

УДК 551.583.16

АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ КЛИМАТА С СЕРЕДИНЫ XX в. НА ТЕРРИТОРИИ ГОРНОГО АЛТАЯ

И.В. Кужевская¹, О.Е. Нечепуренко¹, В.В. Чурсин¹, Х. Мацуяма²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² Токийский столичный университет, Токио, Япония



Исследование экстремальности в Горном Алтае актуально в связи с наличием опорных объектов по изучению почвенно-покровного обледенения, особенностей гидроэнергетики на малых реках и потенциала для селеобразования. Выбраны 24 индекса экстремальности ВМО. В исследуемом регионе происходит увеличение повторяемости в году теплых дней и ночей и снижение – холодных. Сумма сильных осадков в году составляет до 26% от годовой суммы осадков. Продолжительность периода с суммой осадков за каждые сутки не более 1 мм составляет до 14 сут, с максимальной повторяемостью в апреле.

Ключевые слова: индексы экстремальности, осадки, температура воздуха, изменчивость климатических параметров, тренд.

Развитие комплексных исследований в регионе Горного Алтая имеет ряд научных обоснований. К первому относится интерес гляциогидрометеорологического научного сообщества к изучению ледников в районе бассейна р. Актру, что обусловлено выгодным географическим положением и наличием длительного ряда непосредственных наблюдений по основным гляциогидроклиматическим параметрам [Нарожный, 2001]. По этой причине ледники Актру относят к опорным объектам Сибири по исследованию почвенно-покровного обледенения как индикатора изменения климата [Галахов и др., 1987]. В горноледниковом бассейне Актру была создана исследовательская площадка, которая включена в крупномасштабный международный сетевой инфраструктурный проект в рамках крупнейшей Программы Европейского союза «Горизонт–2020» «ИНТЕРАКТ-II: международная сеть для наземных исследований и мониторинга в Арктике» (<https://eu-interact.org/field-sites/aktru-research-station/>).

Все вышесказанное формирует базу для анализа тенденций динамики ледников в условиях глубоко континентальных районов (Алтай, Салаир, Кузнецкий Алатау) и оценки формирования циркуляционных особенностей регионов юго-востока Западной Сибири. Отметим, что изменения атмосферной циркуляции отражаются в режиме атмосферных осадков [Адаменко, Гутак, 2017] и оказывают отчетливое влияние на возникновение экстремальных погодных явлений [Ленская, Быков, 2008; Немировская, Климов, 2014; Шумихина, 2017]. В данном регионе, как правило, наибольшие экономические последствия связаны с наводнениями и паводками в результате сильных дождей, которые оказывают неблагоприятную нагрузку на малые ГЭС на реках Горного Ал-

тая. В частности, весной и в начале лета 2014 г. от паводка пострадала малая ГЭС «Кайру».

Другим проявлением экстремальности является аномально жаркая погода, что приводит к дефициту кормов в результате стихийных пожаров на пастбищах и всем вытекающим негативным последствиям для основной специализации агропромышленного комплекса (животноводства) Республики Алтай.

Экстремальные события также влияют и на сектор туризма, являющегося основным источником дохода для региона Горный Алтай. Замечено (https://www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Convention/EN/Protocol_Tourism_EN.pdf), что горные территории страдают от повышения температуры сильнее, чем другие регионы.

Таким образом, целью исследования является изучение проявлений тенденции увеличения повторяемости и интенсивности гидрометеорологических аномалий в Горном Алтае на фоне происходящих глобальных климатических изменений.

Индексы экстремальности климата

Для изучения постоянной перспективы наблюдаемых изменений климата и экстремальных погодных явлений, группа экспертов по обнаружению изменения климата и показателям ВМО (ETCCDI) определила основной набор описательных экстремальных индексов. Индексы описывают особые характеристики экстремальных значений, включая амплитуду, частоту и продолжительность [Halimatou et al., 2017]. Основной набор включает в себя 27 показателей экстремальности для осадков и температуры. Согласно МГЭИК, под экстремальными климатическими явлениями понимают «возникновение значе-

ния погодной или климатической переменной выше (или ниже) порогового значения вблизи верхних (или нижних) границ диапазона наблюдаемых значений переменной» [Обобщающий доклад..., 2007]. Экстремальные климатические явления могут относиться либо к экстремальным значениям отдельных атмосферных переменных, либо к погодным и климатическим явлениям, которые имеют отрицательное воздействие на природную среду [Seneviratne et al., 2012]. Настоящее исследование отнесено к первой категории, в котором рассмотрены отдельные атмосферные переменные, а именно температура и осадки. Заметим, что экстремальные явления погоды связаны с малыми вероятностями, но обладают большей изменчивостью [Кошкин, Кочугова, 2011]. Начиная с 2007 г. аналитические материалы с использованием этих индексов включаются в отчеты МГЭИК. Более глубокое понимание того, как следует учитывать изменяющийся климат при определении и оценке экстремальных явлений, представлено в Руководящих положениях по анализу экстремальных явлений в условиях изменяющегося климата [Guidelines on analysis of extremes..., 2009].

Следует обратить внимание, что индивидуальные показатели экстремальности часто не позволяют предсказать воздействие сразу нескольких факторов на природу и общество [Heim, 2015; Christidis, Stott, 2016]. В этом случае предлагается использовать составные показатели экстремальности, т.е. одновременное или последовательное возникновение многих экстремумов разного рода в одной или нескольких локациях [Hao et al., 2018]. Для этого применяются разные подходы к статистической обработке и моделированию составных показателей в гидроклиматологии, включая эмпирический подход, многомерные распределения, регрессионный анализ квантилей, модели цепей Маркова и др. [Волкова и др., 2012; Sedlmeier et al., 2017; Hao et al., 2018]. С этой точки зрения представляет интерес анализ паводков смешанного происхождения [Benestad et al., 2007; Wahl et al., 2015, 2016; Ikeuchi et al., 2017; Bevacqua et al., 2019], оценка и прогнозирование смешанных экстремальных событий [Biasutti et al., 2016; Leng et al., 2016], региональный подход к анализу экстремумов [Ren et al., 2018].

Материалы и методы исследования

Материалами для формирования баз данных и расчета индексов экстремальности послужили суточные данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам из архива ВНИИГМИ-МЦД (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>) на станциях Горного Алтая (рис. 1): Усть-Кокса (50,16° с.ш., 85,37° в.д.) и Кара-Тюрек (50,03° с.ш., 86,45° в.д.). Выбор станций

обусловлен пересекающейся зоной интереса изучения температурно-влажностного режима и параллельными исследованиями в области моделирования водного цикла на участке р. Катунь и ее притока р. Кучерла. Показатели экстремальности рассчитывались за период с 1950 по 2018 г. на основе авторского алгоритма на html-языке FoxPro 6.0. Проверка результатов расчетов проводилась с использованием пакета RClimindex 3.2.0 [Zhang, Yang, 2004].

