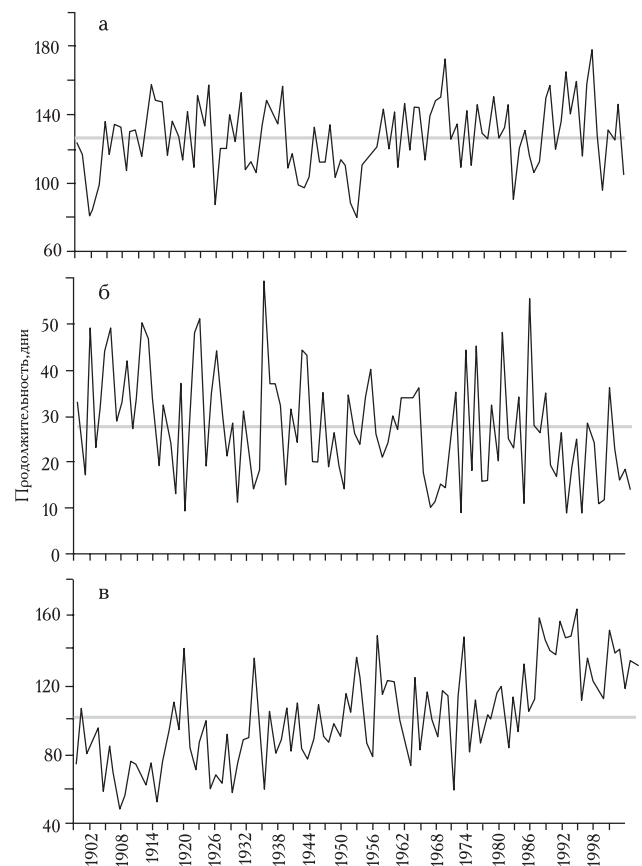


Рис. 3. Суммарная продолжительность ЭЦМ, приносящих осадки в холодное полугодие и циклоническую/антициклоническую погоду на Полярный Урал: а — продолжительность ЭЦМ, приносящих осадки в холодное полугодие; б — продолжительность ЭЦМ, связанных с антициклоническими условиями в теплое полугодие; в — продолжительность ЭЦМ, связанных с циклоническими условиями в теплое полугодие

Fig. 3. Total duration of the ECM related to precipitation in cold season and cyclonic/anticyclonic type of circulation in warm season in Polar Ural: а — Duration of ECMs bringing precipitation in cold season; б — Duration of ECMs, conditioning anticyclonic circulation in warm season; с — Duration of ECMs, conditioning cyclonic circulation in warm season

сивности абляции ледников; в целом продолжительность ЭЦМ, определяющих антициклоническую погоду в течение года, уменьшилась за последние десятилетия, а ЭЦМ, ответственных за приход циклонов на Полярный Урал, возросла, что в общем благоприятствует питанию ледников этого района в последнее время и в ближайшем будущем.

#### Циркуляционные условия аккумуляции и абляции ледников

По связи летних температур на высоте границы питания Ледника № 31, восстановленных по данным метеостанции Агаякан, находящейся при выходе долины ледника в среднегорье (750 м), с балансом его массы получены годовые значения последнего ( $B_n$ ) за 1960–2001 гг. [3]. Суммарный баланс массы ледника за этот период был проверен путем расчетов по понижению поверхности ледника и сопоставле-

ния топографических съемок 1957 и 2001 гг.

Мы проанализировали связь годовых значений баланса массы Ледника № 31 с повторяемостью различных типов циркуляции атмосферы, которые могут влиять на формирование составляющих  $B_n$ . В первую очередь это ЭЦМ, ответственные за повышенное (вследствие идущего здесь потепления) таяние, а также ЭЦМ, при которых ледниковый район получает обильные твердые осадки — основной фактор аккумуляции в холодное время года.

