

УДК 551.583.16

Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири

Е.В. Харюткина^{1,2}, С.В. Логинов¹, Е.И. Морару¹,
К.Н. Пустовалов^{1,2,3}, Ю.В. Мартынова^{1*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический 10/3

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 20.10.2021 г.

По данным реанализа ERA5 и наблюдений на метеостанциях проведена оценка пространственно-временной изменчивости экстремальных значений климатических параметров и опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири за 1979–2020 гг., а также выявлены тенденции их будущих вариаций в конце XXI в. на фоне глобальных климатических изменений. Совместный анализ полученных оценок позволил выявить очаги «риска» в регионах и определить тенденции их развития. Установлено, что в период 2011–2020 гг. температура воздуха растет на всей территории Западной Сибири, а количество осадков и скорость ветра – преимущественно в северных ее районах. Летом увеличиваются экстремальные значения количества осадков во всем регионе, за исключением горных районов в его юго-восточной части. Кроме того, области, подверженные влиянию сильных дождей, становятся более компактными и локализуются преимущественно на юге региона и вдоль его западной границы. Полученные результаты расчетов модели INM-CM5.0 позволили выявить отклик региональной климатической системы на происходящие глобальные изменения: до 2100 г. тенденции увеличения количества экстремальных событий в регионе будут сохраняться.

Ключевые слова: экстремальные значения климатических величин, опасные метеорологические явления, данные реанализа, данные наблюдений, математическое моделирование, Западная Сибирь; extreme climatic values, dangerous meteorological phenomena, reanalysis data, observational data, mathematical simulation, Western Siberia.

Введение

Особенность современных изменений климата – рост интенсивности, частоты и количества опасных природных явлений. Так, например, в 2020 г. в России было зарегистрировано на 97 явлений больше, чем в 2019 г. [1]. Больше всего опасных явлений в начале XXI в., согласно [2], наблюдается в Сибирском федеральном округе, при этом порядка 85% событий в год происходит в теплый период года [3]. На фоне продолжающегося потепления в Западной Сибири [4] возрастает экстремальность климата в этом регионе, связанная с ростом числа дней с опасными явлениями [5]. В юго-западной части региона (вблизи Горного Алтая) тенденция к усилению экстремальности климата проявляется в увеличении повторяемости сильных осадков и теплых

дней в году и уменьшении холодных дней в году [6]. А в юго-восточной части региона (Томская обл.) наиболее часто регистрируются такие явления, как сильные ветры и осадки, а также увеличивается продолжительность периодов понижения температуры до критических значений [7].

При этом отмечается, что в будущем экстремальность климата будет только усиливаться на фоне продолжающегося роста глобальной температуры [8], который прогнозируется в большинстве регионов планеты. Так, например, расчеты по данным CMIP5 для сценариев RCP 4.5 и RCP 8.5 показали, что к 2050 г. будет наблюдаться увеличение температуры и количества осадков на большей части Западной Сибири [9].

В ранее проведенных исследованиях авторов [5, 10] проанализирована временная изменчивость экстремальных значений климатических величин для северной и южной частей Западной Сибири за 1976–2016 гг. Выявлено, что на юге региона зимой наблюдалось похолодание, а на севере температура стабильно росла. Увеличение длины временных

* Елена Валерьевна Харюткина (kh_ev@mail2000.ru); Сергей Владимирович Логинов (LogSV13@gmail.com); Евгения Ивановна Морару (MoraruEI@yandex.ru); Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru); Юлия Валерьевна Мартынова (foxyj13@gmail.com).

рядов до 2020 г. позволяет скорректировать полученные ранее выводы, выполнить анализ динамики экстремальных значений и получить оценки их пространственной изменчивости. Использование моделей из проекта CMIP6 также позволит выявить отклик региональной климатической системы на происходящие глобальные изменения.

Цель настоящей работы — оценка пространственно-временной изменчивости экстремальных значений климатических величин и опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири, а также изучение их будущих тенденций на фоне глобальных климатических изменений.