Для исследования проявлений экстремальности были выбраны 15 показателей для температурного режима и девять – для осадков (табл. 1), предложенных объединенной рабочей группой ВМО по обнаружению изменения климата – STARDEX Diagnostic Extremes Indices (<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>). Выбранные индексы пригодны для изучения характеристики климата в средних широтах [Козлова, 2014].

Составленные базы данных с гидрометеорологической информацией и выбранные статистические принципы обработки данных и расчета климатических характеристик соответствуют руководящим документам [ВМО-№ 100, 2014; ВМО-№ 49, 2015].

Результаты и обсуждение

В целом тенденции региональных гидрометеорологических аномалий представлены в Оценочных докладах об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [Второй оценочный доклад Росгидромета, 2014], а также в докладе IPCC [Climate change, 2014].

Температура. Индексы экстремальности температурного режима выявили общую тенденцию к потеплению с устойчивым трендом к снижению повторяемости холодных дней и ночей в году (рис. 2, *a, b*). Наблюдаются согласованные изменения и для критериев TN90p и TX90p по территории: увеличение повторяемости теплых дней и ночей в году замечено в последнюю декаду (рис. 2, *c, d*).

В целом положительная тенденция в отношении суточной максимальной и минимальной температуры воздуха, обнаруженная в этом исследовании, отмечена на обеих станциях. Все индексы экстремальной температуры демонстрируют явные тенденции к ее росту в течение рассматриваемого периода (табл. 2).

Тенденции TXx, TNx, TXn и TNn показывают, что самые сильные теплые события увеличились, а самые сильные холодные – уменьшились. Экстремальные изменения температуры в ночное время проявляются больше, чем в дневное. Подобное заключение сделано и для Алтайских гор в Синьцзян-Уйгурском автономном округе (КНР) [Zhou et al., 2016].

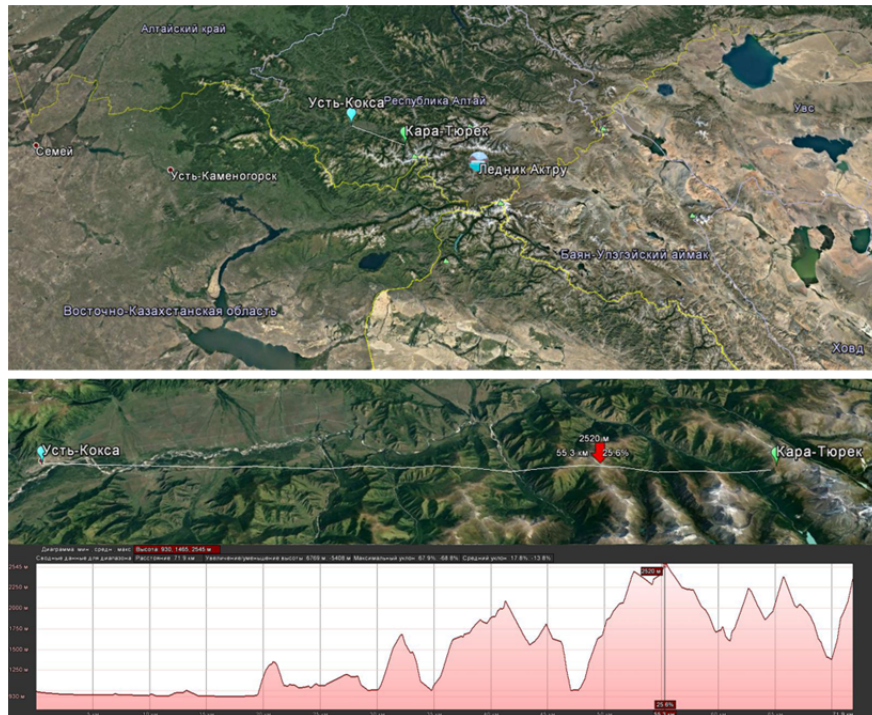


Рис. 1. Расположение станций Усть-Кокса и Кара-Тюрек с гистограммой высот над у.м.

Fig. 1. The location of Ust'-Koksa and Kara-Turek weather stations asl

Таблица 1

Индексы экстремальности для режима температуры и осадков

Table 1

Temperature and precipitation extreme indices

Индекс	Описание	Единица измерения
TN10p	Повторяемость холодных ночей в году	% дней
TX10p	Повторяемость холодных дней в году	% дней
TX90p	Повторяемость теплых дней в году	% дней
TN90p	Повторяемость теплых ночей в году	% дней
TNn	Годовой минимум температуры воздуха	°C
TXn	Минимальное значение зимнего максимума температуры воздуха	°C
TNx	Максимальное значение летнего минимума температуры воздуха	°C
TXx	Годовой максимум температуры воздуха	°C
GSL	Длина вегетационного периода	дни
ID	Суммарное число дней со льдом	дни
SU	Суммарное число жарких дней	дни
FD	Суммарное число дней с морозом	дни
R1d	Максимальная сумма осадков за сутки	мм
R5d	Максимальная пентадная сумма осадков	мм
SDII	Суточный индекс интенсивности осадков	мм/сут
R10mm	Число суток с осадками ≥ 10 мм/сут	дни
R20mm	Число суток с осадками ≥ 20 мм/сут	дни
CDD	Максимальная продолжительность сухих периодов	дни
CWD	Максимальная продолжительность влажных периодов	дни
R95p	Сумма сильных осадков	мм
PRCPTOT	Количество осадков	мм

Продолжительность вегетационного периода (GSL) меняется незначительно. Для расположенной в Уймонской степи станции Усть-Кокса продолжительность вегетационного периода в среднем равна 170 дням (табл. 3). В этом регионе существует достаточно длинный безморозный период в течение зимы, в среднем 134 дня в году. В отношении индексов FD, SU и ID, важных для сельского хозяйства и растениеводства, значимых изменений не выявлено. Среднее

число дней с льдом для ст. Усть-Кокса не превышает 129. В среднем в горах Алтая наблюдается до 40 жарких дней в году. Характер направленности изменения тренда исследуемых индексов согласуется с результатами в работе [Zhou et al., 2016].

Таким образом, в рассматриваемом регионе складываются благоприятные агротехнические условия, а также для развития природно-рекреационного потенциала территории.

