ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2020, том 84, № 3, с. 404–413

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.583

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В СЕРЕДИНЕ XXI ВЕКА ПО МОДЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

© 2020 г. В. В. Виноградова*

Институт географии РАН, Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 01.10.2019 г.
После доработки 13.01.2020 г.
Принята к публикации 30.01.2020 г.

Оценка изменения частоты, интенсивности и продолжительности волн тепла в летний период (июнь–август) на территории России для “исторического периода” (1980–1999 гг.) и прогноза на середину XXI в. (2046–2055 гг.) проводилась по данным, полученным на глобальной климатической модели (INMCM4) Института вычислительной математики РАН. Определение критериев экстремальных явлений зависит от выбора пороговых значений. В настоящей работе рассматриваются пороговые значения для определения волн тепла как значения 95-й процентили распределения максимальной суточной температуры. Анализ полученных результатов показывает, что при “мягком” сценарии RCP4.5 в середине XXI в. ожидается увеличение числа дней с максимальными температурами, превышающими пороговые значения на юге Европейской территории России и Западной Сибири, в Якутии, на севере Чукотки и в Приморском крае. Максимальные изменения ожидаются на Таймыре и Ямале. На остальной территории число таких дней может сократиться. Для “жесткого” сценария RCP8.5 ожидаются более контрастные изменения при сохранении основных особенностей их локализации. При этом сценарии в середине XXI в. на юге страны средняя максимальная температура в волне тепла может превысить 40 °C.

Ключевые слова: волны тепла, максимальная суточная температура, дискомфорт, пороговые значения, потепление климата, модельные прогнозы

DOI: 10.31857/S2587556620030115

ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата сопровождается возрастанием числа экстремальных климатических событий. Повторяемость волн тепла и дней с экстремально высокой температурой возросла на значительной части территории Европы, Азии и Австралии [14]. По данным Росгидромета, в последнее десятилетие значительно возросло среднее число опасных гидрометеорологических явлений со значительным экономическим и социальным ущербом [11]. В 2006–2010 гг. опасных явлений было зарегистрировано в 2.3 раза больше, чем в 1996–2000 гг. В Пятом докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата подчеркивается, что в будущем, при повышении средних глобальных температур на суше будут чаще наблюдаться экстремально высокие и реже – экстремально низкие температуры. Волны тепла будут наблюдаться чаще и в более продолжительном режиме [6].

Волны тепла оказывают негативное воздействие на человека, его здоровье, различные отрасли хозяйства и природные экосистемы [1, 2]. Избыточные тепловые нагрузки вызывают у человека стресс, влияющий на производительность труда, и могут вызывать рост числа насильственных преступлений [16]. Высокие температуры – одна из причин роста конфликтов как на межличностном уровне, так и на уровне общества. Аномально высокие температуры вызывают пиковые нагрузки на электросети, повреждают железные дороги и автомагистрали. Тепловые волны являются основной причиной смертельных случаев, связанных с аномальной погодой. Учитывая тренды глобального потепления, можно предположить, что в будущем тепловые волны могут проявляться более часто, с более тяжелыми последствиями, более продолжительно и с большим охватом территорий [20].

Значительное число исследований в России и за рубежом посвящено выявлению зависимости смертности от температуры воздуха, в частности от волн тепла [7–10, 12, 13]. Особое внимание к этой проблеме привлекла ситуация, которая возникла на европейской части России летом 2010 г., когда волна тепла наблюдалась непрерывно в течение более 40 сут. Гипертермия стала мощным

стрессом для здоровья населения. Так, во время волны жары 2010 г. в Москве произошло резкое увеличение числа случаев смерти – на 11 тыс. дополнительно (по сравнению с июлем–августом 2009 г.) [7].

Волны тепла исследуются с самых разных сторон, от причин возникновения до последствий и прогнозов. Определение критериев экстремальных явлений, и в частности волн тепла, зависит от выбора пороговых значений. Один из подходов основан на понимании экстремальных явлений как редких, вероятности попадания в которые малы, т.е. как процентили функции распределения 90, 95 и 99% для экстремальных положительных аномалий [5]. Другой подход основан на критических значениях, которые определяются исходя из порогов неблагоприятного воздействия на природные или технические системы [20]. Но универсального определения "тепловой волны" не существует из-за различий в значениях экстремальной температуры в разных географических районах [2, 13, 17]. Часто критерий "тепловой волны" определяется количеством последовательных дней с высокими температурами воздуха и скоростью, с которой температура повышается, но оба эти критерия также зависят от географического региона и времени года [20]. В некоторых районах тепловой волной считается длительный период с более высокой, чем обычно, температурой, или более короткий период, но с аномально высокими температурами [15, 17, 19].

В последнее время значительное внимание уделяется прогнозной оценке волн тепла в середине и в конце столетия при потеплении климата по модельным сценариям. Большинство зарубежных работ базируется на модельных оценках климата, которые показывают значительный рост волн тепла в середине и в конце XXI в. [18].

Поэтому целью настоящей работы является оценка изменений тепловой нагрузки, и в частности волн тепла, в середине XXI в. (2046–2055 гг.) на территории России на основании модельного прогноза по глобальной климатической модели (INMCM4) Института вычислительной математики РАН [4, 21, 22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Оценка изменения количества, интенсивности и продолжительности волн тепла на территории России проводилась для конца XX в. и модельного прогноза на середину XXI в. на основании данных, полученных на глобальной климатической модели (INMCM4) Института вычислительной математики РАН [4, 21, 22]. В модель включен интерактивный расчет углеродного цикла, цикла метана, химия атмосферы. Модель участвует в CMIP5.