Методика

Расчеты изменчивости основных климатических параметров (температуры приземного воздуха, скорости ветра, атмосферных осадков) проводились для территории Западной Сибири (50–70° с.ш., 60–90° в.д.). Использовались срочные (суточные) и среднемесячные значения климатических величин, измеренные на метеорологических станциях (центр распределения данных NOAA, <ftp://ftp.cdc.noaa.gov/pub/data/gsood>; ресурс ВНИИГМИ-МЦД, <http://meteo.ru/data>), а также данные реанализа ERA5 (<https://ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$. Исследование проводилось на двух временных интервалах: 1979–2020 гг. и 2011–2020 гг. Выбор интервалов обусловлен необходимостью оценить изменчивость рассматриваемых параметров в последнее десятилетие на фоне их изменений за большой временной интервал.

Для анализа долгопериодных изменений указанных величин рассчитывались их аномалии, представляющие собой отклонение средних значений от соответствующих норм, полученных для базового периода (1981–2010 гг., согласно рекомендации ВМО [11]). Оценки их межгодовой изменчивости, характеристики экстремальности климата рассчитывались по методике из [5]. Экстремально высокие и экстремально низкие значения определялись по пороговым квантилям выборочной функции распределения вероятности ($p < 0,05$ и $p > 0,95$ соответственно), построенной для каждого сезона на территории Западной Сибири.

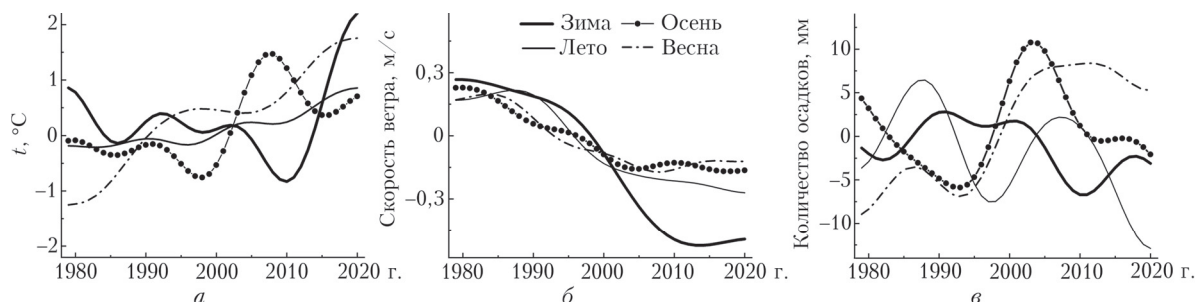


Рис. 1. Межгодовая изменчивость сглаженных значений средних сезонных аномалий климатических величин на территории Западной Сибири: *a* — температура воздуха; *б* — скорость ветра; *в* — количество осадков. Сглаживание проводилось с использованием фильтра низких частот с точкой отсечения 10 лет

По данным наблюдений на метеостанциях (<http://meteo.ru>) оценивалась повторяемость следующих опасных метеорологических явлений (ОМЯ) на основе указанных критериев за 1979–2020 гг. и 2011–2020 гг.:

— «очень сильный дождь» (сумма осадков за 12 ч ≥ 50 мм, максимальная температура воздуха между сроками $t_{\max} \geq 0$);

— «очень сильный снег» (сумма осадков за 12 ч ≥ 20 мм, $t_{\max} < 0$);

— «очень сильный ветер» (средняя скорость ветра в срок ≥ 20 м/с);

— «сильный мороз» (t_{\min} за сутки $\leq t_{\text{п}}$, $t_{\text{п}}$ — пороговые значения температуры, зависящие от критериев ОМЯ в конкретном Управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) Западной Сибири);

— «сильная жара» (t_{\max} за сутки $\geq t_{\text{п}}$).

Для двух последних ОМЯ указанные условия должны наблюдаться на территории в течение трех и более суток.

Стоит отметить, что для явлений, связанных с температурой воздуха, $t_{\text{п}}$ для разных станций может существенно различаться. Например, для ОМЯ «сильный мороз» $t_{\text{п}}$ изменяется от -40°C в Томской, Новосибирской, Кемеровской обл., в Алтайском крае и Республике Алтай до -55°C в Туруханском и Эвенкийском районах Красноярского края.

