

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.583

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ КЛИМАТИЧЕСКИЙ ИНДЕКС (UTCI) В СЕРЕДИНЕ XXI в. НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛЬНЫХ ПРОГНОЗОВ

© 2025 г. В. В. Виноградова*

Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: vvvinog@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.04.2024 г.

После доработки 16.12.2024 г.

Принята к публикации 31.03.2025 г.

Для оценки биоклиматических условий на территории России в середине XXI в. в работе использовался универсальный термический климатический индекс UTCI. Исследовались сезонные и региональные особенности UTCI в условиях будущего климата (2040–2059 гг.) для двух сценариев: “мягкого” (SSP1-2.6) и “жесткого” (SSP5-8.5). Расчет среднесуточных значений индекса UTCI на территории России был выполнен с использованием программного пакета BioKlima 2.6. Для расчета использовались ежедневные данные трех моделей, участвующих в шестой фазе международного проекта межмодельного сравнения CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project): Института вычислительной математики РАН, Метеорологического офиса Центра Хэдли и Метеорологического института им. Макса Планка. Установлено, что на территории России в условиях будущего климата для обоих сценариев по-прежнему будут преобладать условия холодового стресса. Зимой (январь) практически на всей территории будет отмечаться холодовой стресс различных градаций. Летом (июль) на большей части территории России будут наблюдаться условия отсутствия теплового стресса, а на юге – комфорта. Оценка возможных будущих изменений биоклиматических условий на территории России в середине XXI в. показала, что для обоих сценариев будет заметна тенденция сокращения дней с сильным холодовым стрессом и увеличения числа дней с тепловым стрессом на юге Европейской территории России и на юге и в центре Сибири, особенно по сценарию SSP5-8.5. Доля дней с градацией UTCI “нет теплового стресса” будет расти на большей части территории России. Намечившиеся тенденции будут способствовать улучшению биоклимата на севере и востоке страны и ухудшению условий в южных регионах, за счет роста числа дней с тепловым стрессом.

Ключевые слова: универсальный термический климатический индекс (UTCI), холодовой стресс, тепловые нагрузки, тепловой комфорт, модельные прогнозы, сценарии изменения климата

DOI: 10.7868/S2658697525030066

ВВЕДЕНИЕ

По данным ВМО, начиная с 1980-х годов каждое последующее десятилетие было теплее, чем предыдущее после 1850 г., а десятилетие 2011–2020 гг. стало самым теплым за всю историю наблюдений (ВМО, 2021). На этом фоне увеличивается число опасных гидрометеорологических явлений, волны тепла стали самой смертоносной метеорологической опасностью, расширяются зоны лесных пожаров, в том числе и в Арктике.

Практически на всей территории России также происходит потепление различной степени интенсивности (Третий ..., 2022). Максимальная интенсивность потепления в 1976–2020 гг. отмечается в регионах: Средняя Сибирь – весной

(+0.87°C/10 лет), Восточная Сибирь – весной и осенью (+0.81 и +0.85°C/10 лет), и Европейская территория России (ЕТР) – зимой и летом (+0.72 и +0.46°C/10 лет) (Третий ..., 2022).

В Докладе об изменении климата IPCC (IPCC, 2021) указывается, что антропогенное изменение климата уже влияет на многие метеорологические и климатические экстремальные события во всех регионах земного шара. В частности, явления экстремальной жары стали более частыми и более интенсивными в большинстве регионов суши с 1950-х годов, в то время как явления экстремального холода стали менее частыми и менее суровыми. Согласно всем рассмотренным в этом докладе сценариям, глобальная приземная температура будет продолжать расти, по меньшей

мере, до середины столетия и повысится на 1.5 и 2°C в течение XXI в., если не произойдет резкого сокращения выбросов CO₂ и других парниковых газов.

Изменения в климатической системе могут сопровождаться увеличением частоты и интенсивности экстремальных жарких событий, сильных осадков, сельскохозяйственных и экологических засух, уменьшением арктического морского льда, снежного покрова и многолетней мерзлоты. Арктика будет продолжать нагреваться сильнее, превышая скорость глобального потепления в два раза (IPCC, 2021).

На фоне продолжающегося глобального потепления появляется необходимость оценки воздействия текущих и будущих климатических условий на человека, для которой часто используются биоклиматические индексы. Одним из наиболее современных индексов, учитывающих комплексное воздействие на человека температуры, скорости ветра, солнечной радиации и влажности воздуха, является Универсальный термический климатический индекс (Universal Thermal Climate Index – UTCI). В частности, в работе (Katavoutas et al., 2022; Staiger et al., 2019) показано, что UTCI является одним из наиболее подходящих индексов, который используется в различных областях биометеорологии человека как для оценки краткосрочного воздействия погоды, так и для оценок последствий долгосрочных изменений климата, а также в эпидемиологии, медицинских исследованиях, биометеорологических прогнозах, туризме и рекреации, оценке биоклимата разного масштаба. UTCI может применяться в таких областях, как ежедневное прогнозирование и предупреждения, городское и региональное планирование, экологическая эпидемиология и исследования воздействия климата на человека (Pappenberger et al., 2015). Этот индекс был использован Błażejczyk и Kunert (2011) для исследования сезонных особенностей биоклимата в разных европейских городах и региональной изменчивости биоклимата в Европе. Использование UTCI позволило объяснить в деталях, почему определенные сезоны и регионы могут быть опасными для человека с точки зрения его физиологических реакций на внешние раздражители. Существенным преимуществом UTCI является универсальная шкала оценки, которая позволяет применять этот индекс во всех климатических условиях, а результаты, полученные в разных областях, полностью сопоставимы (Błażejczyk and Błażejczyk, 2014). В отличие от других биоклиматических индексов, тесно связанных с температурой, индекс UTCI использует более современную модель теплоизоляции одежды (Havenith et al., 2012). Индекс применялся для оценки тепловых нагрузок

как в глобальном масштабе (Pappenberger et al., 2015), так и для Европы (Di Napoli et al., 2018; Pappenberger and Hannah, 2018) и Африки (Boko et al., 2013). Используя Универсальный термический климатический индекс (UTCI), Di Napoli et al. (2018) показали, что увеличение теплового стресса в Европе за последние десятилетия способствует росту смертности в условиях умеренного и сильного теплового стресса. Преимущества индекса UTCI были использованы для оценки биоклиматических условий на территории России в условиях современного климата (Виноградова, 2019; Vinogradova, 2021), которые показали, что на большей части территории страны преобладают условия холодного стресса. Но в современный период наблюдается улучшение биоклиматических условий в северных регионах и увеличение тепловой нагрузки на юге ЕТР. Сравнительный анализ биоклиматических условий Чукотки и Аляски (Grigorieva et al., 2023) показал, что самые холодные категории UTCI наиболее распространены в прибрежных районах северной Аляски и Чукотки и обусловлены сильными ветрами и низкими температурами зимой, а категория слабый тепловой стресс все же иногда может достигаться только во внутренних районах этих полуостровов. Но за период 1979–2020 гг. частота возникновения экстремальных холодов на Аляске и Чукотке снизилась приблизительно на 25% (Grigorieva et al., 2023).