Были использованы результаты расчетов по двум сценариям, согласно которым радиационный форсинг от увеличения концентрации парниковых газов к 2100 г. составит соответственно 8.5 и 4.5 Вт/м^2. Глобальное потепление по модельным расчетам к концу XXI в. составит 1.9 K для сценария RCP4.5 и 3.4 K для сценария RCP8.5. Это соответствует предположениям об умеренном ограничении выбросов и отсутствии ограничения выбросов [4, 21, 22]. Исследовались суточные значения максимальной температуры воздуха за период 2046–2055 гг. с пространственным разрешением 2° × 1.5° по долготе и широте. Ошибка воспроизведения поля максимальной температуры моделью на территории России составляет ±1–2 K, при этом приземная температура может быть завышена в высоких широтах на 2–4 K [4, 22]. Среднеквадратичная ошибка (норма ошибки) среднегодовой температуры в модели INMCM4 составляет 1.84 K [4].

В качестве пороговых значений для определения волн тепла рассматривались значения 95-й процентили распределения максимальной температуры. По данному критерию проведена оценка изменения количества, интенсивности и продолжительности волн тепла за летний период (июнь–август) на территории России для "исторического периода" модели с 1980 до 1999 г. и для модельного прогноза на 2046–2055 гг. по двум сценариям. Выбор критерия связан с его универсальностью для всей территории России.

Оценка всех показателей волн тепла для периода 2046–2055 гг. проводилась с использованием пороговых значений, найденных по базовому – "историческому периоду" модели 1980–1999 гг.

В табл. 1 приведены пороговые значения максимальной температуры для различных меридиональных и широтных секторов на территории России, полученных по данным метеорологической сети и по модельным результатам для "исторического периода".

В табл. 1 показано, что пороговые значения максимальной температуры довольно существенно различаются в различных широтных и меридиональных секторах. При этом даже на севере (80°–60° с.ш.) они остаются довольно высокими: от 24 °C на Европейской территории России (ЕТР) до 29.9 °C в Восточной Сибири. На юге (50°–40° с.ш.) пороговые значения изменяются от 39.6 °C на ЕТР до 30 °C в Восточной Сибири. При этом можно отметить, что если на ЕТР и в Западной Сибири они значительно изменяются с широтой (на 6 °C), то в Восточной Сибири пороговые значения практически не меняются с широтой. Рисунок 1 и табл. 1 и 2 позволяют сравнить пороговые значения, вычисленные по модельным данным, с аналогичными значениями, вычисленными на основании данных метеорологи-

Таблица 1. Пороговые значения максимальной температуры (°C), соответствующие 95% функции распределения по данным метеостанций и по данным модели

Широтный сектор	Меридиональный сектор									
	30°–60° в.д. ЕТР		60°–90° в.д. Западная Сибирь		90°–120° в.д. Центральная Сибирь		120°–150° в.д. Восточная Сибирь		150°–180° в.д. Дальний Восток	
	станции	модель	станции	модель	станции	модель	станции	модель	станции	модель
80°–60° с.ш., север	24.8	24.0	25.3	26.0	26.2	29.4	27.4	29.9	22.1	27.0
60°–40° с.ш., центр и юг	31.7	33.8	31.2	31.9	29.9	30.7	28.7	29.4	20.8	25.4
50°–40° с.ш., юг	33.1	39.6	–	–	30.0	–	28.1	30.0	–	–

Таблица 2. Абсолютная (°C) и относительная (%) ошибка пороговых значений максимальной температуры, рассчитанной по модели NMCM4

Широтный сектор	Меридиональный сектор				
	30°–60° в.д. ЕТР	60°–90° в.д. Западная Сибирь	90°–120° в.д. Центральная Сибирь	120°–150° в.д. Восточная Сибирь	150°–180° в.д. Дальний Восток
75°–60° с.ш., север	0.8°C (3%)	–0.7°C (–3%)	–3.2°C (–12%)	–2.5°C (–9%)	–4.9°C (–22%)
60°–40° с.ш., центр и юг	–2.1°C (–7%)	–0.6°C (–2%)	–0.8°C (–3%)	–0.7°C (–3%)	–4.6°C (–22%)
50°–40° с.ш., юг	–6.5°C (–20%)	–	–	–1.9°C (–7%)	–

ческой сети. Их максимальные различия сосредоточены на юге ЕТР и севере Сибири. В этих районах относительная ошибка достигает 20–22%, или 4.6–8 °C (рис. 1 и табл. 2). В Центральной и Восточной Сибири относительные ошибки – 3–12%, или –2–2 °C, а на ЕТР (кроме юга) и в Западной Сибири – 2–7%, или 0–4 °C (см. рис. 1 и табл. 2). Причем на значительной части территории России модельные значения оказываются выше станционных, за исключением ЕТР и Дальнего Востока, где они ниже (см. табл. 2). Это может быть связано с тем, что для модельных данных приземная температура вероятно завышена в высоких широтах на 2–4 K [4, 22]. В тоже время некоторое завышение пороговых значений по модельным данным позволяет не завышать число дней с максимальными температурами, превышающими пороговые значения.

Для “исторического периода” и двух сценариев для 2046–2055 гг. определялись среднее за период число дней с максимальной температурой, превышающей пороговое значение, среднее количество волн тепла продолжительностью три дня и более, максимальная и средняя максимальная температура в волне тепла. Для этих параметров были построены карты различных характеристик волн тепла для середины XXI в. и для условий конца XX в. по модельным данным.