Выяснилось, что аккумуляция на Леднике № 31 связана преимущественно с ЭЦМ 1б и 4а:

	Аккумуляция	Абляция
Ледник № 31 (Сунтар-Хаята)	1б, 2б, 3, 4а, 6, 9а	10а, 10б, 13л
Ледник ИГАН (Полярный Урал)	10а, 13з	4в, 12г

Напомним, что для указанных ЭЦМ характерна положительная корреляция с зимними осадками. Кроме того, отмечается относительно высокая корреляция аккумуляции Ледника № 31 с ЭЦМ теплого периода: 2б, 3, 6 и 9а, что возможно благодаря низким летним температурам в горном массиве Сунтар-Хаята.

Наибольшее прогревание и абляция ледников происходят в теплое время года при сочетании положительной аномалии температуры воздуха с ясной безоблачной погодой. На северо-востоке Сибири это возможно при материковом (не арктическом) антициклоне, либо в условиях малоградиентной области пониженного давления под воздействием ЭЦМ 10б, 13л и 10а. Если преобладают упомянутые ЭЦМ, увеличиваются положительные корреляции с летними температурами и отсутствуют осадки. Метеорологические условия при ЭЦМ 13л могут способствовать также

формированию ледниковых паводков в результате быстрого таяния ледника.

Как видно на рис. 4, где показан ход суммарной продолжительности ЭЦМ теплого и холодного периодов, положительно или отрицательно связанных с балансом массы Ледника № 31, увеличивается повторяемость типов, неблагоприятных для баланса массы ледника как в летнее, так и в зимнее время. Связь баланса массы ледника с суммарной продолжительностью определяющих типов ЭЦМ оказалась не выше (по значению коэффициентов корреляции), чем с продолжительностью отдельных типов.

Таким образом, можно сделать вывод, что синоптические процессы, происходящие на северо-востоке Сибири, не способствуют питанию ледников в последние 40 лет. Отметим, однако, что темп роста продолжительности неблагоприятных для ледников ЭЦМ летнего периода в последнее десятилетие замедлился.

Наибольшая положительная корреляция летнего баланса массы ледника ИГАН (Полярный Урал) отмечается с ЭЦМ 10а, для которого, как говорилось выше, выявлена значимая отрицательная корреляция с летними температурами по данным станции Салехард. Этот ЭЦМ действует в течение всего года, но наибольшая повторяемость приходится на конец апреля. Интересно, что такова же по величине и знаку корреляция годового баланса массы ледника ИГАН с ЭЦМ 10а, хотя выявлены относительно высокие отрицательные корреляции твердых осадков с указанным ЭЦМ по данным станций Хаседа-Хард и Березово. Вероятно, положительный баланс сохраняется вследствие понижения температуры при арктическом вторжении. С 1961 г. суммарная продолжительность ЭЦМ 10а существенно ниже среднего значения (см. табл. 3).

Такая же по величине отрицательная корреляция годового баланса массы ледника ИГАН отмечается с ЭЦМ 4в. Корреляции летних температур с указанным ЭЦМ отрицательны, но очень малы. При его действии происходит арктическое вторжение на Полярный Урал, причем ядро антициклона устанавливается именно над Полярным Уралом. Процесс этот преимущественно летний, наибольшая повторяемость приходится на начало июля. Антициклоническая погода летом сопряжена с отсутствием облачности и сильной инсоляцией, особенно в долгий полярный день. Такая погода способствует испарению с поверхности снега даже при отрицательной температуре воздуха. С 1988 г. суммарная годовая продолжительность ЭЦМ 4в постоянно снижается и не превышает среднюю многолетнюю.