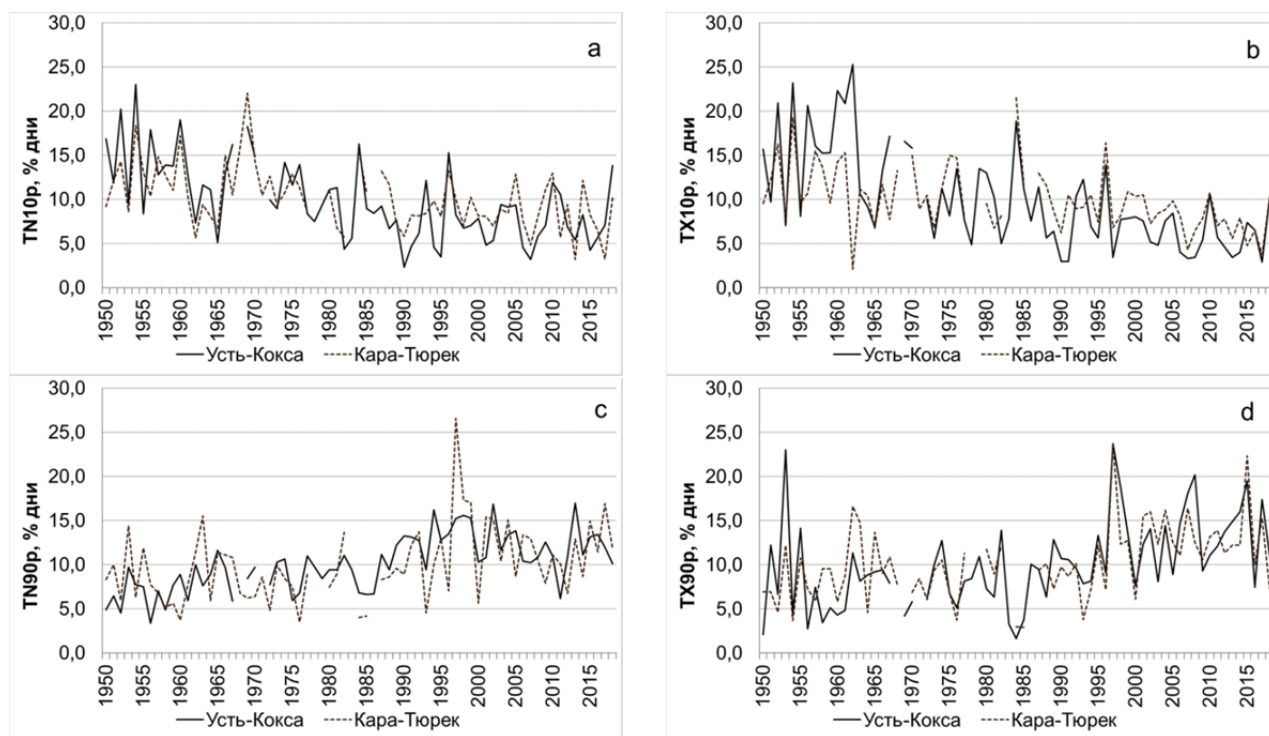


Рис. 2. Повторяемость холодных дней в году TX10p (a), холодных ночей в году TN10p (b), теплых ночей в году TN90p (c) и теплых дней в году TX90p (d)

Fig. 2. The repeatability of cold days in the year TX10p (a), cold nights in the year TN10p (b), warm nights in the year TN90p (c) and warm days in the year TX90p (d)

Таблица 2

Значения тренда температурных индексов (°C/10 лет)

Table 2

Trends of temperature indices over the Altay (°C per 10 years)

Станция	Усть-Кокса		Кара-Тюрек	
	Тренд	Р-уровень	Тренд	Р-уровень
TN10p	-0,13	0,00	-0,08	0,00
TX10p	-0,18	0,00	-0,08	0,00
TX90p	0,12	0,00	0,09	0,00
TN90p	0,10	0,00	0,01	0,00
TNn	0,78	0,00	0,38	0,04
TXn	1,01	0,00	0,02	0,21
TNx	0,15	0,06	0,17	0,13
TXx	0,25	0,04	0,09	0,50

Таблица 3

Статистические характеристики индексов GSL, FD, SU и ID

Table 3

Statistical characteristics of GSL, FD, SU and ID

Станция	Характеристика	Индекс			
		GSL	FD	SU	ID
Усть-Кокса	Среднее, дни	169	214	37	129
	СКО, дни	14	8	15	11
	Тренд, %	0,35	–0,20	0,27	–0,19
	P-уровень	0,02	0,00	0,00	0,01
Кара-Тюрек	Среднее, дни	76	271	–	199
	СКО, дни	27	11	–	13
	Тренд, %	0,26	–0,19	–	–0,2
	P-уровень	0,24	0,01	–	0,01

Осадки. Атмосферные осадки характеризуются высокой степенью кластеризации в пространстве и во времени и не формируют классического скалярного поля [Золина, Булыгина, 2016] как другие характеристики атмосферы (температура, давление). Проявлением этой кластеризации являются пространственная неоднородность выпадения ливневых осадков вообще и экстремальных осадков с интенсивностями в десятки раз превосходящими уровень средних значений в частности.

Для исследуемого региона ранее было получено [Волкова, Огурцов, 2015; Огурцов и др., 2016] некоторое увеличение числа дней с осадками более 5 мм при отрицательной среднесуточной температуре воздуха на большей части территории Западной Сибири. По данным авторов [Огурцов и др., 2016] Южная часть Западной Сибири характеризуется ростом на 1–2 дня числа дней с осадками различной интенсивности, а изменения в динамике индексов экстремальности осадков в среднем от периода к периоду в большинстве случаев незначимы, что может быть связано отчасти с редкой наблюдательной сетью.

На рис. 3 представлен годовой ход числа случаев максимальной пентадной суммы осадков по десятилетиям. Наиболее часто условия, которые обуславливают выпадение сильных осадков за последовательные пять суток, формируются в июле. Если анализировать перераспределение этой повторяемости по десятилетиям, то можно отметить относительную стабильность в годовом ходе проявления условий формирования пентад сильных осадков. В целом временной ход индекса $r5d$ имеет вид колебаний около среднего без выраженной тенденции. Нужно отметить, что в 70–75 % случаев при формировании максимального в году количества осадков, выпавших за последовательные пять суток, участвуют

значения максимального количества осадков в году, выпавших за сутки, временной ряд которых также не имеет четко выраженной тенденции.

Анализ сильных осадков продолжают индексы, выражающие количество дней в году с суточной суммой осадков не менее 10 мм – $R10mm$ и 20 мм – $R20mm$. Временной ход этих индексов осадков не имеет тенденции. Отношение годовой суммы осадков к числу дней с осадками, суммы которых за сутки превысили ≥ 1 мм в году, выражает интенсивность осадков (индекс $SDII$). Значения интенсивности осадков более 5 мм/сут характерны для станций Усть-Кокса и Кара-Тюрек. Временной ход интенсивности осадков также не имеет тенденции, различаясь по территории средними значениями (табл. 4).

Рассчитанные значения индексов $r5d$, $r1d$, $SDII$, $R10mm$, $R20mm$ и $R95p$ одновременно обеих станций были выбраны как признаковое пространство для кластеризации по методике итерационных алгоритмов *k-mean*. Действие алгоритма таково, что он стремится минимизировать среднеквадратичное отклонение внутри каждого кластера, что дает наибольшую математическую плотность – общность временных изменений. Алгоритм построен на принципе разбиения множества элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров k . На начальном этапе принимали в качестве центров самые отдаленные друг от друга объекты (в этом исследовании – годы). На каждой итерации заново вычисляется математический центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Алгоритм завершается в случае, если на очередной итерации не происходит изменения в составе кластеров.