Для оценки регионального отклика на глобальное потепление использовались результаты расчета модели INM-CM5.0 [12, 13] из архива данных проекта CMIP6 (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>). Пространственное разрешение модели в атмосфере составляет $2 \times 1,5^\circ$ по долготе и широте. Были рассмотрены три климатических сценария: Historical для периода 1979–2014 гг., SSP2-4.5 и SSP5-8.5 для периода 2080–2100 гг. [14]. Сценарий SSP2-4.5 характеризуется радиационным форсингом $4,5 \text{ Вт/м}^2$, а SSP5-8.5 — форсингом $8,5 \text{ Вт/м}^2$.

Результаты

Сезонная и межгодовая изменчивость аномалий температуры воздуха, скорости ветра и количества осадков на территории Западной Сибири приведена на рис. 1, а средние оценки климатических величин и коэффициенты их линейного тренда (далее «тренд») — в таблице.

Сезонные оценки метеорологических величин (средние и тренды) на территории Западной Сибири в конце XX – начале XXI в. по данным наблюдений

Сезон	Средние		Тренды (за 10 лет)	
	1979–2020 гг.	2011–2020 гг.	1979–2020 гг.	2011–2020 гг.
<i>Температура воздуха, °С</i>				
Зима	-17,5	-16,5	0,22	3,64
Весна	-0,01	1,4	0,81	1,44
Лето	15,8	16,4	0,25	0,25
Осень	-0,9	-0,5	-0,36	0,04
<i>Скорость ветра, м/с</i>				
Зима	2,9	2,6	-0,25	0,22
Весна	3,2	3,1	-0,09	-0,08
Лето	2,6	2,5	-0,12	-0,05
Осень	2,9	2,7	-0,15	-0,19
<i>Осадки, мм</i>				
Зима	72,2	68,6	-0,96	18,21
Весна	96,1	103,1	4,88	-3,53
Лето	182,8	178,2	-0,94	-8,95
Осень	132,3	127,0	-2,47	-21,2

Примечание. Полужирным выделены статистически значимые оценки трендов (уровень значимости $\alpha = 0,05$).

Для всего исследуемого временного интервала во все сезоны года характерно в целом увеличение температуры воздуха и уменьшение скорости ветра на территории Западной Сибири (рис. 1, а, б, таблица). Количество осадков также уменьшается, за исключением весны, когда оно растет (рис. 1, в, таблица). Статистически значимые изменения температуры воздуха за 1979–2020 гг. в Западной Сибири отмечаются только в весенне-летний сезон, когда наблюдалось потепление с максимальной скоростью 0,81 °С/10 лет. На этом фоне достаточно отчетливо выделяется статистически значимый рост температуры в последнее десятилетие, но уже только зимой (3,64 °С/10 лет). В остальные сезоны тренды температуры незначимы ($\alpha = 0,05$).

Максимальная величина отрицательного тренда скорости ветра за 1979–2020 гг. наблюдается зимой (таблица). При этом в этот сезон в 2011–2020 гг. знак тренда меняется на положительный, тогда как в остальные сезоны тенденция к уменьшению скорости ветра сохраняется. Однако все полученные оценки для этого временного интервала статистически незначимы.

Что касается количества осадков, за 1979–2020 гг. его весенний рост не проявляется в последнее десятилетие – наблюдается статистически незначимое уменьшение. Зимой, напротив, количество осадков увеличивается. Стоит отметить, что величина тренда в 2011–2020 гг. в несколько раз превышает соответствующие оценки за 1979–2020 гг.

Таким образом, особенность периода 2011–2020 гг. на фоне 1979–2020 гг. – существенные изменения в тенденциях климатических величин зимой. Это позволяет сделать вывод об усилении потепления и увеличении количества осадков в последние годы.

Ранее в [5] было установлено, что в начале XXI в. в Западной Сибири растет экстремальность

климата, которая характеризуется увеличением экстремумов исследуемых климатических величин, что может быть связано с развитием ОМЯ.

Из анализа рис. 2, а следует, что в последнее десятилетие зимой на всей территории Западной Сибири экстремально низкие температуры сдвигаются в сторону более высоких значений – это говорит о том, что тенденция к похолоданию, отмечаемая ранее в регионе в этот сезон [10], меняется на тенденцию к потеплению.