Заметная отрицательная корреляция зимнего баланса массы ледника ИГАН выявлена с ЭЦМ 12г, хотя отмечается значительная положительная корреляция твердых осадков с ЭЦМ 12г по данным станции Хаседа-Хард. При указанном макропроцессе Полярный Урал оказывается в тылу антициклона, вторгающегося на Сибирь, и в передней части цикло-

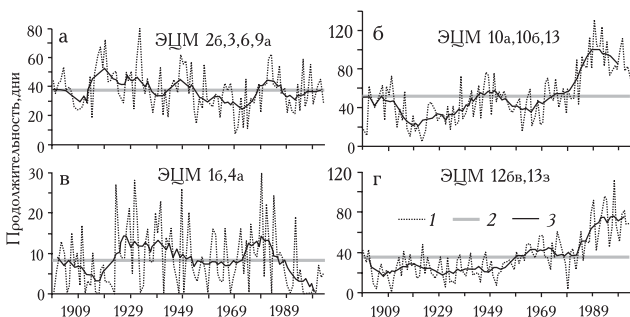


Рис. 4. Суммарная продолжительность ЭЦМ в теплое и холодное полугодия, связанная с балансом массы Ледника № 31 (Сунтар-Хаята): а, б — положительная и отрицательная связи с ЭЦМ теплого периода, соответственно; в, г — положительная и отрицательная связи с ЭЦМ холодного периода, соответственно. 1 — суммарная продолжительность, 2 — средние значения, 3 — сглаженные 10-летние значения

Fig. 4. Total duration of the ECMs of warm and cold seasons related to  $B_n$  of the Glacier № 31: а, б — positive and negative relations with warm season ECMs; в, г — positive and negative relations with cold season ECMs. 1 — total duration, 2 — mean values, 3 — 10-years running values

на, смещающегося с запада, т.е. в области выноса теплого воздуха с юга. Это процесс холодного полугодия с наибольшей повторяемостью в марте. Закономерно, что с поступлением теплого воздуха баланс массы ледника уменьшается. С 1998 г. суммарная годовая продолжительность ЭЦМ 12г вдвое ниже средней многолетней.

Теснота связи баланса массы ледника ИГАН с ЭЦМ ниже, чем с температурой воздуха и осадками, тем не менее по знаку они согласуются с теми условиями погоды, которые создаются на Полярном Урале под воздействием того или иного ЭЦМ.

Наибольшее прогревание и абляция ледников происходят в теплое время года при сочетании положительной аномалии температуры воздуха и ясной безоблачной погоды. На северо-востоке Сибири это возможно при действии материкового (не арктического) антициклона, либо в условиях малоградиентной области пониженного давления. Осадки в это время отсутствуют. На Полярном Урале указанный процесс связан летом с ЭЦМ 4в, синоптическая ситуация, которая складывается при этом ЭЦМ, рассмотрена выше. В холодное полугодие (преимущественно в марте) абляция на Полярном Урале связана с ЭЦМ 12г, когда, как уже отмечалось, в рассматриваемый регион поступают массы теплого воздуха с юга.

Аккумуляция происходит в зимний период при выпадении твердых осадков на фронтах западных и южных циклонов и их сохранении при отрицательных температурах воздуха преимущественно в арктических антициклонах. На северо-востоке Сибири такая ситуация складывается и в теплое время года.

На Полярном Урале выпадение твердых осадков зимой связано преимущественно с ЭЦМ 13з, но аккумуляция с ним коррелирует слабо из-за относительно высокой температуры, приносимой в северные широты южными циклонами. В основном аккумуляция ледников на Полярном Урале связана с ЭЦМ 10а, при котором происходит арктическое вторжение на этот регион, что обуславливает низкие температуры воздуха.

#### Селеопасные и лавиноопасные ЭЦМ на северо-востоке Сибири и Полярном Урале

По разработанной ранее методике [11, 12] мы выделили ЭЦМ, способствующие формированию экстремальных явлений в исследуемых регионах. На северо-востоке Сибири к ним относятся селеопасные ЭЦМ, с которыми связаны гляциальные сели, фор-

мирующиеся при положительной аномалии летних температур воздуха, и гляцио-дождевые сели (положительные аномалии летних температур воздуха «плюс» положительные аномалии осадков) (табл. 4).

Лавиноопасные ЭЦМ условно можно разделить на те, при которых лавины очень вероятны (положительные аномалии твердых осадков, отрицательные аномалии температуры воздуха), и те, при которых лавины возможны (отрицательные аномалии температуры воздуха, вероятность положительных аномалий твердых осадков 50:50) (см табл. 4).