Месяц	Годы						
	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2018
Кара-Тюрек							
январь							
февраль							
март							
апрель			1	1	1		
май		1		1	2		
июнь	3	1	3	3	2	2	2
июль	5	4	1	2	2	5	2
август	2	3	2	3	2	2	3
сентябрь		1			1	1	1
октябрь			1				
ноябрь							1
декабрь							
Усть-Кокса							
январь							
февраль							
март		1					
апрель							
май			4	3	1	2	3
июнь	3		2	2	3	3	1
июль	5	4	1	2	3	1	
август	1	4	1	2	2	4	2
сентябрь			2	1	1		2
октябрь		1	1				1
ноябрь	1						
декабрь							

Рис. 3. Число случаев событий r5d по десятилетиям

Fig. 3. Events of r5d index over decades

Таблица 4

Значения тренда индексов экстремальности для осадков, мм/10 лет

Table 4

Trends of precipitation indices over the Altay, mm per 10 years

Станция	Усть-Кокса		Кара-Тюрек	
	Среднее	СКО	Среднее	СКО
r5d	50,1	13,0	52,7	15,6
r1d	28,9	9,3	27,2	8,0
SDII	5,75	0,68	5,22	0,60
R10mm	12,3	4,3	12,6	5,0
R20mm	2,5	1,8	2,1	1,9
CDD	6	2	7	2
CWD	18	5	13	6
R95p	122,4	59,5	148,7	74,3
PRCPTOT	463,6	93,5	557,5	138,5

На рис. 4 представлены средние значения признаков пространств классов для каждой станции. Класс с наибольшей плотностью объектов имеет номер 3 и содержит годы со значениями всех признаков, близких к средним многолетним. Значения признаков, сгруппированные в классе 4, характеризуются наибольшими отклонениями от среднего и представляют класс «аномалий», во временном ряду

проявляясь периодически. В класс с номером 2 попали все значения, охарактеризовать которые можно как «ниже среднего». Нужно заметить, что во временном ряду их наибольшая повторяемость отмечается до 1980 г. В класс с номером 1 сгруппировались годы со значениями признаков пространства «выше среднего», такие значения отмечаются во временном ряду лишь с 1979 г.

С 1996 г. возрастает межгодовая изменчивость значений в признаковом поле, изменяя свое положение от «ниже среднего» до «выше среднего» и «аномалия», минуя положение среднего, замеченное во временных отрезках 1995–2000 и 2006–2013 гг.

Временной ход годовой суммы атмосферных осадков (PRCPTOT) представлен на рис. 5. Нужно отметить, что вклад сильных осадков (r95p) в PRCPTOT в отдельные годы может превышать 50 %; до 10% составляет вклад осадков, выпавших за последовательные 5 сут (r5d). Вклад максимального в году количества осадков, выпавших за последовательные пять суток, для всей территории составляет около 10% и осадки, выпавшие за 1 сут, в среднем, не превышают 6%. Полное совпадение абсолютных максимальных значений индексов r95p и PRCPTOT отмечено для станции Кара-Тюрек зарегистрировано в 1999 г. В целом степень взаимосвязи участия сильных осадков в формировании годовой суммы осад-

ков высока – коэффициент корреляции Пирсона превышает 0,7 для всех станций.

Одним важным показателем экстремальности режима осадков являются периоды с осадками и без осадков, определяемыми индексами CWD и CDD соответственно. Для анализа были рассчитаны индексы за период с апреля по октябрь (рис. 6, 7). Временной ход максимального числа последовательных сухих или влажных дней в году не имеет никаких тенденций, характеризуется устойчивостью средних значений. Наиболее продолжительные влажные периоды вероятны для высокогорной южной станции Кара-Тюрек. Среднее значение и вариабельность максимального числа последовательных сухих дней в году уменьшаются. Для Горного Алтая распределение повторяемости влажных дней имеет максимум в апреле–мае и минимум в октябре. Максимальная повторяемость сухих дней в теплый период приходится на апрель для всех станций, повторно увеличиваясь в сентябре.

	Усть-Кокса	Кара-Тюрек	Усть-Кокса	Кара-Тюрек	Усть-Кокса	Кара-Тюрек	Усть-Кокса	Кара-Тюрек
sdii	6.5	5.1	5.7	5.2	5.3	4.7	5.9	6.2
r10mm	17.0	12.3	11.3	13.1	9.4	8.3	13.1	20.1
r20mm	4.6	1.5	1.9	2.2	1.8	0.8	2.0	4.9
r1d	35.7	26.1	28.0	28.8	25.1	21.2	27.5	32.6
r5d	64.4	46.5	47.1	52.1	44.7	44.5	50.7	73.5
r95p	208.9	117.6	93.1	157.5	92.7	76.4	129.5	277.3