На фоне этой тенденции отмечается хоть и незначительное, но уменьшение повторяемости опасных явлений, связанных с низкими температурами (сильный мороз), в юго-восточной части региона, преимущественно на территории Томской обл. Так, максимальное количество случаев с сильными морозами отмечается на ст. Ванжиль-Кынак в январе, где за 1979–2020 гг. было зафиксировано 147 явлений (~ 4 события/год), из них 32 (~ 3 события/год) – в последнее десятилетие. При этом распределение значений экстремальных температур зимой (пороговое значение $p > 0,95$) и летом ($p < 0,05$ и $p > 0,95$) практически не меняется на интервале 2011–2020 гг. (в работе не представлено). Такое опасное явление, как сильная жара, отмечалось лишь один раз на ст. Усть-Озерное в июле, причем приходилось оно на временной интервал до 2011 г.

Увеличение экстремальных значений ($p > 0,95$) скорости ветра зимой наблюдается преимущественно над Обской губой и вдоль побережья Карского моря, при этом на юге региона они уменьшаются (не представлено). Также здесь уменьшается количество опасных явлений, связанных с ветром (очень сильный ветер). Например, на высокогорной станции Кара-Тюрек число случаев зимой составило 798 за 1979–2020 гг. (~ 20 событий/год) и 26 за 2011–2020 гг. (~ 3 события/год), а летом – 54 и 1 соответственно.