Волны тепла являются фактором, существенно влияющим на условия жизнедеятельности населения. Поэтому в работе [3] мы попытались установить универсальный для всей территории России критерий воздействия волн тепла на человека. Из всех характеристик волн тепла были выбраны три параметра, отражающие их количество, продолжительность и интенсивность (средняя максимальная температура). Значения каждого параметра были разделены на 6 градаций, используя среднее значение параметра и среднеквадратическое отклонение. Значения градаций и уровень воздействия показателя приведены в табл. 3. Градации устанавливались по расчетам для “исторического периода” (1980–1999 гг.), затем проводилось сравнение результатов прогноза для середины XXI в. с результатами для “исторического периода”.

Критерии балльной оценки волн тепла как фактора дискомфортности природной среды были установлены следующим образом: из трех параметров волн тепла выбирался максимальный балл, позволяющий учесть наибольший уровень неблагоприятного воздействия, при этом средняя максимальная температура в волне тепла должна быть не ниже 25 °C [3]. При анализе полученных результатов была использована балльная оценка неблагоприятного воздействия волн тепла, которая позволяет уменьшить ошибки завышения порогового значения по модельным данным.

Таблица 3. Градации волн тепла как фактора дискомфортности природной среды по модельным данным

Степень дискомфортности среды	Балл	Число дней с $T_{max} > 95\%$	Количество волн тепла, более 3 дней	Максимальная температура в волне
Абсолютно неблагоприятная	6	≥ 8.0	≥ 1.2	≥ 42.0
Экстремально неблагоприятная	5	7.1–7.9	1.0–1.19	37.1–41.9
Неблагоприятная	4	6.0–7.0	0.7–0.99	30.1–37.0
Условно неблагоприятная	3	5.0–5.9	0.5–0.69	25.0–30.0
Благоприятная	1	≤ 4.9	≤ 0.49	≤ 24.9

РЕЗУЛЬТАТЫ

Волны тепла в период современного потепления климата

Результаты оценки числа дней с максимальными температурами, превышающими пороговое значение, полученные по результатам моделирование для “исторического периода” (1980–1999 гг.) показывают, что на большей части территории России отмечалось в среднем 4–5 таких дней (рис. 2а). Максимальное количество аномально жарких дней (6–7 дней) наблюдалось в западных регионах страны, вдоль 55° с.ш. и на севере: на полуостровах Ямал и Таймыр (см. рис. 2а). На юге ЕТР и в Приморском крае число дней с максимальными температурами, превышающими пороговое значение, – 3–4, что немного отличается от значений, полученных по данным метеорологической сети [3]. Это объясняется тем, что для этих регионов пороговые значения, полученные по модельным данным, оказываются выше, чем этот параметр, полученный по станционным данным (см. табл. 1).

На рис. 2б и 2в показано число дней с максимальной температурой, превышающей пороговое значение для модельного прогноза на середину XXI в. (2046–2055 гг.) для двух сценариев. При “мягком” сценарии RCP4.5 ожидается, что число дней с максимальными температурами, превышающими пороговые значения, на юге ЕТР и Западной Сибири, в Якутии, на севере Чукотки и в Приморском крае достигнет 5–7 дней. Максимальные изменения ожидаются на Таймыре и Ямале, где число дней с аномально высокими температурами возрастет до 10–12 (см. рис. 2б). На остальной территории число таких дней сократится на 2–3 (см. рис. 2б).