Целью настоящей работы является оценка возможных будущих изменений биоклиматических условий на территории России в середине XXI в. (2040–2059 гг.) с использованием универсального термического климатического индекса (UTCI) для двух контрастных сценариев SSP1-2.6 и SSP5-8.5.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки биоклиматических условий на территории России в середине XXI в. использовался Универсальный термический климатический индекс UTCI. Это индекс, основанный на модели теплового баланса, показывает тепловой стресс окружающей среды, воздействующий на организм человека (De Freitas and Grigorieva, 2017). Индекс UTCI нацелен на характеристику термических условий окружающей среды и применяется в основных областях биометеорологии человека (Błażejczyk et al., 2010, 2013; Bröde et al., 2010, 2012; Jendritzky et al., 2009, 2012). Он основан на многоузловой модели Fiala теплового баланса человека (Fiala et al., 2012). Индекс UTCI можно охарактеризовать как эквивалентную температуру окружающей среды (°C), которая оказывает такое же физиологическое воздей-

ствие на человека, как и фактическая окружающая среда (Bröde et al., 2012). Отклонение UTCI от температуры воздуха (T_a) зависит от фактических значений температуры воздуха, средней лучистой температуры ($T_{\text{мрт}}$), скорости ветра (v_a) и влажности, выраженной как упругость водяного пара (e) или относительная влажность (R) (Błażejczyk et al., 2013):

$$\text{UTCI} = f(T_a; T_{\text{мрт}}; v_a; e) = T_a + \Delta(T_a; T_{\text{мрт}}; v_a; e). \quad (1)$$

Чувствительность UTCI к температуре, влажности и скорости ветра показывает, что он применим в условиях тепла и холода, это особенно актуально для России. Градации UTCI с точки зрения теплового воздействия на человека установлены следующим образом (Błażejczyk et al., 2013; Bröde et al., 2012; Fiala et al., 2012): выше $+46^\circ\text{C}$ – экстремальный тепловой стресс; от $+38$ до $+46^\circ\text{C}$ – очень сильный тепловой стресс; от $+32$ до $+38^\circ\text{C}$ – сильный тепловой стресс; от $+26$ до $+32^\circ\text{C}$ – умеренный тепловой стресс; от $+9$ до $+26^\circ\text{C}$ – нет теплового стресса; от 0 до $+9^\circ\text{C}$ – слабый холодный стресс; от -13 до 0°C – умеренный холодный стресс; от -27 до -13°C – сильный холодный стресс; от -40 до -27°C – очень сильный холодный стресс; ниже -40°C – экстремальный холодный стресс. Диапазон значений UTCI от 18 до 26°C считается “зоной теплового комфорта”.

На основании индекса UTCI проведена оценка биоклиматических условий на территории России в середине XXI в. (2040–2059 гг.). Для расчетов были использованы среднесуточные значения приземной температуры воздуха, скорости ветра, влажности воздуха и атмосферного давления за период 2040–2059 гг. (Copernicus ..., 2021), полученные на основе результатов расчетов трех моделей, участвующих в шестой фазе международного проекта межмодельного сравнения CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) и для двух сценариев изменения климата: “мягкого” (SSP1-2.6) и “жесткого” (SSP5-8.5), согласно 6-му оценочному докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) (IPCC, 2021). Набор сценариев включает сценарий с очень высокими выбросами парниковых газов (ПГ) и выбросами CO_2 , которые примерно вдвое превышают нынешние уровни к 2100 гг. (SSP5-8.5), и сценарий с низкими выбросами, которые снижаются до чистого нуля примерно к 2050 г. (SSP1-2.6). Социально-экономические предпосылки, лежащие в основе сценариев на основе SSP, различаются предполагаемым уровнем контроля загрязнения воздуха. В сценарии SSP1-2.6 предполагается усиление контроля за загрязнением воздуха за счет заметной декарбонизации. По сравнению

с 1850–1900 гг. глобальная приземная температура в 2081–2100 гг. будет выше на 1.3 – 2.4°C по сценарию SSP1-2.6, и на 3.3 – 5.7°C – по сценарию SSP5-8.5 (IPCC, 2021).

Использовались результаты численных экспериментов на глобальных климатических моделях Института вычислительной математики РАН INM-CM5-0 с разрешением $1.5^\circ \times 2^\circ$ (Володин и др., 2017), Метеорологического офиса Хэдли Центра HadGEM3-GC31, имеющих разрешение 1.25° (широта) $\times 1.875^\circ$ (долгота) (Williams et al., 2017), и Метеорологического института им. Макса Планка MPI-ESM1-2-LR с разрешением 1.865° (широта) $\times 1.875^\circ$ (долгота) (Mauritsen and Roeckner, 2020). Эти модели успешно воспроизводят основные климатические характеристики на территории России по сравнению с эмпирическими данными. Две модели были также использованы в работе (Katavoutas et al., 2022) для оценки будущего биоклимата, с использованием индекса UTCI, в европейских городах и показали хорошие результаты при сравнении с данными наблюдений. Среднесуточные значения UTCI рассчитывались как отдельно для каждой модели, так и среднее значение для трех моделей. Для этого данные трех моделей были приведены к единому шагу по широте и долготе в 2° . В расчетах UTCI использовался программный пакет BioKlima © 2.6 (<https://www.igipz.pan.pl/bioklima.html>). Оценка соотношения сигнала к шуму для ансамбля моделей проведена с использованием индекса SNR (Signal-to-Noise Ratio):

$$\text{SNR} = S/N, \quad (2)$$

где S – уровень сигнала $S = X_{\text{model}} - X_{\text{hist}}$, а N – уровень шума.

$$N = \sqrt{1/N \sum_{i=1}^N (X_i - X_{av})^2}, \quad (3)$$

где N – количество моделей, X_i – результат i -й модели, X_{av} – среднее по ансамблю, X_{model} – среднее значение прогнозируемого параметра, X_{hist} – среднее значение в историческом периоде. Она показала, что значение индекса больше единицы, т.е. уровень сигнала больше уровня шума.