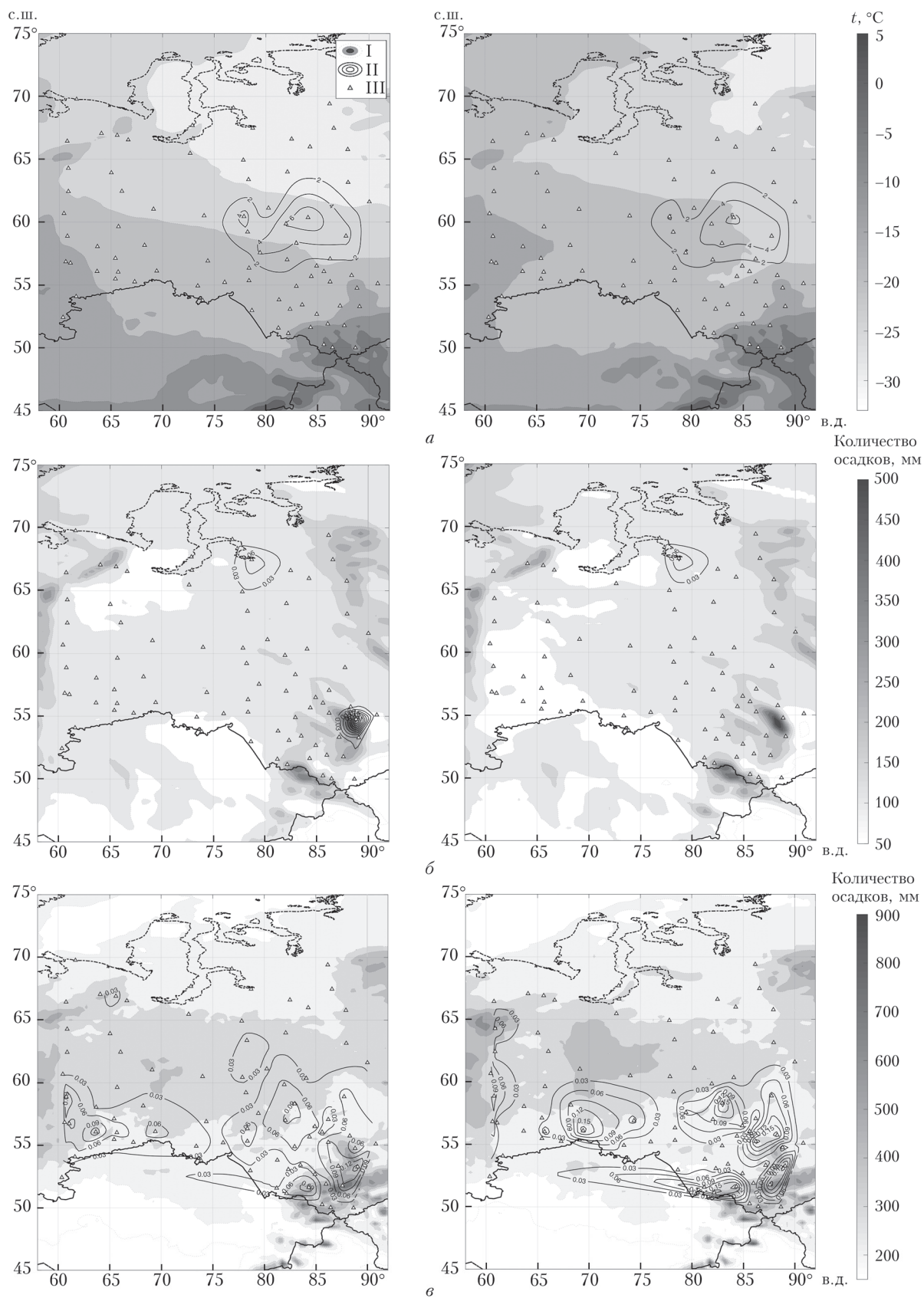


Рис. 2. Экстремальные значения климатических величин по данным реанализа (I) и количество ОМЯ (II), зафиксированных на метеостанциях (III) за периоды 1979–2020 гг. (левая панель) и 2011–2020 гг. (правая панель): а – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) зимой ($p < 0,05$); б – количество осадков (мм) зимой ($p > 0,95$); в – количество осадков (мм) летом ($p > 0,95$)

В последние годы экстремальные значения количества осадков зимой увеличиваются в северной части региона и уменьшаются в южной (рис. 2, б). Например, на высокогорной ст. Ненастная (Кузнецкий Алатау) в 1979–2020 гг. наблюдалось 15 случаев сильного снега, тогда как в 2011–2020 гг. не было зарегистрировано ни одного. Стоит отметить, что для этой станции максимальное количество (46 событий) сильных снегопадов приходится на осень, при этом в последнее десятилетие их количество уменьшается в ~2 раза.

Летом на временном интервале 2011–2020 гг. увеличиваются экстремально низкие (не представлено) и экстремально высокие (рис. 2, в) значения количества осадков на всей территории Западной Сибири, за исключением горных районов в юго-восточной части (Кузнецкий Алатау). Эта тенденция согласуется с изменениями повторяемости ОМЯ, связанных с осадками (сильный дождь), на станциях: уменьшение наблюдается на ст. Ненастная и ст. Неожиданный (горные районы), а увеличение – на ст. Ишим (равнинная территория). Кроме того, области, подверженные влиянию сильных дождей, становятся более компактными и локализуются преимущественно на юге региона и вдоль его западной границы.

Изменение местоположения квантилей экстремальных значений осадков (рис. 2, в) сопровождается изменением границ возникновения ОМЯ, зафиксированных на метеостанциях. Однако на рис. 2, а, где представлены экстремальные значения температуры, значимых изменений в распределении ОМЯ не наблюдается. Различие в поведении пространственных распределений объясняется разли-

чием пороговых значений ОМЯ, установленных каждой из УГМС Сибирского региона.

Для оценки регионального отклика на глобальное потепление оценки статистического анализа были дополнены результатами расчета оценок по модели INM-CM5.0 для 1979–2014 гг. и 2081–2100 гг. В конце XXI в. сохранится тенденция к увеличению температуры воздуха (рис. 3, а). При этом ее средние оценки в интервале 2081–2100 гг., по сравнению с 1979–2014 гг., при сценарии SSP2-4.5 могут измениться на 4,9 °С зимой и на 2,4 °С летом, а при самом неблагоприятном сценарии (SSP5-8.5) – на 8,4 °С зимой и на 4,9 °С летом. Подобные изменения происходят и для экстремальных значений. Так, из рис. 3, б видно, что экстремально низкие температуры зимой также будут сдвигаться в сторону более высоких значений в конце XXI в. Выявленная ранее тенденция роста температуры воздуха (см. рис. 1, таблицу) сохранится до конца XXI в. К тому же она будет сопровождаться повсеместным ростом количества атмосферных осадков, особенно ярко выраженным в восточной и юго-восточной частях Западной Сибири (рис. 4), с максимальным увеличением осадков зимой.

Так, изменение количества осадков к 2100 г. по сценарию SSP2-4.5 составит 14,0 мм зимой и 9,0 мм летом, а по сценарию SSP5-8.5 – 25,5 мм зимой и 5,3 мм летом. Рост количества осадков зимой больше для самого агрессивного сценария SSP5-8.5, а летом – для сценария SSP2-4.5. В этих же районах можно ожидать и увеличение экстремально высоких значений количества осадков, при этом летом расположение максимумов становится более локализованным (рис. 4, в, г).