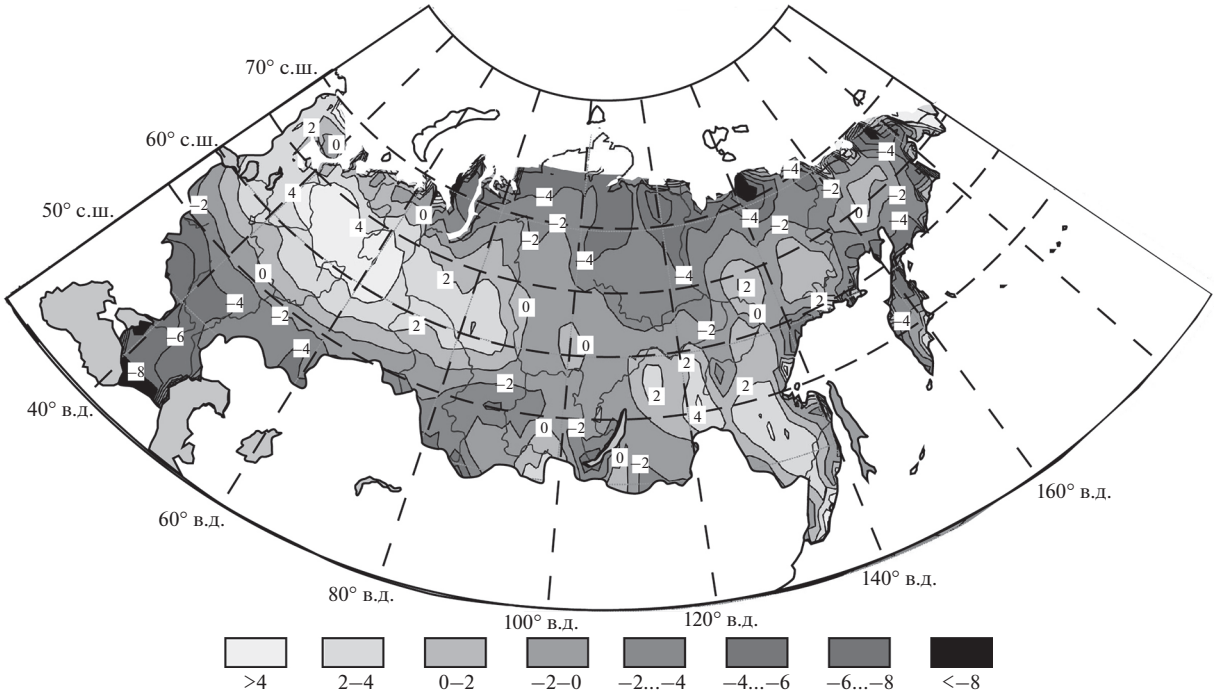

Рис. 1. Разница пороговых значений максимальной температуры (°C), рассчитанных по данным модели NMCM4 и по данным метеорологической сети.

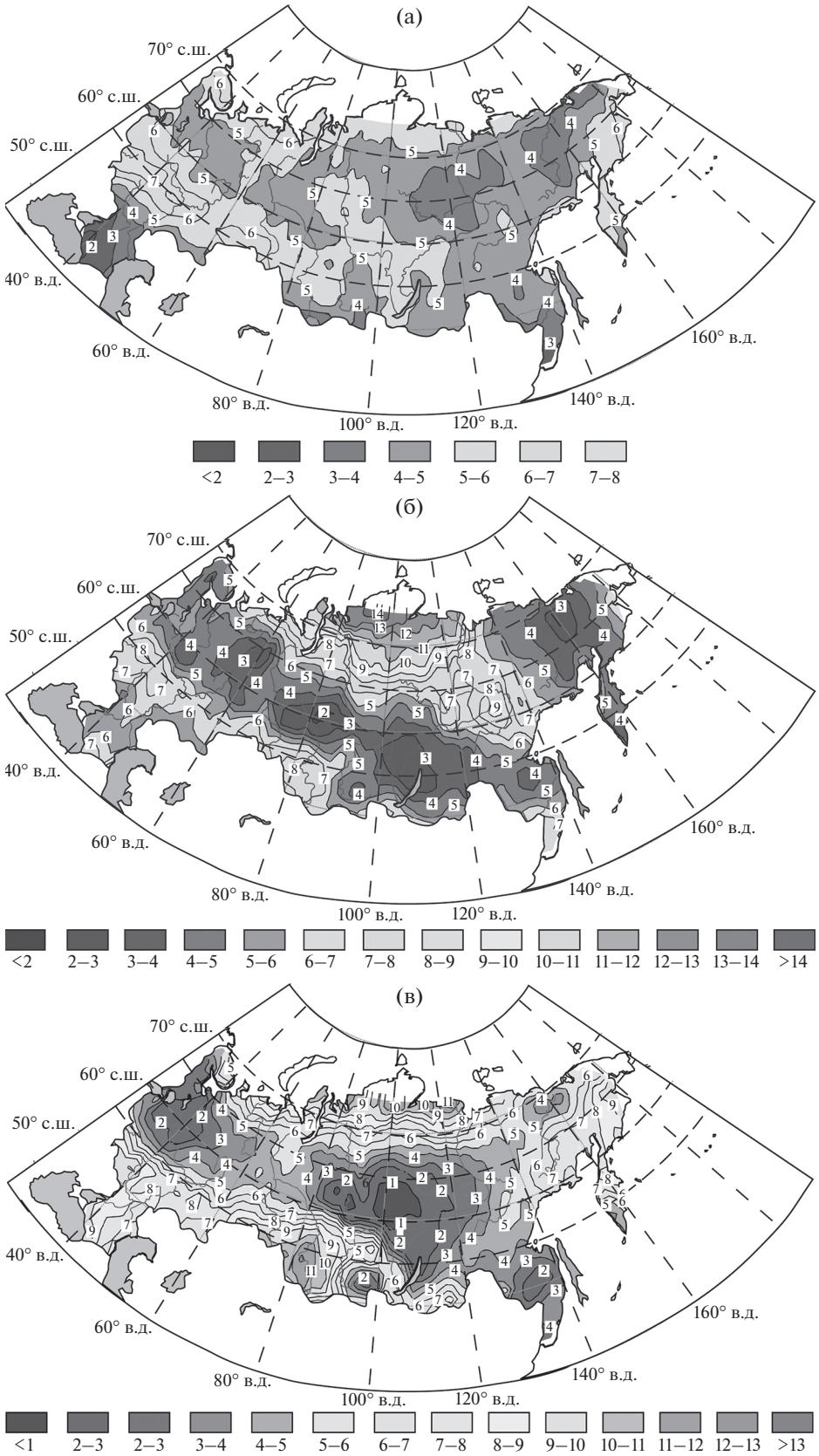

Рис. 2. Число дней с максимальной температурой, превышающей 95% функции распределения: (а) 1980–1999 гг. “исторический период”; (б) 2046–2055 гг., сценарий RCP4.5; (в) 2046–2055 гг., сценарий RCP8.5.

Таблица 4. Волны тепла как фактор дискомфортности по модельным сценариям на территории России

Критерий дискомфортности среды	Балл	Число ячеек, их доля в % (в скобках)		
		1980–1999 гг.	2046–2055 гг. сценарий RCP4.5	2046–2055 гг. сценарий RCP8.5
Абсолютно неблагоприятная, %	6	29 (3)	191 (20)	283 (29)
Очень неблагоприятная, %	5	130 (13)	170 (17)	130 (13)
Неблагоприятная, %	4	752 (76)	464 (48)	479 (49)
Условно неблагоприятная, %	3	74 (8)	150 (15)	86 (9)
Сумма ячеек		985	975	978

Примечание. Общее число ячеек на территории России – 990.