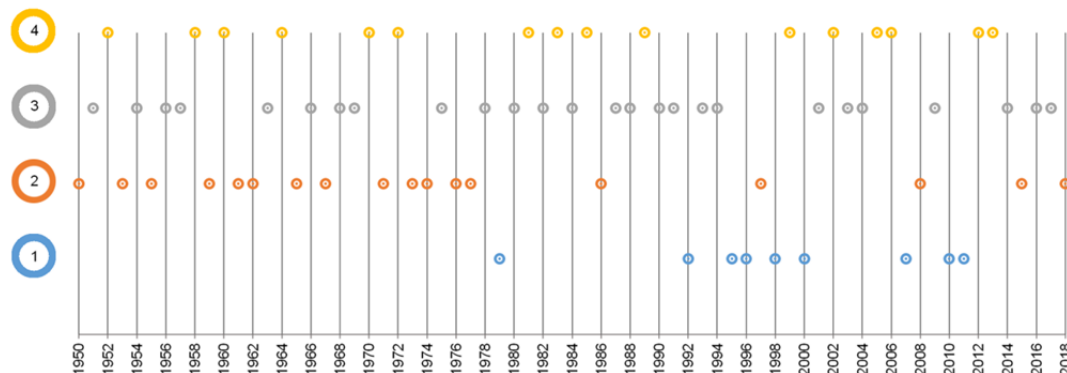


Рис. 4. Среднее значение признакового поля для каждого класса

Fig. 4. The average value of the feature space for each group

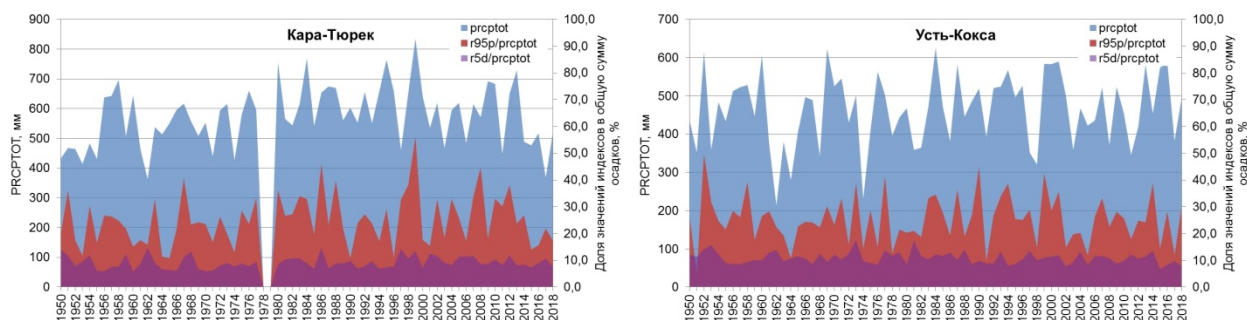


Рис. 5. Вклад значений сильных осадков (r95d) и пентадных осадков (r5d) в годовую сумму осадков (PRCPTOT)

Fig. 5. Share of r95d (very wet day) and r5d (maximum five-day precipitation total) to total wet-day precipitation (PRCPTOT)

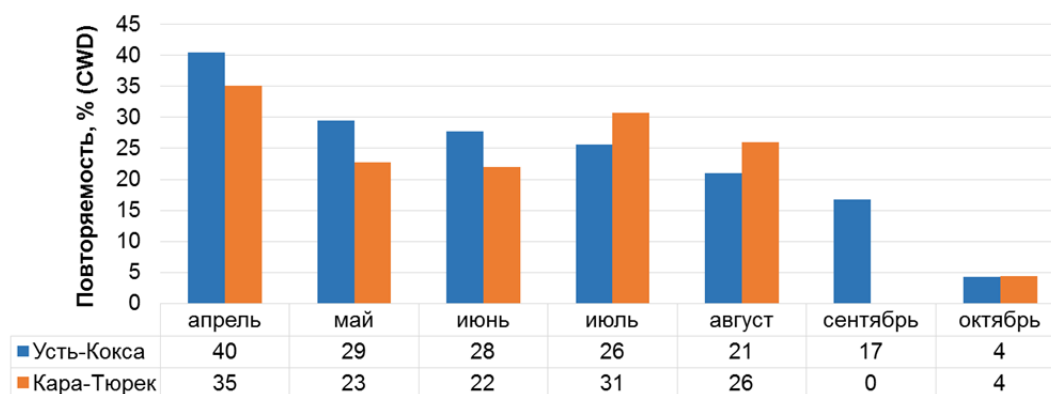


Рис. 6. Повторяемость последовательных влажных дней в теплом периоде

Fig. 6. A repeatability of maximum length of a wet spell (CWD) or maximum number of consecutive days with at least 1 mm of precipitation for April-October

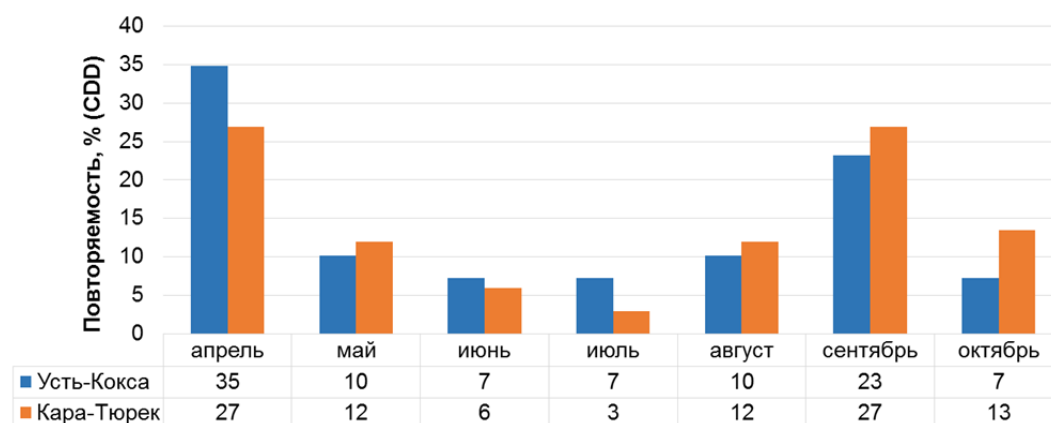


Рис. 7. Повторяемость последовательных сухих дней в теплом периоде

Fig. 7. A repeatability of maximum length of a dry spell (CDD) or maximum number of consecutive days with less than 1 mm of precipitation for April-October

Резюмируя, заметим, что наиболее вероятными влажными месяцами для формирования длительного влажного периода с осадками более 1 мм в сутки являются апрель и июль. На апрель и сентябрь приходится большая вероятность как сухих месяцев, в течение которых установится продолжительный период с отсутствием осадков (менее 1 мм в сутки). Следовательно, в апреле отмечается наиболее нестабильная ситуация в режиме атмосферных осадков.

Закключение

В исследуемом регионе происходит увеличение повторяемости теплых дней и ночей и снижение повторяемости холодных дней и ночей в году соответственно. Замечена положительная тенденция суточной максимальной и минимальной температуры воздуха. Индексы экстремальной температуры (TX_x, TN_x, TX_n и TN_n) демонстрируют явные тенденции к росту значений экстремальной температуры в течение

рассматриваемого периода. Самые сильные теплые события увеличились, а самые сильные холодные события уменьшились. Экстремальные изменения температуры в ночное время отмечаются больше, чем днем.

Наибольшая повторяемость максимального годового количества осадков, выпавших за последовательные пять суток, приходится на июль. В 70–75 % случаев в эти последовательные пять суток отмечается день, за который выпадает максимальная суточная сумма осадков в году, в остальных случаях эти события разнесены во времени. Сумма сильных осадков в году составляет значительную долю от годовой суммы осадков, которая на юге составляет до 26 %. Продолжительность периода последовательных влажных суток (сумма осадков за каждые сутки не менее 1 мм) с апреля по октябрь невелика и составляет около 6 сут. Повторяемость такого события имеет максимум в августе–сентябре и в июне–июле соответственно. Продолжительность периода

последовательных сухих суток (сумма осадков за каждые сутки не более 1 мм) может длиться до 14 сут, с максимальной повторяемостью в апреле. В пределах исследуемого региона наблюдается одинаковая предрасположенность к формированию в начале теплого периода как влажных, так и засушливых условий. Подобная нестабильность способствует проявлению экстремальности погодных явлений.

Заметим, что изменения годовых максимумов и минимумов температуры (ТХх и ТНп), накопленных за пять дней осадков (r5d), и количества последовательных сухих дней (CDD) в экстремальных осадках говорят о сдвиге в сторону потепления холодных и горячих экстремальных температур с широко распространенными изменениями экстремальных осадков [Fischer et al., 2013].