Проведено сравнение значений UTCI, рассчитанных по модельным и стационарным данным за период 2015–2022 гг. (www.meteo.ru). Все данные были приведены к шагу по широте и долготе в 2° . Рассчитывалась корреляция стационарных и модельных данных для среднесуточных и среднегодовых значений и двух сценариев, а также ошибка вычисления UTCI (табл. 1). Построены зависимости универсального термического климатического индекса UTCI по стационарным данным и данным моделей и регрессионные

Таблица 1. Значения коэффициента корреляции и ошибок значений расчета индекса UTCI по осредненным данным трех моделей относительно данных наблюдений за 2015–2022 гг.

Сценарий	Коэффициент корреляции			Модуль ошибки индекса (средняя/максимальная, °C)		
	январь	июль	год	январь	июль	год
SSP1-2.6	0.93	0.92	0.95	4/17	1/11	3/11
SSP5-8.5	0.93	0.91	0.95	5/15	1/11	4/11

прямые за период 2015–2022 гг. (рис. 1). Оценка корреляции расчетов UTCI по модельным данным и данным метеосети показывает, что данные хорошо синхронизированы. Для всех моделей и сценариев коэффициент корреляции более 0.9 (см. табл. 1). Построенные зависимости индекса UTCI по станционным и мо-

дельным данным также показывают хорошее сходство значений двух массивов, но модели несколько занижают значения UTCI по сравнению со станционными данными (см. рис. 1). Средняя ошибка рассчитанных значений UTCI по модулю не превышает 5°C, а максимальная ошибка – 15°C.

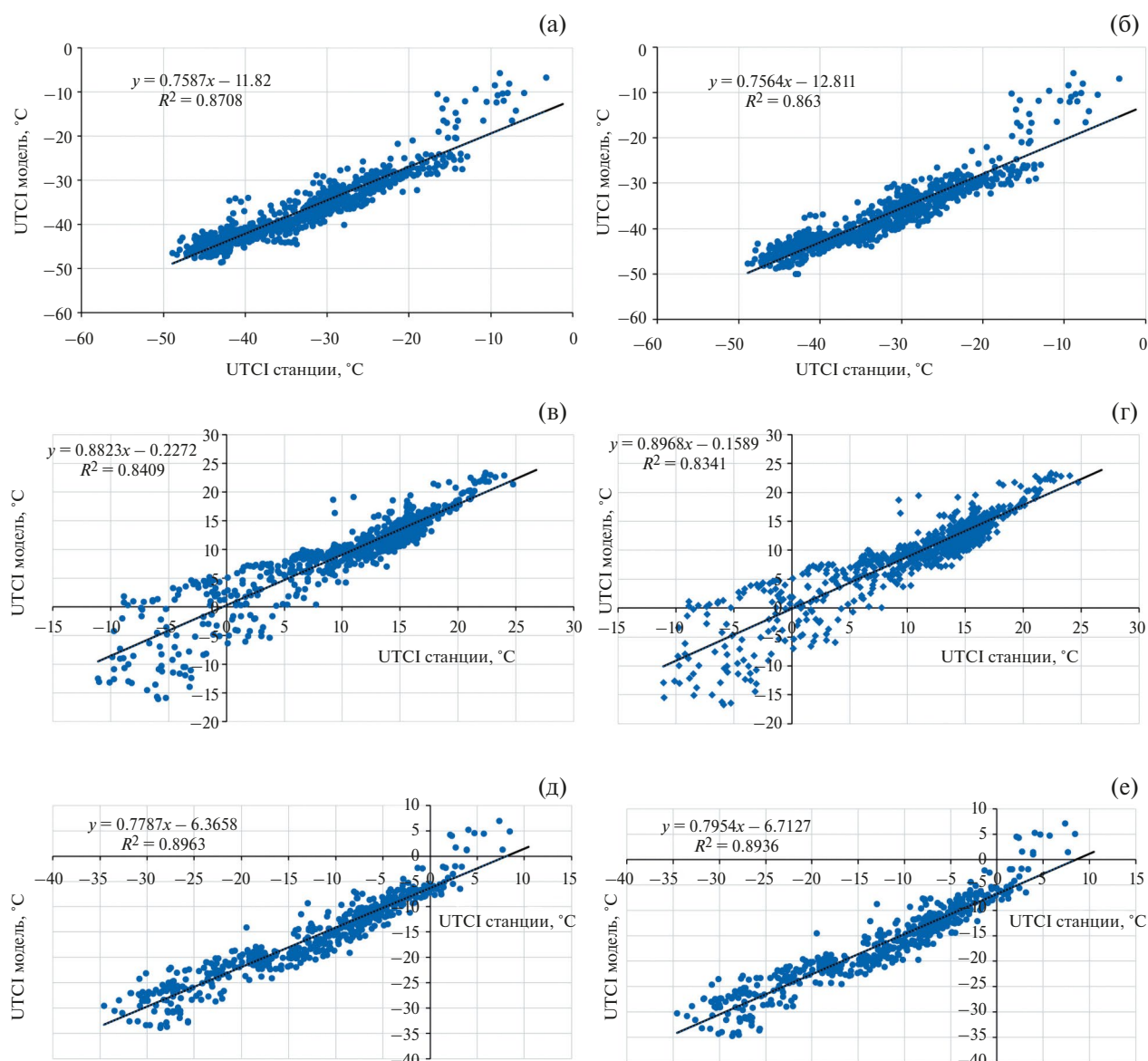


Рис. 1. Зависимость значений UTCI по станционным данным (по горизонтали) и по модельным данным (по вертикали) за период 2015–2022 гг. для: января (а, б); июля (в, г); года (д, е) и сценариев SSP1-2.6 (а, в, д) и SSP5-8.5 (б, г, е).

Поэтому при анализе индекса UTCI, полученного на основании данных модельных расчетов, надо учитывать возможное занижение значений индекса UTCI, но в целом использование модельных данных для расчета UTCI допустимо с некоторыми ограничениями.