На северо-востоке Сибири наиболее лавиноопасным оказался ЭЦМ 8вз. В 67% случаев при действии этого ЭЦМ отмечался сход лавин и в 78% случаев этот ЭЦМ наблюдался накануне схода лавин [12]. Возможность схода лавин при макропроцессах теплого полугодия также обусловлена относительно низкими летними температурами воздуха.

На Полярном Урале при ЭЦМ 9а (при действии этого ЭЦМ на трех станциях из четырех отмечается существенная положительная связь с  $T_{лет}$ ), может произойти быстрое таяние ледника и формирование ледниковых паводков. Продолжительность указанного ЭЦМ с 1981 г. превышает среднюю многолетнюю в 3 раза (см. табл. 3).

Гляцио-дождевые сели на леднике ИГАН, как видно из табл. 4, возможны при ЭЦМ 8вл и 13л, поскольку при их действии сюда выходят южные и западные циклоны, которые приносят повышение температуры воздуха и вызывают обильные осадки. Продолжительность ЭЦМ 8вл с 1996 г. превышает среднюю, хотя это редкий тип (2,5 дня в году). Суммарная годовая продолжительность ЭЦМ 13л постоянно растет и с 1962 г. превышает среднюю многолетнюю (24 дня в году), причем в последние 10 лет более чем вдвое.

Лавиноопасными на Полярном Урале можно считать ЭЦМ 11г и 12а. При ЭЦМ 11г территория находится на границе циклонической и антициклонической областей, что обуславливает крайне неустойчивую погоду. Связь с осадками по данным всех станций положительная, в то же время аккумуляция на леднике ИГАН не происходит. При ЭЦМ 12а регион также находится на границе барических областей. Отмечается положительная связь этого ЭЦМ с твердыми осадками в течение всего года и отрицательная — с летними температурами. Осадки приносят средиземноморские циклоны, но аккумуляция на леднике также отсутствует. Суммарная годовая про-

Таблица 4  
ЭЦМ, обуславливающие экстремальные природные явления в исследуемых горных регионах

Регион	Селеопасные ЭЦМ		Лавиноопасные ЭЦМ	
	гляциальные сели и паводки	гляцио-дождевые сели	очень вероятны	возможны
Северо-восток Сибири	2а и 12бл	7ал, 9а, 13л	8вз	3, 7бл, 8гл 10б, 12вл, 13з
Полярный Урал	9а	8вл и 13л	11г	12а



должительность ЭЦМ 11г с 1989 г. в целом выше средней (6 дней в году); продолжительность ЭЦМ 12а с 1993 г. превышает среднюю (16 дней) более чем втрое.

#### Выводы

1. Для двух анализируемых регионов — северо-востока Сибири и Полярного Урала, находящихся в разных климатических условиях и со второй половины XX в. подверженных разным климатическим тенденциям (в первом отмечается значительное потепление, а во втором нет ярко выраженного тренда), характерны в основном разные наборы ЭЦМ, повторяемость которых наиболее тесно связана с летней температурой воздуха и зимними осадками по данным метеостанций в этих регионах.

2. Положительные корреляции с летними температурами для северо-востока Сибири характерны для тех ЭЦМ, при которых регион оказывается под влиянием материкового антициклона или малоградиентной области пониженного давления. В таких случаях в теплое время года происходит прогревание; отрицательными корреляциями летние температуры связаны с ЭЦМ, при которых наблюдается активная циклоническая деятельность (постоянный приток холодного воздуха, облачность, осадки и затраты тепла на испарение), либо с заточками арктического воздуха. Положительными корреляциями ЭЦМ связаны с твердыми осадками, если они выпадают на фронтах западных или южных циклонов, отрицательными — с антициклоническим режимом или малоградиентной областью пониженного давления.