В настоящем исследовании рассмотрены только крайние значения в годовом масштабе времени, что ограничивает интерпретацию некоторых из показате-

телей для прогнозируемых изменений [Sillmann et al., 2013]. Более подробный анализ может оценить крайности в сезонном ходе, хотя это требует доступа и обработки суточных данных CMIP5. В выходе модели CMIP5 RCP8.5 происходит фаза переходного потепления климата при поверхностной температуре 1,5 и 2,0 °C, и эти результаты отличны от тех прогнозных сценариев, где было достигнуто состояние равновесия [Sanderson et al., 2017]. Сравнение результатов, полученных из различных состояний равновесия, поможет установить достоверность результатов, полученных в этом исследовании. Использование моделей воздействия на климат, которые объединяют прогнозы климата, населения, экономики и социально-экономического положения, будут качественными с точки зрения применимости к лучшим политическим рекомендациям [Schiermeier, 2012].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФЦП RFMEFI61419X0002.

ЛИТЕРАТУРА

- Адаменко М.М., Гутак Я.М. Новый подход к дифференциации малых ледников и многолетних снежников на основе длительности непрерывного существования гляциально-нивального объекта (на примере гор Кузнецкого Алатау) // Геосферные исследования. 2017. № 3. С. 33–40.
- Волкова М.А., Огурцов Л.А. Пространственно-временная структура экстремальных годовых значений температуры воздуха и атмосферных осадков на севере Западной Сибири // Арктика. XXI век. 2015. № 1 (2). С. 56–61.
- Волкова М.А., Чередыко Н.Н., Кусков А.И. Температурные риски и оценка вероятности их возникновения на территории Алтайского края и республики Алтай // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 355. С. 148–153.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 1004.
- Галахов В.П., Нарожнев Ю.К., Никитин С.А. и др. Ледники Актру (Алтай). Л.: Гидрометеиздат, 1987. 119 с.
- Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84–103.
- Козлова Д.С. Экстремальные климатические явления в температурном режиме и режиме осадков на территории г. Барнаула // Педагогическое образование на Алтае. 2014. № 2. С. 6–8.
- Кошкин Д.А., Кочугова Е.А. Индикация изменения климата в терминах индексов экстремальности температуры воздуха и их связь с изменениями атмосферной циркуляции на территории Предбайкалья // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2011. № 17. С. 271–278.
- Ленская О.Ю., Быков Д.В. Анализ изменчивости месячных сумм осадков с использованием индексов атмосферной циркуляции // Вестник Челябинского государственного университета. 2008. № 17. С. 53–62.
- Обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / под ред. Р.К. Пачури, А. Райзингер. Женева: МГЭИК, 2007. С. 104.
- Нарожный Ю.К. Внешний массообмен ледников Актру: методика наблюдений, тенденции изменения и климатическая обусловленность // Вестник Томского государственного университета. 2001. № 274. С. 13–21.
- Немировская Л.Г., Климов О.В. Некоторые результаты исследований изменчивости и экстремальности регионального климата (на примере изучения определенных характеристик увлажнения) для юго-востока Западной Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 4, № 2. С. 112–116.
- Огурцов Л.А., Чередыко Н.Н., Волкова М.А., Журавлев Г.Г. Динамика показателей экстремальности климата на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 8. С. 633–639.
- ВМО-№ 100. Руководство по климатологической практике. Женева, 2014. 158 с.
- ВМО-№ 49. Технический регламент. Сборник основных документов № 2. Т. I: Общие метеорологические стандарты и рекомендуемая практика. Женева, 2015. 71 с.
- Шумихина А.В. Динамика режима осадков в Удмуртской Республике и их связь с индексами атмосферной циркуляции // Географический вестник=Geographical bulletin. 2017. № 1 (40). С. 73–85.
- Benestad R.E., Haugen J.E. On complex extremes: Flood hazards and combined high spring-time precipitation and temperature in Norway // Clim. Chang. 2007. V. 85. P. 381–406.
- Bevacqua E., Maraun D., Voudoukas M. I., Voukouvalas E., Vrac M., Mentaschi L., Widmann M. Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change // Science Advances. 2019. V. 5, № 9. P. 1–7.
- Biasutti M., Seager R., Kirschbaum D.B. Landslides in West Coast metropolitan areas: the role of extreme weather events // Weather and Climate Extremes. 2016. V. 14. P. 67–79.

- Zhou B., Xu Y., Wu J., Dong S., Shi Y.** Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: analysis of a high-resolution grid dataset // *Int. J. Climatol.* 2016. V. 36. P. 1051–1066.
- Christidis N., Stott P.A.** Attribution analyses of temperature extremes using a set of 16 indices // *Weather and Climate Extremes*. 2016. V. 14. P. 24–35.
- Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects.** Cambridge ; New York : Cambridge University press, 2014. P. 1322.
- Fischer E.M., Beyerle U., Knutti R.** Robust spatially aggregated projections of climate extremes // *Nature Climate Change*. 2013. V. 3, № 12. P. 1033–1038.
- Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation** // Geneva. 2009. WCDMP-№ 72, WMO/TD-№ 1500.
- Halimatou T., Traore K., Kyei-Baffour N.** Assessment of changing trends of daily precipitation and temperature extremes in Bamako and Ségou in Mali from 1961–2014 // *Weather and Climate Extremes*. 2017. V. 18. P. 8–16.
- Hao Z., Singh V.P., Hao F.** Compound extremes in hydroclimatology: a review. *Water*, 2018. 718 p.
- Heim R.R.** An overview of weather and climate extremes – products and trends // *Weather Clim. Extrem.* 2015. V. 10. P. 1–9.
- Ikeuchi H., Hirabayashi Yu., Yamazaki D., Muis S., Ward P.J., Winsemius H.C., Verlaan M., Kanae S.** Compound simulation of fluvial floods and storm surges in a global coupled river-coast flood model: model development and its application to 2007 Cyclone Sidr in Bangladesh // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2017. V. 9. P. 1847–1862.
- Leng G., Tang A., Huang S., Zhanga X., Cao J.** Assessments of joint hydrological extreme risks in a warming climate in China // *Int. J. Climatol.* 2016. V. 36. P. 1632–1642.
- Ren F. M., Trewin B., Brunet M., Dushmanta P., Walter A., Baddour O., Korber M.A.** Research progress review on regional extreme events // *Advances in Climate Change Research*. 2018. V. 9, № 3. P. 161–169.
- Sanderson B. M., Xu Y., Tebaldi C., Wehner M., Neill B., Jahn A., Pendergrass A.G., Lehner F. et al.** Community Climate Simulations to assess avoided impacts in 1.5°C and 2°C futures // *Earth System Dynamics Discussions*. 2017. V. 8. P. 827–847.
- Schiermeier Q.** Models hone picture of climate impacts // *Nature*. 2012. V. 482, № 7385. P. 286.
- Sedlmeier K., Feldmann H., Schädler G.** Compound summer temperature and precipitation extremes over central Europe // *Theoretical and Applied Climatology*. 2017. V. 131. P. 1–9.
- Seneviratne S. I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C. M., Kanae S., Kossin J., Luo Y., Marengo J. et al.** Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2012. P. 109–230.
- Sillmann J., Kharin V. V., Zhang X., Zwiers F.W., Bronaugh D.** Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2013. V. 118, № 4. P. 1716–1733.
- Wahl T., Jain S., Bender J. et al.** Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities // *Nature Clim. Change*. 2015. V. 5. P. 1093–1097.
- Wahl T., Plant N.G., Long J.W.** Probabilistic assessment of erosion and flooding risk in the northern Gulf of Mexico // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2016. V. 121. P. 3029–3043.
- Zhang X., Yang F.** RCLimDex (1.0) user manual, Climate Research Branch, Environment Canada. 2004. 23 p.