Были рассчитаны среднемесячные значения индекса за весь период. По осредненным для трех моделей значениям индекса построены карты распределения UTCI для зимних (январь) и летних (июль) условий. Проведена оценка и доли дней с тепловым и холодным стрессом на территории России в условиях будущего климата (2040–2059 гг.). Для каждой модели оценивалась также средняя за период продолжительность различных градаций индекса теплового комфорта для широтных и долготных секторов на территории России.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как было показано в работе (Vinogradova, 2021), на территории России может наблюдаться большинство градаций универсального термического климатического индекса (UTCI), а точнее, все градации холодного стресса и почти все теплового. Для будущего климата (2040–2059 гг.) были построены карты январских и июльских значений индекса (рис. 2). В январе по обоим сценариям на всей территории России будет наблюдаться холодный стресс различных градаций (см. рис. 2а, б). На значительной территории будет преобладать экстремальный холодный стресс. Эта зона может занимать север и северо-восток страны от Ямала до севера Чукотки (Grigorieva et al., 2023), расширяясь на юг (приблизительно до 65° с. ш.) в Якутии по сценарию SSP1-2.6 (см. рис. 2а). По сценарию SSP5-8.5 область экстремального холодного стресса сокращается, особенно в западной части Сибири (см. рис. 2б). Очень сильный холодный стресс будет отмечаться на севере ЕТР, на Урале, в азиатской части страны, кроме юга Западной и Центральной Сибири (за исключением горного Алтая) и южной половины Камчатки. На большей части ЕТР, на юге Сибири и Камчатки зимние условия по индексу UTCI будут охарактеризоваться как сильный холодный стресс (см. рис. 2а). По сценарию SSP5-8.5 область очень сильного холодного стресса сокращается на северо-западе ЕТР (см. рис. 2б). Те же выводы приводятся в работах (Antonescu et al., 2021; Founda et al., 2019), где отмечается, что в городах Северной Европы наблюдается снижение частоты холодного стресса.

Летом (июль) для обоих сценариев индекс UTCI будет представлен градациями: от слабого холодного стресса — на побережье Северного Ледовитого океана до градации “нет теплового

стресса” и комфорт — на юге ЕТР (см. рис. 2в, г). Для сценария SSP5-8.5 на юге ЕТР может появиться область умеренного теплового стресса для среднесуточных значений UTCI (см. рис. 2г). На большей части территории России преобладают условия отсутствия теплового стресса, включая комфорт. Область комфорта будет расширяться по сценарию SSP5-8.5 (по сравнению со сценарием SSP1-2.6) на юге ЕТР, Сибири и в центре Якутии. При этом надо отметить, что на юге ЕТР в дневные часы могут наблюдаться условия умеренного теплового стресса, особенно учитывая, что значения UTCI, рассчитанные по модельным данным, могут быть занижены по сравнению со стационарными. Такие же тенденции отмечаются в работе (Guerreiro et al., 2018), где показано, что периоды сильной жары будут более частыми и интенсивными в будущем для южных городов, а в городах Центральной Европы будет увеличиваться максимальная температура во время волн тепла.

По ансамблю моделей в условиях будущего климата (2040–2059 гг.) определена доля дней с благоприятными условиями (градация “нет теплового стресса”) и неблагоприятным тепловым воздействием (жара или холод) для двух рассматриваемых сценариев. На рис. 3 для сценария SSP1-2.6 показана средняя за период 2040–2059 гг. доля дней с UTCI ниже –13°C, что соответствует экстремальному, очень сильному и сильному холодному напряжению (см. рис. 3а), с UTCI от 9 до 26°C (градация “нет теплового стресса”) (см. рис. 3б), с UTCI от 18 до 26°C — зона комфорта (см. рис. 3в) и выше 26°C, что относится к умеренному, сильному и очень сильному тепловому стрессу (см. рис. 3г). Как и в современном климате (Vinogradova, 2021), условия сильного холодного напряжения будут чаще встречаться и занимать большие площади на территории России. Граница территорий, где сильное холодное напряжение может наблюдаться более 50% дней проходит приблизительно вдоль 65° с. ш. на ЕТР, продвигаясь до 60° с. ш. в Сибири и до 55° с. ш. в Забайкалье и на Дальнем Востоке. На ЕТР число очень холодных дней будет составлять на севере порядка 40–55%, в центральных областях — 30–40%, а на самом юге — менее 10%. Число дней с сильным холодным напряжением увеличивается с юго-запада на северо-восток. На азиатской территории, южнее 60° с. ш. можно ожидать примерно 30–45% дней с сильным холодным напряжением (см. рис. 3а).

По сценарию SSP5-8.5 (рис. 4а) число дней с сильным холодным напряжением будет сокращаться на всей территории России в среднем на 5–10 п.п. Наибольшее улучшение условий можно ожидать на западе и юго-западе ЕТР и на юге Сибири и Дальнего Востока.