3. Положительные корреляции летних температур на Полярном Урале фиксируются с теми ЭЦМ, при которых на регион выходят южные циклоны, либо он находится на границе теплых и холодных воздушных масс. Суммарная продолжительность этих типов выше средней. Отрицательные корреляции отмечаются с ЭЦМ, ответственными за вторжения арктических холодных масс. Положительные корреляции с твердыми осадками характерны для ЭЦМ, при которых южные циклоны выходят на Полярный Урал (сейчас этот процесс очень активен), а отрицательные — для ЭЦМ, определяющих расположение над Полярным Уралом отрога сибирского антициклона (продолжительность ниже средней).

4. Наибольшее прогревание и абляция ледников происходят в теплое время года при сочетании положительной аномалии температуры воздуха с ясной безоблачной погодой. На северо-востоке Сибири это возможно в материковом (не арктическом) антициклоне, либо в малоградиентной области пониженного давления. На Полярном Урале этот процесс связан летом с ЭЦМ, при которых развивается антициклон с ясной погодой и положительными аномалиями температуры, либо сюда смещаются западные циклоны, приносящие дожди. В холодное полугодие абляция на Полярном Урале связана с ЭЦМ, при которых в рассматриваемый регион поступают массы теплого

воздуха с юга.

5. Аккумуляция происходит в холодное полугодие при выпадении твердых осадков на фронтах западных и южных циклонов и их сохранении при отрицательных температурах воздуха преимущественно в арктических антициклонах. На северо-востоке Сибири такое положение складывается и в теплое время года. На Полярном Урале аккумуляция ледников в основном связана с ЭЦМ, при которых происходят арктические вторжения, что обеспечивает низкие температуры воздуха.

6. Выделены ЭЦМ, способствующие формированию экстремальных явлений в исследуемых регионах. Активные сейчас ЭЦМ 9а и 13л способствуют образованию гляциальных селей и паводков в рассматриваемых регионах. Набор лавиноопасных ЭЦМ для северо-востока Сибири и Полярного Урала неодинаков. Однако большая часть характерных ЭЦМ, ответственных за условия, благоприятные для образования лавин, в обоих регионах в последние десятилетия имеют суммарную продолжительность, превышающую средний уровень.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки ведущих научных школ НШ-9757.2006.5 и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 05-05-64354.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ананичева М.Д., Давидович Н.В., Кононов Ю.М., Корейша М.М. и др. Ледники северного массива Сунтар-Хаята: изменения со времени МГГ. — МГИ, вып. 95, 2003, с. 85–101.
2. Ананичева М.Д., Давидович Н.В., Мерсье Ж.Л. Изменения климата Северо-востока Сибири за последнее столетие и отступление ледников Сунтар-Хаята. — МГИ, вып. 94, 2003, с. 216–225.
3. Ананичева М.Д., Корейша М.М. Отступление ледников Северного и Южного массивов гор Сунтар-Хаята и хр. Черского. — МГИ, вып. 99, 2005, с. 18–25.
4. Богданова Э.Г. Способ расчета доли твердых, жидких и смешанных осадков в их месячной норме. — МГИ, вып. 26, 1976, с. 202–207.
5. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата. — Метеорология и гидрология, 2004, № 4, с. 50–66.
6. Дзердзеевский Б.Л. Сравнение главнейших закономерностей циркуляции атмосферы в южном и северном полушариях. — Информ. бюлл. САЭ, № 65, 1967, с. 58–68.
7. Дзердзеевский Б.Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере северного полушария в XX столетии. — Материалы метеорол. исследований, 1968, 240 с.
8. Дзердзеевский Б.Л. Общая циркуляция атмосферы и климат. Избранные труды. М., «Наука»,