Авторы:

Кузевская Ирина Валерьевна, кандидат географических наук, доцент, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: ivk@ggf.tsu.ru

Нечепуренко Ольга Евгеньевна, инженер, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: o.e.nechepurenko@gmail.com

Чурсин Владислав Вячеславович, аспирант, кафедра метеорологии и климатологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: skriptym@mail.ru

Хироши Мацуяма, профессор, департамент географии, факультет наук об окружающей среде Столичного университета Токио, Токио, Япония.

E-mail: matuyama@tmu.ac.jp

Geosphere Research, 2020, 3, 97–108. DOI: 10.17223/25421379/16/8

I.V. Kuzhevskaya¹, O.E. Nechipurenko¹, V.V. Chursin¹, H. Matsuyama²

¹*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

²*Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan*

ANALYSIS OF CLIMATIC EXTREMITY SINCE THE 1950s IN THE MOUNTAIN ALTAI TERRITORY

The research of climatic extremeness in the Altai Mountains is relevant in connection with the presence of supporting objects for the study of soil-cover icing, the features of small water-power engineering and the existence of potential mudflow-prone areas.

The study area is bounded 49–50 °N, 84–87 °E, where reference weather stations WMO 36442 Kara-Turek and WMO 36229 Ust'-Koksa are located. We selected 24 extreme indices developed by the Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices (ETCCDMI) under the WMO: 15 for temperatures – TN10p, TX10p, TX90p, TN90p, TNn, TXn, TNx, TXx, GSL, ID, SU, FD, and 9 for precipitations – R1d, r5d, SDII, R10mm, R20mm, CDD, CWD, R95p, and PRCPTOT. Extremeness indicators were computed for 1950–2018 based on the author's algorithm. Verification of the calculation results was carried out using the RCLimDex 3.2.0 package

Indices related to air temperature show strong tendency to change. There has been an increase in the frequency of warm days and nights and a decrease in cool days and nights. Extreme changes in temperature are mostly stronger at night than during the day. On the other hand, for a group of indices valuable for agriculture and crop production, no significant changes have been received. Also, an annual count of days when daily precipitation is more than 10 mm and 20 mm (R10mm, R20mm), and simple daily intensity index (SDII) have no trend.

Regarding the maximum 5-day precipitation total (r5d), the highest repeatability relates to July. In 70–75 % of cases, during the 5 consecutive days, there is a day on which the highest daily precipitation falls in a year; in other cases, these events are separated in time. The amount of heavy rainfall in a year is up to 26 % of the annual rainfall. Consecutive wet days index (period where the daily precipitation amount is more than 1 mm for at least consecutive 5 days) is small from April to October and about 6 days. The repeatability of such index has maximum in June–July and August–September. The length of the period with a total precipitation of not more than 1 mm per day is up to 14 days, with a maximum frequency in April. Within the area under study, at the beginning of the warm period the same predisposition to the formation of both wet and dry conditions has been noted. Such instability favors the display of extreme weather events.

The computed values of r5d, r1d, SDII, R10mm, R20mm and R95p indices for both stations were determined as a feature space for clustering according to k-means iterative algorithm. As the objects, the years have been chosen. The division are separated into four groups, then stability was assessed through the Q factor “minimum variance in the group”, pointed to “below average”, “normal”, “above average” and “anomaly”. Since 1996, the inter-annual variability of values in the feature field has been increasing, changing its position from “below average” to “above average” and “anomaly”, and bypassing the “normal” seen in 1995–2000 and 2006–2013.

The substantial extreme indicators in the precipitation regime are the periods with/without precipitation, defined by CWD and CDD (wet and dry spell) indices, respectively. The most probable wet months for the formation of a durable wet period with precipitation of more than 1 mm per day are April and July. In April and September there is a high probability of both dry and wet months. Consequently, the most unstable situation in the precipitation regime is related to in April.

Keywords: extreme indices, precipitation, air temperature, climate variability, tendency.