Расчеты для “жесткого” сценария RCP8.5 показывают более контрастные изменения при сохранении основных особенностей их локализации. На Севере число дней с аномально высокой температурой возрастет до 9–14, эта область распространится и на север ЕТР (см. рис. 2в). На юге ЕТР и Западной Сибири число дней с температурой, превышающей пороговое значение, достигнет 9–12, и эта область расширится. На Чукотке и севере Камчатки будет наблюдаться 7–10 дней с высокими температурами (см. рис. 2в). При этом в центре и на северо-западе ЕТР, в центральных районах Красноярского края и Якутии и на севере Приморского края можно ожидать уменьшение числа дней с максимальной температурой, превышающей пороговое значение. В этих регионах будет всего 1–2 таких дня (см. рис. 2в).

Рассматривая приведенные выше особенности, необходимо отметить, что в середине XXI в. (2046–2055 гг.) можно ожидать увеличение продолжительных волн тепла в тех же регионах, а именно для сценария RCP4.5 на Таймыре и Ямале, а для сценария RCP8.5 – на севере и юге территории. На остальной территории количество продолжительных волн тепла практически не изменится.

Важной характеристикой волны тепла является средняя максимальная температура в волне тепла. Для “исторического периода” (1980–1999 гг.) средняя максимальная температура волны тепла изменялась на ЕТР – от 27 °С на севере до более 40 °С на юге. На востоке страны, в центральной части Сибири, составляла 34–35 °С, в северной половине Западной Сибири и на Дальнем Востоке – 27–30 °С (см. табл. 1), что довольно хорошо совпадает с данными наблюдений [3].

Модельный прогноз на середину XXI в. (2046–2055 гг.) для двух сценариев показывает изменения средней максимальной температуры в волне тепла на 1–4 °С. При этом на большей части территории страны изменения незначительны. Для “жесткого” сценария RCP8.5 можно отметить рост средней максимальной температуры на 1–2 °С на юге ЕТР, юге Западной Сибири и на Чукотке, а на юге Восточной Сибири, на Таймыре и на Камчатке на 2–3 °С. При этом на северо-западе ЕТР и в центре Красноярского края средняя максимальная температура в волне тепла понизится на 2–4 °С. Таким образом, при “жестком” сценарии RCP8.5 в середине XXI в. на юге страны (южнее 55° с.ш. и западнее 90° в.д.) территории, где средняя максимальная температура в волне тепла превысит 40 °С, значительно расширятся. В восточной части России, за исключением побережий, средняя максимальная температура в волне тепла составит 31–36 °С. И только на северо-западе ЕТР эта температура понизится до 26–28 °С. Для сценария RCP4.5 изменения средней максимальной температуры в волне тепла менее контрастны.

Волны тепла как фактор дискомфортности современного климата

Используя полученный критерий дискомфортности волн тепла (табл. 3), было вычислено количество ячеек со сторонами 2° × 1.5° по долготе и широте, где наблюдались волны тепла с различными баллами дискомфортности (табл. 4).

Сравнение полученных результатов для “исторического периода” и прогноза на середину XXI в. (2046–2055 гг.) показывает увеличение числа ячеек, где могут отмечаться волны тепла, относящихся к абсолютно неблагоприятной градации с 3 до 20% для “мягкого” сценария RCP4.5 и до 29% – для “жесткого” сценария RCP8.5. Количество ячеек с очень неблагоприятными волнами тепла возрастает в середине XXI в. (2046–2055 гг.) с 13 до 17% только для сценария RCP4.5, а для сценария RCP8.5 не меняется. Территории, где могут наблюдаться волны тепла неблагоприятной градации для “исторического периода” (1980–1999 гг.) занимали большую часть территории – 78% ячеек. В середине XXI в. эти территории уменьшаются до 48 и 49% ячеек для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно. Число ячеек с волнами тепла условно неблагоприятной градации (самая мягкая градация) увеличиваются с 8%

в конце XX в. до 15% в середине XXI в. только для сценария RCP4.5. При этом для всех периодов общее количество ячеек, где отмечаются волны тепла, практически не меняется.

Построенные с использованием критерия дискомфортности карты волн тепла для "исторического периода" (1980–1999 гг.) и модельных прогнозов на середину XXI в. (2046–2055 гг.) по сценариям RCP4.5 и RCP8.5 позволяют выделить на территории России регионы возможного усиления воздействия волн тепла в середине XXI в. (рис. 3). Для "исторического периода" (1980–1999 гг.) они показывают, что абсолютно неблагоприятные и очень неблагоприятные волны тепла в основном отмечались на юге ЕТР и Западной Сибири (южнее 55° с.ш.), причем южнее 50° с.ш. они были абсолютно неблагоприятными (см. рис. 3а). На остальной территории волны тепла относились к градации неблагоприятные и только на севере ЕТР, на севере Чукотки и крайнем юге Камчатки отмечались условно неблагоприятные волны тепла (см. рис. 3а).