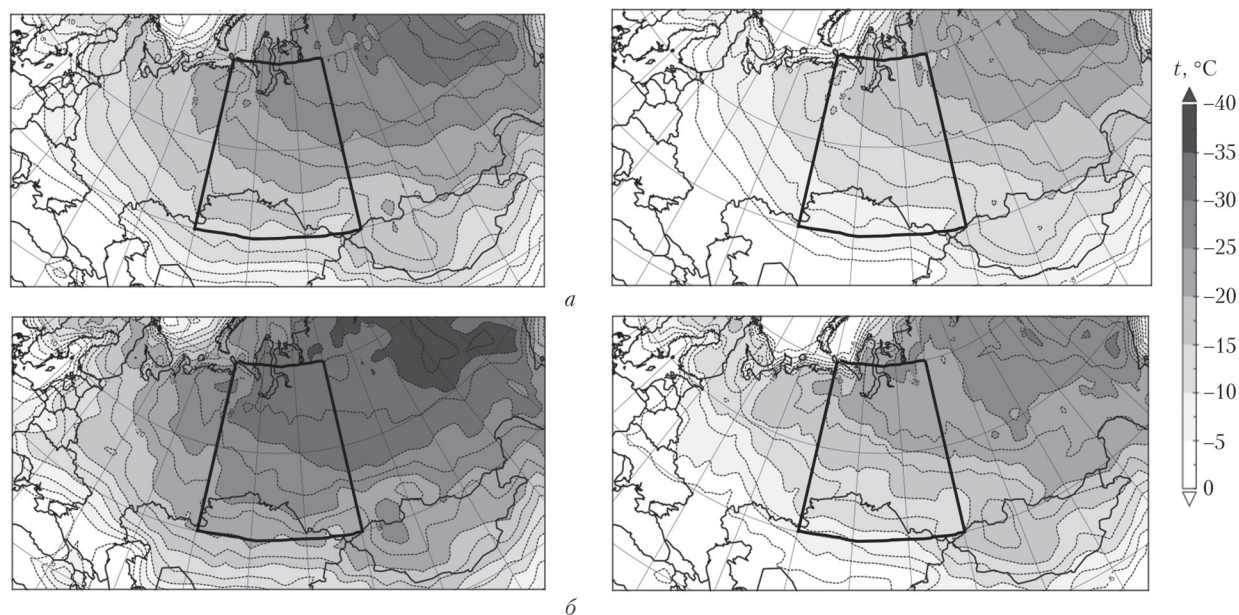


Рис. 3. Температура воздуха за 1979–2014 гг. (левая панель) и 2081–2100 гг. (правая панель): а – средние зимние; б – экстремальные зимние ($p < 0,05$); выделенная область – регион Западной Сибири