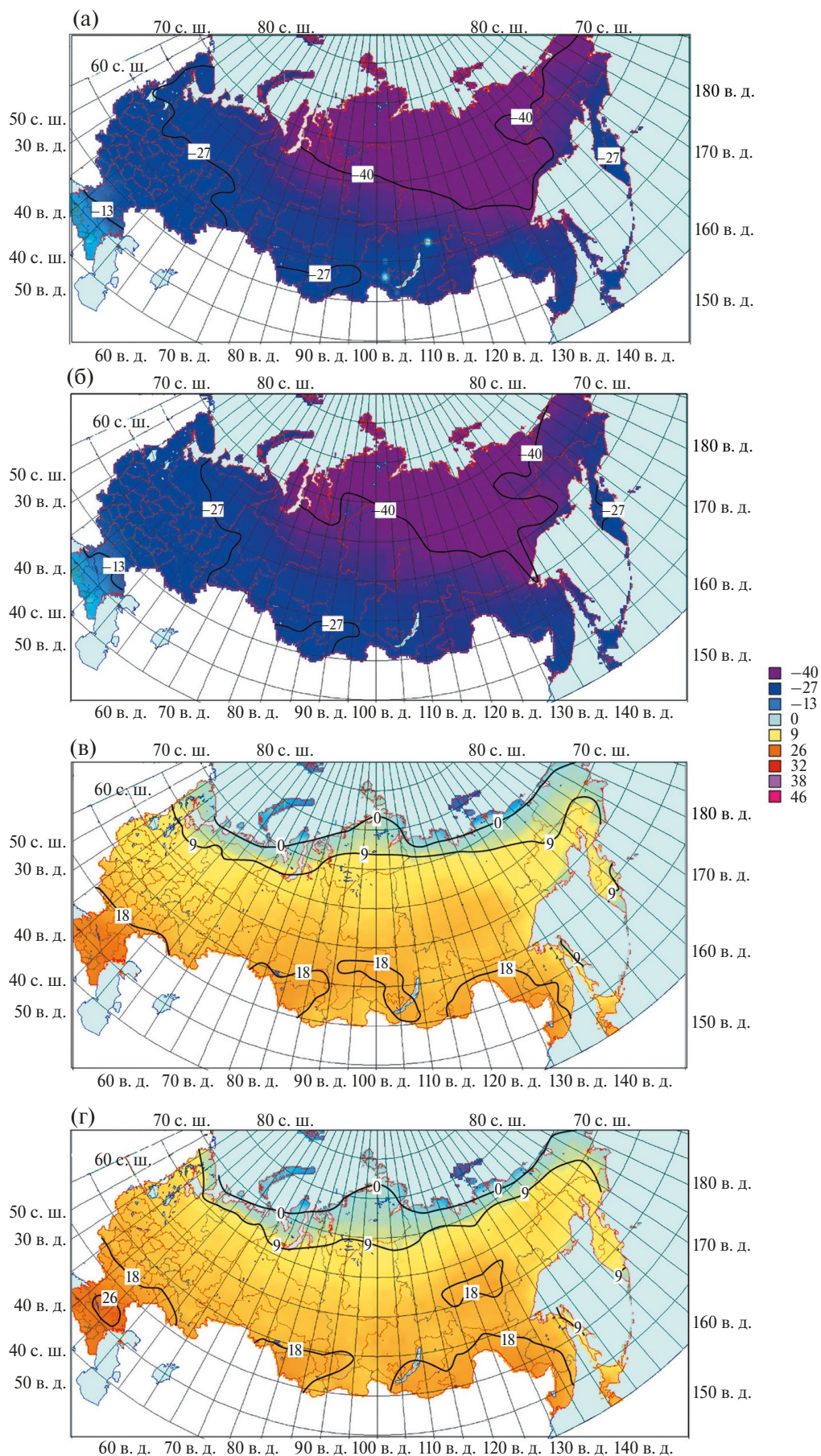


Рис. 2. Средние значения УТСИ по ансамблю моделей в январе (а, б) и июле (в, г) по сценариям SSP1-2.6 (а, в) и SSP5-8.5 (б, г) за период 2040–2059 гг.

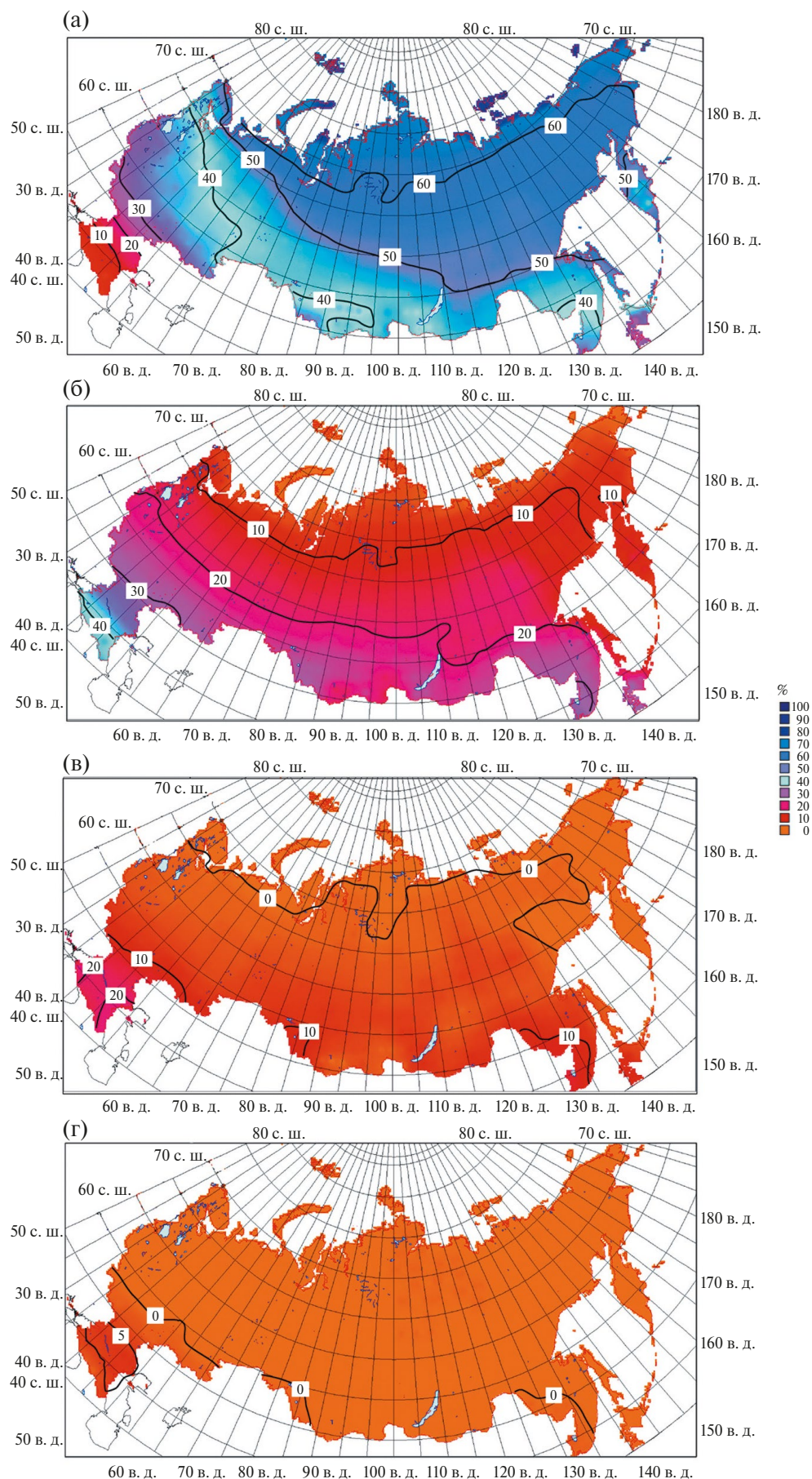


Рис. 3. Средняя за период 2040–2059 гг. доля дней с UTCI: ниже -13°C (а), от 9 до 26°C (б), от 18 до 26°C (в) и выше 26°C (г) (сценарий SSP1-2.6).

По сценарию SSP1-2.6 для среднесуточных значений UTCI условия теплового стресса значительно реже встречаются на территории России. Южнее 50° с. ш. такие условия отмечаются менее, чем в 10% дней, а полосе 50° – 53° с. ш. на европейской территории и на юге Дальнего Востока число таких дней может составлять 1–2% (см. рис. 3г), хотя, как говорилось выше, значения UTCI, рассчитанные по модельным данным, могут быть немного занижены, и условия теплового стресса могут быть продолжительнее. Для “жесткого” сценария SSP5-8.5 можно ожидать рост тепловых нагрузок, что также отмечается в работах (Guerreiro et al., 2018; Katavoutas et al., 2022). На значительной территории южнее 60° с. ш. на ЕТР и 65° с. ш. в Восточной Сибири и Якутии число дней с тепловым стрессом для среднесуточных значений в середине века может составить 1–2%, т.е. около недели. При этом в дневные часы тепловые нагрузки могут быть сильнее и продолжительнее (Vinogradova, 2021). Южнее 50° с. ш. на ЕТР условия теплового стресса будут наблюдаться до 12% дней, т.е. около полутора месяцев. На юге Дальнего Востока число дней с тепловым стрессом увеличится до 3–4% (рис. 4г).