Сравнение карт для "исторического периода" (1980–1999 гг.) и модельного прогноза на середину XXI в. (2046–2055 гг.) по сценарию RCP4.5 показывает расширение области абсолютно неблагоприятных волн тепла на юге ЕТР и появление такой области на севере Сибири, от п-ова Ямал до дельты Лены (см. рис. 3б). Еще одна небольшая область абсолютно неблагоприятных волн тепла может возникнуть в центре Якутии. Причем, необходимо отметить, что на юге абсолютно неблагоприятные градации балла волн тепла достигаются за счет роста температуры воздуха, а на севере за счет роста числа дней с температурой, превышающей пороговое значение. При этом, области очень неблагоприятных волн тепла расширяются незначительно, в основном на ЕТР и вдоль зоны с абсолютно неблагоприятными волнами тепла на севере Сибири (см. рис. 2б). На Европейской территории увеличивается область условно неблагоприятных волн тепла (самая мягкая градация), продвигаясь на север до Кольского п-ва и на восток приблизительно до 85° в.д. (см. рис. 3б). Еще одна область с условно неблагоприятными волнами тепла возникает на Чукотке и Камчатке.

Прогноз на середину XXI в. для "жесткого" сценария RCP8.5 показывает распределение балла дискомфортности волн тепла, отличающееся от сценария RCP4.5 (см. рис. 3в). Расширяется до 54° с.ш. и продвигается на восток до 90° в.д. область абсолютно неблагоприятных значений, отмечавшаяся на юге ЕТР. По сравнению со сценарием RCP4.5 уменьшается область абсолютно неблагоприятных волн тепла в районе Таймыра, и еще одна область появляется на юге Чукотки и севере Камчатки (см. рис. 3в). При этом сокращается зона с условно неблагоприятными волнами тепла на севере ЕТР, и появляются небольшие зоны условно неблагоприятных волн тепла в Хабаровском крае и на юге Камчатки (см. рис. 3в).

ВЫВОДЫ

1. При "мягком" сценарии RCP4.5 в середине XXI в. ожидается увеличение числа дней с максимальными температурами, превышающими пороговые значения на юге ЕТР и Западной Сибири, в Якутии, на севере Чукотки и в Приморском крае. Максимальные изменения ожидаются на Таймыре и Ямале, где число дней с аномально высокими температурами может возрасти до 10–12. На остальной территории число таких дней сократится. Для "жесткого" сценария RCP8.5 ожидаются более контрастные изменения при сохранении основных особенностей их локализации. В тех же регионах можно ожидать увеличение продолжительных волн тепла. При "жестком" сценарии RCP8.5 в середине XXI в. на юге страны средняя максимальная температура в волне тепла возможно превысит 40 °С. В восточной половине России средняя максимальная температура в волне тепла составит 31–36 °С. И только на северо-западе ЕТР эта температура понизится до 26–28 °С.

2. Сравнение балла дискомфортности волн тепла для "исторического периода" и прогноза на середину XXI в. показывает расширение территорий, где волны тепла относятся к абсолютно неблагоприятной градации, с 3 до 20% для "мягкого" сценария RCP4.5 и до 29% – для "жесткого" сценария RCP8.5. Число ячеек, где могут наблюдаться волны тепла неблагоприятной градации (более мягкая градация), уменьшается с 78 до 48% и 49% ячеек для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 соответственно.

3. В середине XXI в. по сценарию RCP4.5 возможно расширение области с абсолютно неблагоприятными волнами тепла на юге ЕТР и появление такой области на севере Сибири и в центре Якутии. Причем, на юге абсолютно неблагоприятная градация достигается за счет роста температуры воздуха, а на севере за счет увеличения числа дней с температурой, превышающей пороговое значение.

4. Для "жесткого" сценария RCP8.5 область абсолютно неблагоприятных значений на юге расширяется до 54° с.ш. и продвигается на восток до 90° в.д. Возникают небольшие области абсолютно неблагоприятных волн тепла в районе Таймыра, на юге Чукотки и севере Камчатки. При этом появляются небольшие зоны условно неблагоприятных (более мягкая градация) волн тепла на севере ЕТР, в Хабаровском крае и на крайнем юге Камчатки.