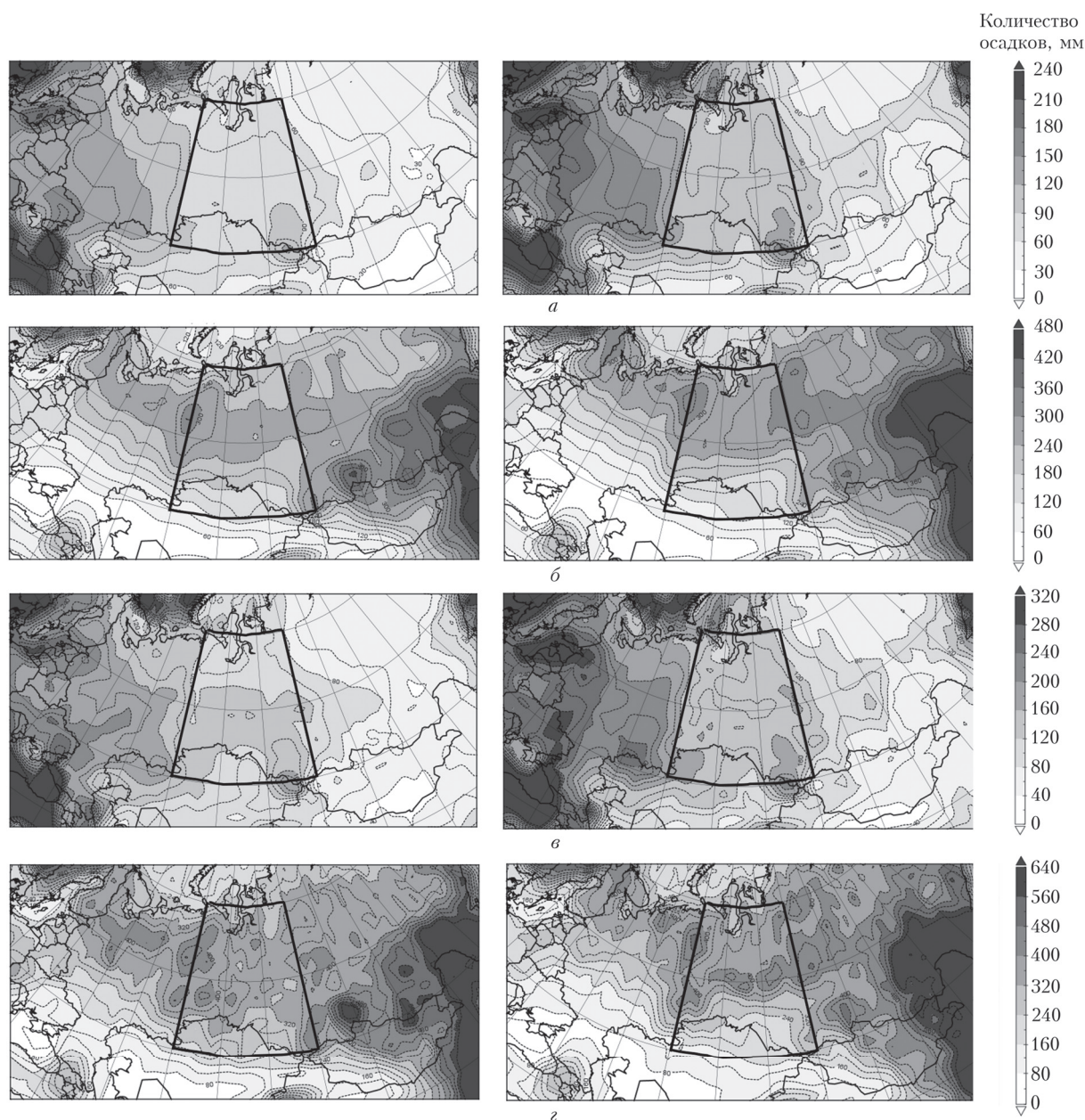


Рис. 4. Средние сезонные оценки количества осадков (мм) за 1979–2014 гг. (левая панель) и 2081–2100 гг. (правая панель) по сценарию SSP5-8.5: *a* – среднее зимнее; *б* – среднее летнее; *в* – экстремальное количество зимой, *г* – летом ($p > 0,95$); выделенная область – регион Западной Сибири

Этот вывод согласуется с [15], где также отмечается увеличение экстремальных событий во всем регионе северо-восточной Азии. Скорость ветра, как и ее экстремальные значения, будет продолжать расти по территории в целом, однако значимых особенностей в данном случае выявить не удалось.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведен анализ пространственно-временной изменчивости экстремальных значений климатических параметров и опасных метеорологических явлений

на территории Западной Сибири за 1979–2020 гг. и 2011–2020 гг., а также получены оценки их будущих изменений до 2100 г. на фоне глобальных климатических изменений.

Совместный анализ полученных оценок пространственно-временной изменчивости этих величин позволил выявить очаги «риска» в регионах и определить тенденции их развития. Установлено, что в последнее десятилетие растут средние и экстремальные значения температуры воздуха на всей территории Западной Сибири, а количество осадков и скорость ветра увеличиваются преимущественно в ее северных районах. Летом увеличиваются экстремальные значения количества

осадков во всем регионе, за исключением горных районов в его юго-восточной части. Кроме того, области, подверженные влиянию сильных дождей, становятся более компактными и локализируются преимущественно на юге региона и вдоль его западной границы. Согласно оценкам, полученным в результате расчетов модели INM-CM5.0 до 2100 г., тенденции к увеличению экстремальных событий в регионе будут сохраняться.