По “мягкому” сценарию биоклиматические условия, соответствующие градации UTCI “нет теплового стресса” на большей части территории России в середине века будут наблюдаться от 15 до 30% дней, уменьшаясь до 3–5% дней на побережье Северного Ледовитого океана (см. рис. 3б). Григорьева с соавторами (Grigorieva et al., 2023) отмечают увеличение комфортного диапазона на Чукотке за счет снижения категорий экстремально холодного стресса по шкале UTCI. На юге ЕТР число благоприятных дней может увеличиться до 45%. По сценарию SSP5-8.5 число дней без термического стресса увеличивается по всей территории России на 1–3 п.п. (рис. 4б). Среди дней с отсутствием теплового стресса доля комфортных дней со значениями UTCI от 18 до 26°C по обоим сценариям будет увеличиваться с севера на юг от 0 на побережье Северного Ледовитого океана до 20% на юге ЕТР (см. рис. 3в, 4в). Более 10% комфортных дней в будущем может отмечаться на юге Сибири и в Приморском крае.

На рис. 5 показана средняя за период продолжительность различных градаций универсального термического климатического индекса для широтных и долготных секторов на территории России. В широтной зоне 60° – 70° с. ш. на ЕТР в середине XXI в. значительных изменений продолжительности различных градаций UTCI не ожидается (см. рис. 5а). По сценарию SSP5-8.5 биоклиматические условия будут практически соответствовать современным, но появляется менее 1% дней с градацией “комфорт”. По сценарию SSP1-2.6 условия ожидаются немного хуже современных за счет

увеличения продолжительности градации “сильный холодный стресс” (см. рис. 5а). В Западной Сибири можно ожидать уменьшение числа дней с экстремальным и очень сильным холодным стрессом (причем для сценария SSP5-8.5 более значительное) и появление небольшого числа дней с градацией “комфорт”. В Восточной Сибири ожидается увеличение продолжительности экстремально холодного стресса до 9% по сценарию SSP1-2.6 и до 6% по сценарию SSP5-8.5 и некоторое сокращение числа дней без термического стресса по сравнению с современным климатом. В дальневосточных секторах в середине века по обоим сценариям можно ожидать последовательное уменьшение доли дней с более суровыми градациями и увеличение доли дней с градацией “нет термического стресса”.

Южнее, в широтной зоне 50° – 60° с. ш. (см. рис. 5б) на ЕТР можно ожидать некоторое ухудшение биоклиматических условий по сравнению с современным климатом. Возможно, увеличение на 3–5 п.п. числа дней с очень сильным холодным стрессом и сокращение на ту же величину продолжительности периода с градацией UTCI “нет термического стресса”. Похожая ситуация возможна в Западной и Восточной Сибири, но здесь в середине века будет от 3 до 5% комфортных дней. На Дальнем Востоке в середине XXI в. по обоим сценариям можно ожидать ухудшение условий, сравнимое с периодом 1961–1990 гг. Здесь вновь могут наблюдаться дни (4% и 3%) с экстремальным холодным стрессом, но в то же время немного увеличится число комфортных дней (см. рис. 5б).

В широтной зоне 40° – 50° с. ш. (см. рис. 5в) в середине века на ЕТР биоклиматические условия, возможно, будут не очень сильно отличаться от современных. Можно ожидать постепенного сокращения продолжительности градаций UTCI, связанных с холодом, и увеличения числа дней с отсутствием термического стресса и комфортом. По сравнению с современным климатом появляются дни с умеренным тепловым стрессом, а для сценария SSP5-8.5 и с сильным тепловым стрессом (см. рис. 5в). В Восточной Сибири (90° – 120° в.д.) в будущем климате также сокращается продолжительность холодного стресса, почти до 30% дней увеличивается продолжительность градации “нет термического стресса”, а зона комфорта достигает 7% и 10% дней для сценариев SSP1-2.6 и SSP5-8.5 соответственно. Для Дальнего Востока по обоим сценариям биоклиматические условия будут не сильно отличаться от современных. Возможно некоторое увеличение продолжительности градаций “нет термического стресса” и комфорт, а для сценария SSP5-8.5 — появление небольшого числа дней с градацией “умеренный тепловой стресс”.