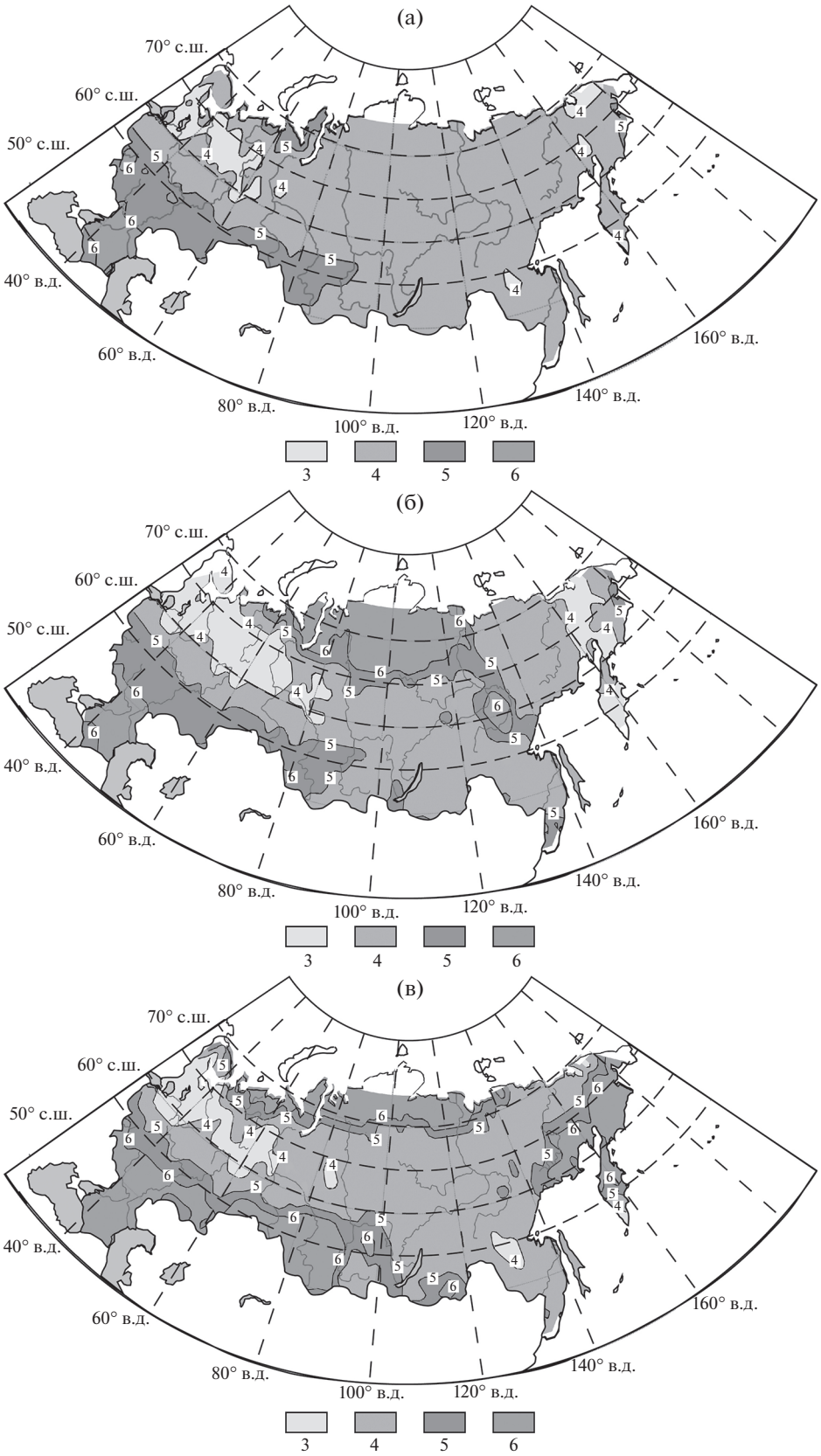

Рис. 3. Волны тепла (балл дискомфортности): (а) 1980–1999 гг. “исторический период”; (б) 2046–2055 гг., сценарий RCP4.5; (в) 2046–2055 гг., сценарий RCP8.5.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-10236).

FUNDING

The study was financially supported by the Russian Science Foundation, project no. 16-17-10236.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградова В.В.* Воздействие климатических условий на человека в засушливых землях Европейской России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 2. С. 68–81.
2. *Виноградова В.В.* Волны тепла на Европейской территории России в начале XXI в. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2014. № 1. С. 47–55.
3. *Виноградова В.В.* Волны тепла на территории России как фактор дискомфортности природной среды // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 4. С. 68–77.
4. *Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С.* и др. Математическое моделирование Земной системы / под ред. Н.Г. Яковлева. М.: МАКС Пресс, 2016. 328 с.
5. Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
6. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern- mental Panel on Climate Change / Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (Eds.). Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
7. *Ревич Б.А.* Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки // Экология человека. 2011. № 7. С. 3–9.
8. *Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Першаген Г.* Новая эпидемиологическая модель по оценке воздействия аномальной жары и загрязненного атмосферного воздуха на смертность населения (на примере Москвы 2010 г.) // Профилактическая медицина. 2015. Т. 18. № 5. С. 15–19.
9. *Ревич Б.А., Шапошников Д.А., Токаревич Н.А.* Изменения климата, волны жары и холода как факторы риска повышенной смертности населения в некоторых городах России: Труды Международной конференции Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле. М.: Институт космических исследований РАН, 2013. Т. 1. С. 295–315.
10. *Шапошников Д.А., Ревич Б.А., Мелешко В.П., Говоркова В.А., Павлова Т.В., Варакина Ж.Л.* Опыт прогнозирования ожидаемой дополнительной смертности при потеплении климата на примере города Архангельска // Экология человека. 2013. № 8. С. 17–23.
11. Росгидромет. http://www.meteorf.ru
12. *Blazejczyk K.* Influence of extreme heat waves on man. Instytut Geografii Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne, 2000. V. 108. P. 101–108.
13. *Blazejczyk K.* The consequences of the Changes in Global Climate for Human Health // Global Change. 2009. V. 16. P. 87–110.
14. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Solomon S. et al. (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. 996 p.
15. Danmark får varme- og hedebølge. Danish Meteorological Institute, 22 July 2008. dmi.dk (accessed: 18.08.2013).
16. *John S., Cooper C.* Thermal stress in the U.S.A.: effects on violence and on employee behavior // Stress and Health. 2004. № 21 (1). P. 3–15.
17. Jump up "Värmebölja Klimat Kunskapsbanken SMHI". Smhi.se. (accessed: 17.07.2013).
18. *Meehl G.A., Tebaldi C.* More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century // Science. 2004. № 305. P. 994–997.
19. *Porja T.* Heat Waves Affecting Weather and Climate over Albania. // J. Earth Sci. Clim. Change. 2013. V. 4. Is. 4. P. 149. https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000149
20. *Robinson P.J.* On the Definition of a Heat Wave // J. Appl. Meteorol. (American Meteorol. Society). 2001. № 40 (4). P. 762–775.
21. *Volodin E.M.* Possible reasons for low climate-model sensitivity to increased carbon dioxide concentrations // Izv. RAS. Atmospheric and Oceanic Phys. 2014. V. 50. № 4. P. 350–355.
22. *Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V.* Simulating present-day climate with the inmcm4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations // Izv. RAS. Atmospheric and Oceanic Phys. 2010. V. 46. № 4. P. 414–431.