Поскольку в Западной Сибири находятся несколько административных субъектов, в каждом из которых установлены свои пороговые значения для опасных метеорологических явлений, появляется достаточно большой диапазон этих значений (особенно в случае явлений с низкими температурами). При этом если площадь субъекта велика, то не всегда по установленному пороговому значению можно сделать объективные выводы о наличии опасных явлений. В данном случае было бы целесообразно скорректировать установленные пороговые значения с точки зрения климатической однородности районов и областей, что позволит получить более корректные результаты по учету опасных явлений в регионе.

Исследование выполнено в рамках государственной темы № 121031300154-1 и при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076>).

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2017. М.: Росгидромет, 2018. 70 с.
3. Игнатьева А.В., Кнауэр Р.В. Природные условия развития чрезвычайных ситуаций на территории Сибирского федерального округа // Геосферные исслед. 2020. № 1. С. 66–77.
4. Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В. Оценка современных тенденций изменения среднемесячной температуры в пограничном слое атмосферы Сибирского региона // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34. № 9. С. 705–710; Lomakina N.Ya., Lavrinenko A.V. Estimation of current trends in the monthly mean temperature in the atmospheric boundary layer over Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2021, V. 34. N 6. P. 672–677.
5. Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И., Мартынова Ю.В., Пустовалов К.Н. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в кон-

це XX–начале XXI веков // Фундамент. и прикл. климатол. 2019. Т. 2. С. 45–65.

6. Кужевская И.В., Нечепуренко О.Е., Чурсин В.В., Мацуяма Х. Анализ проявления экстремальности климата с середины XX века на территории Горного Алтая // Геосферные исслед. 2020. № 3. С. 97–108.
7. Мельник М.А., Волкова Е.С. Пространственный анализ природно-климатических опасностей зимнего периода на территории Томской области // Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской территории России и на сопредельных территориях. Белгород: БелГУ, 2019. С. 243–246.
8. IPCC, 2021: Summary for Policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (eds.).
9. Лагутин А.А., Волков Н.В., Мордвин Е.Ю. Влияние глобальных климатических изменений на климат Западной Сибири в первой половине XXI в. // Вычислительные технологии. 2018. Т. 23, № 4. С. 83–94.
10. Харюткина Е.В., Инполитов И.И., Логинов С.В. Роль радиационных и циркуляционных факторов в изменении климата Западной Сибири в конце XX и начале XXI веков // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2016. № 6. С. 651–659.
11. Заявление ВМО о состоянии глобального климата в 2019 году. ВМО, 2020. № 1248. 35 с.
12. Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин В.Я., Лысков В.Н., Грицун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2017. Т. 53, № 2. С. 164–178.
13. Володин Е.М., Грицун А.С. Воспроизведение возможных будущих изменений климата в XXI веке с помощью модели климата INM-CM5 // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2020. Т. 56, № 3. С. 1–12.
14. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G.A., Moss R., Riahi K., Sanderson B.M. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // Geosci. Model Dev. 2016. V. 9. P. 3461–3482.
15. Катцов В.М., Школьник И.М., Ефимов С.В. Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах // Метеорол. и гидрол. 2017. № 7. С. 68–80.

E.V. Kharyutkina, S.V. Loginov, E.I. Moraru, K.N. Pustovalov, Yu.V. Martynova. Dynamics of climate extremes and trends of dangerous meteorological phenomena in Western Siberia.

The spatiotemporal variability of extreme climatic values and dangerous meteorological phenomena in Siberia in 1979–2020 and their trends by the end of the 21st century against the background of global climate change are studied based on ERA5 reanalysis data and observational data at meteorological stations. The combined analysis of the derived estimates of characteristics of these spatiotemporal variations makes it possible to identify the centers of "risk" in the region and to determine the tendencies in their development. The air temperature is found to be increased throughout the territory, while precipitation and wind speed, mainly in northern Western Siberia over 2011–2020. Extreme precipitation increases in summer throughout the region, with the exception of mountainous areas in its southeastern part. In addition, regions affected by heavy rainfall are becoming smaller in area and are located mainly in the south of the region and along its western border. The results of the INM-CM5.0 model calculations revealed the response of the regional climate system to the ongoing global changes: the tendencies towards an expansion in the number of extreme events in the region will persist until 2100.