References

- Adamenko M.M., Gutak Ya.M. *Novyy podkhod k differentsiatsii malykh lednikov i mnogoletnikh snezhnikov na osnove dlitel'nosti nepreryvnogo sushchestvovaniya glyatsial'no-nival'nogo ob'ekta (na primere gor Kuznetskogo Alatau)* [A new approach to separation small glaciers from perennial snowfields which is based on the data about duration of the continuous existence of glacial and firn objects (on the example of the Kuznetsky Alatau mountains)] // *Geosphere Research*. 2017. V. 3. pp. 33–40. In Russian
- Volkova M.A., Ogurtsov L.A. *Prostranstvenno-vremennaya struktura ekstremal'nykh godovykh znacheniy temperatury vozdukh i atmosferykh osadkov na severe Zapadnoy Sibiri* [Spatio-temporal structure of extreme annual values of air temperature and precipitation in the northern part of Western Siberia] // *Arctic XXI Century*. 2015. № 1 (2). pp. 56–61. In Russian
- Volkova M.A., Cheredko N.N., Kuskov A.I. *Temperaturnye riski i otsenka veroyatnosti ikh vozniknoveniya na territorii Altayskogo kraia i respubliki Altay* [Temperature risk and estimated probability of its occurrence in the Altai region and the Republic of Altai] // *Tomsk State University Journal*. 2012. № 355. pp. 148–153. In Russian
- Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. Moscow: Roshydromet. 2014. 56 p.
- Galakhov V.P., Narozhnev Yu.K., Nikitin S.A. et al. *Ledniki Aktru (Altai): monografiya*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 119 p. In Russian
- Zolina O.G., Bulygina O.N. *Sovremennaya klimaticheskaya izmenchivost' kharakteristik ekstremal'nykh osadkov v Rossii* [Current climatic variability of extreme precipitation in Russia] // *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. 2016. V. 1. pp. 84–103. In Russian
- Kozlova D.S. *Ekstremal'nye klimaticheskie yavleniya v temperaturnom rezhime i rezhime osadkov na territorii g. Barnaula* // *Pedagogicheskoe obrazovanie na Altae*. 2014. № 2. pp. 6–8. In Russian
- Koshkin D.A., Kochugova E.A. *Indikatsiya izmeneniya klimata v terminah indeksov ekstremal'nosti temperatury vozduha i ikh svyaz' s izmeneniyami atmosferykh tsirkulyatsiy na territorii Predbaikal'ya* // *Uchenye zapiski. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. № 17. pp. 271–278. In Russian
- Lenskaya O.Yu., Bykov D.V. *Analiz izmenchivosti mesyachnykh sum osadkov s ispolzovaniem indeksov atmosferykh tsirkulyatsiy* [Analysis of variability of monthly precipitation using atmospheric circulation indices] // *Bulletin of Chelyabinsk State Pedagogical University*. 2007. № 6. pp. 66–79. In Russian
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- Narozhny Yu.K. *Vneshnij massoobmen lednikov Aktru: metodika nablyudenij, tendentsii izmeneniya i klimaticheskaya obuslovlennost'* // *Tomsk State University Journal*. 2001. № 274. pp. 13–21. In Russian
- Nemirovskaya L.G., Klimov O.V. *Nekotorye rezul'taty issledovaniy izmenchivosti i ekstremal'nosti regional'nogo klimata (na primere izucheniya opredelennykh kharakteristik vlazhnosti) dlya yugo-vostoka Zapadnoy Sibiri* [Some results on regional climate variability and extremality (the case of certain moisture characteristics) for southeastern West Siberia] // *Interekspo Geo-Sibir'*. 2014. V. 4, № 2. pp. 112–116. In Russian
- Ogurtsov L.A., Cheredko N.N., Volkova M.A., Zhuravlev G.G. *Dinamika pokazateley ekstremal'nosti klimata na territorii Zapadnoy Sibiri* [Dynamics of climate extremes in Western Siberia] // *Atmospheric and oceanic optics*. 2016. V. 29, № 8. pp. 633–639. In Russian
- Guide to Climatological Practice (WMO-100). 2014. 154 p.
- Technical Regulations of WMO № 49, Volume I – General meteorological standards and recommended Practices (Secretariat of WMO, Geneva). 2019. 77 p.
- Shumihina A.V. *Dinamika rezhima osadkov v Udmurtskoy Respublike i ikh svyaz' s indeksami atmosferykh tsirkulyatsiy* [Precipitation pattern dynamics in the Udmurt Republic and its connection with atmospheric circulation index] // *Geographical bulletin*. 2017. № 1 (40). pp. 73–85. In Russian

- Benestad R.E., Haugen J.E. On complex extremes: Flood hazards and combined high spring–time precipitation and temperature in Norway // *Clim. Chang.* 2007. V. 85. pp. 381–406.
- Bevacqua E., Maraun D., Voudoukas M. I., Voukouvalas E., Vrac M., Mentaschi L., Widmann M. Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change // *Science Advances*. 2019. V. 5, № 9. pp. 1–7.
- Biasutti M., Seager R., Kirschbaum D.B. Landslides in West Coast metropolitan areas: the role of extreme weather events // *Weather and Climate Extremes*. 2016. V. 14. pp. 67–79.
- Zhou B., Xu Y., Wu J., Dong S., Shi Y. Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: analysis of a high-resolution grid dataset // *Int. J. Climatol.* 2016. V. 36. pp. 1051–1066.
- Christidis N., Stott P.A. Attribution analyses of temperature extremes using a set of 16 indices // *Weather and Climate Extremes*. 2016. V. 14. pp. 24–35.
- Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects // Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University press. 2014. p. 1322.
- Fischer E.M., Beyerle U., Knutti R. Robust spatially aggregated projections of climate extremes // *Nature Climate Change*. 2013. V. 3, № 12. pp. 1033–1038.
- Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation // Geneva. 2009. WCDMP-№ 72, WMO/TD-№ 1500.
- Halimatou T., Traore K., Kyei-Baffour N. Assessment of changing trends of daily precipitation and temperature extremes in Bamako and Ségou in Mali from 1961–2014 // *Weather and Climate Extremes*. 2017. V. 18. pp. 8–16.
- Hao Z., Singh V.P., Hao F. Compound extremes in hydroclimatology: a review. *Water*. 2018. 718 p.
- Heim R.R. An overview of weather and climate extremes – products and trends // *Weather Clim. Extrem.* 2015. V. 10. pp. 1–9.
- Ikeuchi H., Hirabayashi Yu., Yamazaki D., Muis S., Ward P.J., Winsemius H.C., Verlaan M., Kanae S. Compound simulation of fluvial floods and storm surges in a global coupled river-coast flood model: model development and its application to 2007 Cyclone Sidr in Bangladesh // *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2017. V. 9. pp. 1847–1862.
- Leng G., Tang A., Huang S., Zhanga X., Cao J. Assessments of joint hydrological extreme risks in a warming climate in China // *Int. J. Climatol.* 2016. V. 36. pp. 1632–1642.
- Ren F. M., Trewin B., Brunet M., Dushmanta P., Walter A., Baddour O., Korber M.A. Research progress review on regional extreme events // *Advances in Climate Change Research*. 2018. V. 9, № 3. pp. 161–169.
- Sanderson B. M., Xu Y., Tebaldi C., Wehner M., Neill B., Jahn A., Pendergrass A.G., Lehner F., et al. Community Climate Simulations to assess avoided impacts in 1.5°C and 2°C futures // *Earth System Dynamics Discussions*. 2017. V. 8. pp. 827–847.
- Schiermeier Q. Models hone picture of climate impacts // *Nature*. 2012. V. 482, № 7385. pp. 286.
- Sedlmeier K., Feldmann H., Schädler G. Compound summer temperature and precipitation extremes over central Europe // *Theoretical and Applied Climatology*. 2017. V. 131. pp. 1–9.
- Seneviratne S. I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C. M., Kanae S., Kossin J., Luo Y., Marengo J., et al. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* // Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2012. pp. 109–230.
- Sillmann J., Kharin V. V., Zhang X., Zwiers F.W., Bronaugh D. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2013. V. 118, № 4. pp. 1716–1733.
- Wahl T., Jain S., Bender J. et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities // *Nature Clim Change*. 2015. V. 5. pp. 1093–1097.
- Wahl T., Plant N.G., Long J.W. Probabilistic assessment of erosion and flooding risk in the northern Gulf of Mexico // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2016. V. 121. pp. 3029–3043.
- Zhang X., Yang F. RCLimDex (1.0) user manual, Climate Research Branch, Environment Canada. 2004. 23 p.

Author's:

Kuzhevskaya Irina V., Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: ivk@ggf.tsu.ru

Nechepurenko Olga E., Assistant, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: o.e.nechepurenko@gmail.com

Chursin Vladislav V., Graduate student, Department of Meteorology and Climatology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: skriptym@mail.ru

Hiroshi Matsuyama, Professor, Department of Geography, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan.

E-mail: matuyama@tmu.ac.jp