Thermal Impact in the Territory of Russia in the Middle of the 21st Century by Model Data

V. V. Vinogradova[#]

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

[#]*e-mail: vvvinog@yandex.ru*

The assessment of heat waves' number, intensity and duration change during summer (June–August) in the Russia territory for the "historical period" (1980–1999) and for the middle of the 21st century (2046–2055)

was made according to the data of the global climate model (INMCM4) of the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences. The definition of the extreme events' criteria depends on the thresholds' choice. In this paper, heat waves' thresholds are considered as the values of the 95th percentile of maximum daily temperature distribution. An increase in the number of days with maximum temperatures exceeding the threshold values for the south of the European Russia and Western Siberia, Yakutia, the north of Chukotka, and Primorsky krai in the middle of the 21st century according to the "soft" scenario of RCP4.5 was revealed. Maximum changes are expected in Taimyr and Yamal. In the rest of the territory, the number of such days will be reduced. For the "hard" scenario of RCP8.5, more contrast changes in the similar locations are expected. Under the "hard" scenario, by the middle of the 21st century the maximum temperature in the heat wave will exceed 40°C in the south of the country.

Keywords: heat waves, maximum daily temperature, discomfort, thresholds, climate warming, model forecasts

REFERENCES

1. Vinogradova V.V. Influence of climate conditions on man in arid lands of European Russia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2012, no. 2, pp. 68–81. (In Russ.).
2. Vinogradova V.V. Heat waves in the European Russia at the beginning of the 21st century. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2014, no. 1, pp. 47–55. (In Russ.).
3. Vinogradova V.V. Heat waves in Russia as the uncomfortable factor of the environment. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 4, pp. 68–77. (In Russ.).
4. Volodin E.M., Galin V.Ya., Gritsun A.S. et al. *Matematicheskoe modelirovanie Zemnoi sistemy* [Mathematical Modeling of the Earth System]. Yakovlev N.G., Ed. Moscow: MAKS Press, 2016. 328 p.
5. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second Roshydromet Assessment Report on Climate Changes and its Consequences in Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1009 p.
6. *IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern- mental Panel on Climate Change*. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
7. Revich B.A. Heat waves, air quality and mortality of population of European part of Russia in the summer of 2010: results of preliminary assessment. *Ekologiya Cheloveka*, 2011, no. 7, pp. 3–9. (In Russ.).
8. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Pershagen G. New epidemiological model for assessment of the impact of extremely hot weather and air pollution on mortality (in case of the Moscow heat wave of 2010). *Profilakticheskaya Meditsina*, 2015, vol. 18, no. 5, pp. 15–19. (In Russ.).
9. Revich B.A., Shaposhnikov D.A., Tokarevich N.A. Climate change, heat waves and cold as the risk factors for increased mortality in some Russian cities. In *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii Vliyanie kosmicheskoi pogody na cheloveka v kosmose i na zemle* [Proc. Int. Conf. Space Weather Effects on Humans in Space and on Earth]. Moscow: Inst. Kosmicheskikh Issled. Akad. Nauk, 2013, vol. 1, pp. 295–315. (In Russ.).
10. Shaposhnikov D.A., Revich B.A., Meleshko V.P., Govorkova V.A., Pavlova T.V., Varakina Zh.L. Experience in forecasting the expected extra mortality of climate warming on the example of the city of Arkhangelsk. *Ekologiya Cheloveka*, 2013, no. 8, pp. 17–23. (In Russ.).
11. Roshydromet. Available at: http://www.meteorf.ru (accessed: 27.02.2020). (In Russ.).
12. Blazejczyk K. Influence of extreme heat waves on man. *Instytut Geografii Uniwersytetu Jagiellońskiego*, *Prace Geograficzne*, 2000, vol. 108, pp. 101–108.
13. Blazejczyk K. The consequences of the changes in global climate for human health. *Papers on Global Change,* 2009, vol. 16, pp. 87–110.
14. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S. et al., Eds. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2007. 996 p.
15. Danmark får varme-og hedebølge. Danish Meteorological Institute, 22 July 2008. Available at: dmi.dk (accessed: 18.08.2013).
16. John S., Cooper C. Thermal stress in the U.S.A.: effects on violence and on employee behavior. *Stress Health*, 2004, vol. 21, no. 1, pp. 3–15.
17. Jump up "Värmebölja Klimat Kunskapsbanken SMHI". Available at: smhi.se (accessed: 17.07.2013).
18. Meehl G.A., Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 2004, vol. 305, pp. 994–997.
19. Porja T. Heat waves affecting weather and climate over Albania. *J Earth Sci Clim Change*, 2013, vol. 4(4), pp. 149. doi 10.4172/2157-7617.1000149
20. Robinson P.J. On the definition of a heat wave. *J. Appl. Meteorol.,* 2001, vol. 40, no. 4, pp. 762–775.
21. Volodin E.M. Possible reasons for low climate-model sensitivity to increased carbon dioxide concentrations. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 350–355.
22. Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V. Simulating present-day climate with the inmcm4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 414–431.