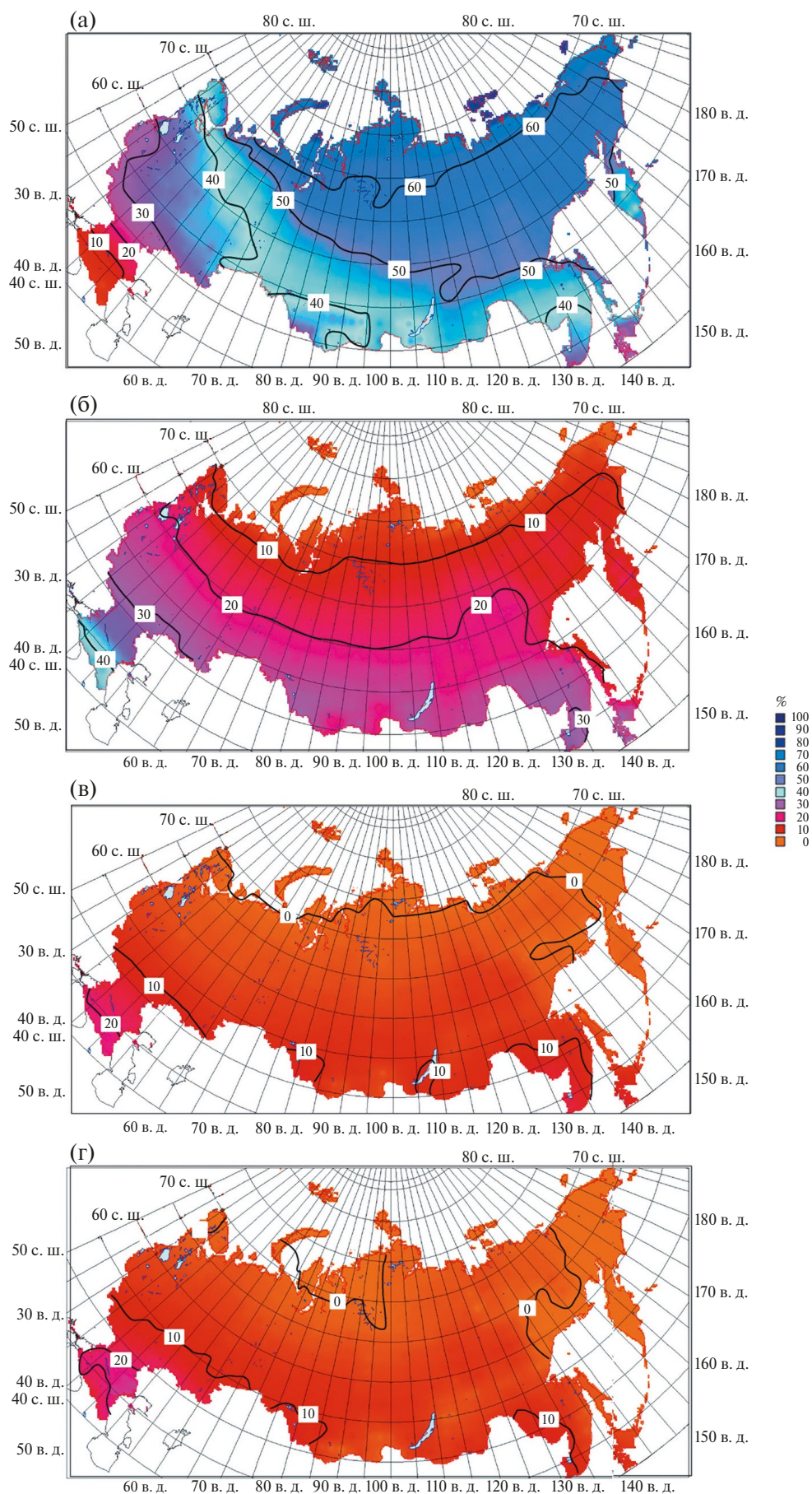


Рис. 4. Средняя за период 2040–2059 гг. доля дней с UTCI: ниже -13°C (а), от 9 до 26°C (б), от 18 до 26°C (в) и выше 26°C (г) (сценарий SSP5-8.5).