- 1975, 288 с.
9. Календарь последовательной смены ЭЦМ за 87-летний период (с 1899 по 1985 гг.). — Материалы метеорол. исследований, № 13, 1987, с. 30–116.
  10. Кононова Н.К. Исследования многолетних колебаний циркуляции атмосферы Северного полушария и их применения в гляциологии. Приложение: Календарь последовательной смены ЭЦМ за 1986–2002 гг. — МГИ, вып. 95, 2003, с. 45–65.
  11. Кононова Н.К., Мальнева И.В. Влияние изменения характера атмосферной циркуляции на активность опасных природных процессов. — Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2003, № 4, с. 52–62.
  12. Кононова Н.К., Мокров Е.Г., Селиверстов Ю.Г., Тареева А.М. Связь схода лавин с циркуляцией атмосферы Северного полушария. — МГИ, вып. 99, 2005, с. 94–98.
  13. Кононова Н.К. Циркуляционные механизмы изменений климата внетропических широт северного полушария и в особенности России в XX–XXI столетиях. <http://igranKononova.narod.ru>
  14. Кононова Н.К. Колебания циркуляции атмосферы северного полушария в XX — начале XXI века. — [www.atmospheric-circulation.ru](http://www.atmospheric-circulation.ru)
  15. Савина С.С., Хмелевская Л.В. Динамика атмосферных процессов северного полушария в XX столетии. — Материалы метеорол. исследований, № 9, 1984, 146 с.
  16. Ходаков В.Г. Процессы перераспределения снега и снежного покрова в горах. — МГИ, вып. 9, 1964, с. 210–215.
  17. Dzerdzeevskii B. Fluctuation of climate and of general circulation of the atmosphere in extra-tropical latitudes of the Northern Hemisphere and some problems of dynamic climatology. — *Tellus*, v. 14, № 3, 1962, p. 328–336.
  18. Dzerdzeevskii B. Some aspects of dynamic climatology. — *Tellus*, v. 18, 1966, p. 751–760.
  19. Dzerdzeevskii B.L. Climatic epochs in the twentieth century and some comments on the analysis of past climates. — *Quaternary Geology and Climate*, Washington, 1969, p. 49–60.
  20. Kononov Yu.M., Ananicheva M.D. The millennium dynamics of Polar Ural glaciers by high resolution reconstruction of glacier mass balance. — *Annals of Glaciology*, v. , 2005, p.
  21. Storm R. Wahrscheinlichkeitsrechnung Mathematische Statistische Qualitätskontrolle.

- VEB Fachbuchverlag, 1967, 368 p.
22. <http://climatechange.su>
  23. [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)

## SUMMARY

This paper involves a classification of atmospheric circulation patterns, worked out by Boris Dzerdzeevsky in 1970's. This classification provides a set of Elementary Circulation Mechanisms (ECMs) differing in circulation character, availability/absence of Arctic air mass invasions and their position within the Northern Hemisphere, and number and geographic location of the southern cyclones outlets. All variety of macrocirculation processes are described by 41 ECMs.

The regions studied, NE Siberia and Polar Ural, which since the second half of 20th century are under different climatic conditions (the former is under warming, the temperatures of the latter do not show brightly-expressed trend), are characterized by the different sets of the ECMs. Their recurrence most tightly is related to summer temperature ( $T_{sum}$ ) and solid precipitation ( $X_{sol}$ ), obtained by calculation from the regions' weather-stations.

The most intensive warming and ablation of glaciers take place in summer season under the combination of positive anomaly of the Tsum with unclouded weather. For the NE Siberia it is possible either under continental (not Arctic) anticyclone condition, or in "small-gradient of low pressure" area. For the Polar Ural this combination is connected with the ECM, which has blocking process over this mountain region and westerly cyclones bringing cool weather here. In the cold half-year the ECM responsible for the southern air masses coming here determines the ablation on glaciers of the Polar Ural.

Accumulation occurs in cold half-year under precipitation fall in the fronts of westerly and southern cyclones and snow cover preservation due to negative temperatures, mainly while Arctic cyclones invade. In the NE Siberia glacier accumulation is mostly related to the ECM, responsible for Arctic invasion that provides negative air temperatures.

The paper has also resulted in allocation of the extreme-events-causing ECMs within two compared regions. Active now ECM 9a and 13s promote formation of glacial mudflows and glacial floods in both regions. The set of avalanche-hazardous ECMs for NE Siberia and Polar Ural is different, however the major part of characteristic ECMs, responsible for the conditions favorable for avalanche formation in both regions, have the total duration exceeded the mean level.