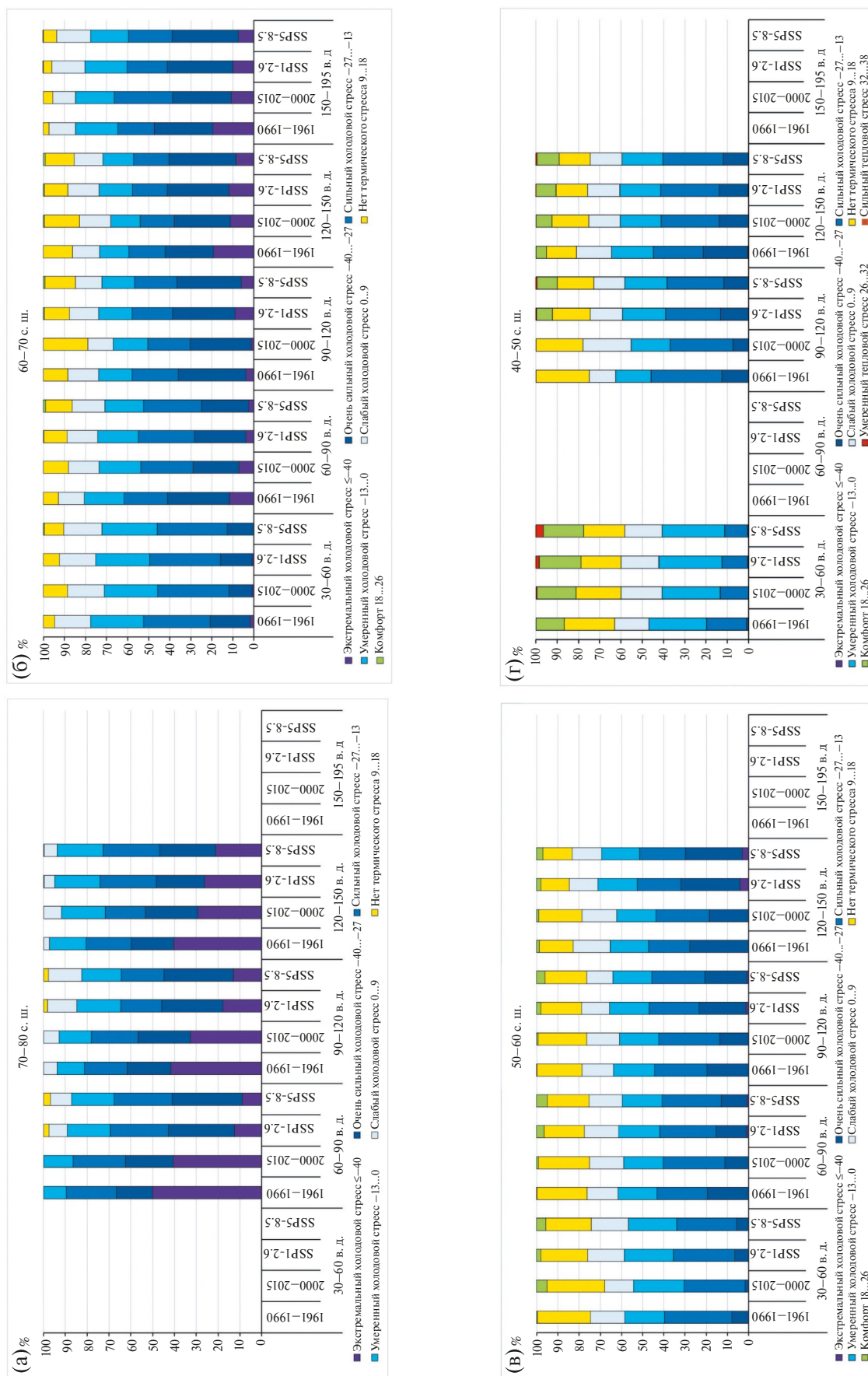


Рис. 5. Продолжительность градаций универсального термического климатического индекса для среднесезонного периода (1961–1990 гг.) и периодов 2000–2022 гг. (по данным метеосети) и 2040–2059 гг. для сценариев SSP1-2.6 и SSP5-8.5 (по модельным данным). Широтные зоны: 60°–70° с.ш. (а), 50°–60° с.ш. (б), 40°–50° с.ш. (в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях продолжающегося потепления климата для обоих сценариев будет заметна тенденция сокращения дней с сильным холодным стрессом, особенно в северных и арктических регионах. В то же время будет увеличиваться число дней с тепловым стрессом на ЕТР южнее 50° с. ш. и на юге и в центре Сибири, более заметное для сценария SSP5-8.5. Эти разнонаправленные тенденции могут способствовать улучшению биоклимата в регионах с неблагоприятными биоклиматическими условиями на севере и востоке страны и ухудшению условий в наиболее благоприятных регионах на юге, за счет роста числа дней с тепловым стрессом. В середине XXI в. (2040–2059 гг.) число дней с градацией UTCI “нет теплового стресса”, включающей градацию “комфорт” будет увеличиваться на большей части территории России и сокращается южнее 50° с. ш. за счет увеличения тепловой нагрузки, особенно по сценарию SSP5-8.5. Различия биоклиматических условий на территории России в середине XXI в. по двум сценариями не очень велики и, в основном, связаны с увеличением теплового стресса на юге страны по сценарию SSP5-8.5. Также надо учитывать, что значения UTCI, полученные по данным моделей, оказались немного занижены по сравнению со стационарными данными, поэтому уменьшение холодной нагрузки на севере и в центре страны и увеличение тепловой нагрузки на юге может быть немного больше.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена по теме Государственного задания № FMWS-2024-0001, 1021051403088-5 “Изменения климата, их причины и последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России”.

FUNDUNG

The work was prepared within the framework of the state task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0001, 1021051403088-5 “Climate changes, their causes and consequences for the environment and the life of the population in Russia.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградова В.В. Универсальный индекс теплового комфорта на территории России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 2. С. 3–19.
- Володин Е.М., Мортиков Е.В., Кострыкин С.В., Галин Б.Я., Лыкозов В.Н., Грищун А.С., Дианский Н.А., Гусев А.В., Яковлев Н.Г. Воспроизведение современного климата в новой версии модели климатической системы ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 164–178.
- Третий оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. Росгидромет. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.
- Antonescu B., Mărmureanu L., Vasilescu J., Marin C., Andrei S., Boldeanu M., Ene D., Țilea A. A 41-year bioclimatology of thermal stress in Europe // Int. J. Climatol. 2021. Vol. 41. P. 3934–3952. <https://doi.org/10.1002/joc.7051>
- Błażejczyk K., Błażejczyk A. Assessment of bioclimatic variability on regional and local scales in central Europe using UTCI // Sci. Annals Alexandru Ioan Cuza Univ. IAȘI Geogr. Ser. 2014. Vol. 60. № 1. P. 67–82.
- Błażejczyk K., Kunert A. Bioclimatic principles of recreation and tourism in Poland. 2nd ed. Monografie 13 (In Polish). Warszawa: IGI PAN, 2011. 366 p.
- Błażejczyk K., Broede P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Kunert A. Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale // Misc. Geogr. 2010. № 14. P. 91–102.
- Błażejczyk K., Jendritzky G., Bröde P., Fiala D., Havenith G., Epstein Y., Psikuta A., Kampmann B. An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI) // Geogr. Pol. 2013. Vol. 86. № 1. P. 5–10.
- Boko N.P., Vissin E., Houssou S., Błażejczyk K. Application de l'indice universel de charge thermique dans le contexte africain: exemple de Cotonou (republique du Benin) // XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie. 2013. P. 105–109. <https://www.researchgate.net/publication/273121602>
- Bröde P., Jendritzky G., Fiala D., Havenith G. The universal thermal climate index UTCI in operational use. Proceedings of conference: adapting to change: new thinking on comfort Cumberland Lodge, Windsor, UK, 9–11 April 2010. 2010.
- Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., et al. Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI) // Int. J. Biometeorol. 2012. Vol. 56. № 3. P. 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1> <https://doi.org/10.24381/cds.c866074c> (accessed on February 2023).
- De Freitas C.R., Grigorieva E.A. A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices // Int. J. Biometeorol. 2017. Vol. 61. P. 487–512. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1228-6>
- Di Napoli C., Pappenberger F., Cloke H.L. Assessing heatrelated health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI) // Int. J. Biometeorol. 2018. Vol. 62. P. 1155–1165. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>

- Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G.* UTCI Fiala multinode model human heat transfer and thermal comfort // *Int. J. Biometeorol.* 2012. Vol. 56. P. 429–441.
- Founda D., Pierros F., Katavoutas G., Keramitsoglou I.* Observed trends in thermal stress at European cities with different background climates // *Atmosphere.* 2019. № 10. P. 436.
<https://doi.org/10.3390/atmos10080436>
- Grigorieva E.A., Alexeev V.A., Walsh J.E.* Universal thermal climate index in the Arctic in an era of climate change: Alaska and Chukotka as a case study // *Int. J. Biometeorol.* 2023. Vol. 67. P. 1703–1721.
<https://doi.org/10.1007/s00484-023-02531-2>
- Guerreiro S.B., Dawson R.J., Kilsby C., Lewis E., Ford A.* Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities // *Environ. Res. Lett.* 2018. № 13. P. 034009.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>
- Havenith G., Fiala D., Błażejczyk K., Richards M., Bröde P., Holmér I., Rintamäki H., Benshabat Y., Jendritzky G.* The UTCI-clothing model // *Int. J. Biometeorol.* 2012. Vol. 56. P. 461–470.
<https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>
- IPCC. Summary for Policymakers. In: *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 and B. Zhou (Eds.). Cambridge, United Kingdom and NY, USA: Cambridge Univ. Press, 2021. P. 3–32.
- Jendritzky G., De Dear R., Havenith G.* UTCI – why another thermal index? // *Int. J. Biometeorol.* 2012. Vol. 56. № 3. P. 421–428.
- Katavoutas G., Founda D., Varotsos K.V., Giannakopoulos Ch.* Climate change impacts on thermal stress in four climatically diverse European cities // *Int. J. Biometeorol.* 2022. Vol. 66. P. 2339–2355.
<https://doi.org/10.1007/s00484-022-02361-8>
- Mauritsen T., Roeckner E.* Tuning the MPI-ESM1.2 Global Climate Model to Improve the Match With Instrumental Record Warming by Lowering Its Climate Sensitivity // *JAMES.* 2020. Vol. 12. № 5. Art. e2019MS002037.
<https://doi.org/10.1029/2019MS002037>
- Pappenberger F., Hannah L.C.* Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI) // *Int. J. Biometeorol.* 2018. Vol. 62. P. 1155–1165.
<https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>
- Pappenberger F., Jendritzky G., Staiger H., Dutra E., Di Giuseppe F., Richardson D.S., et al.* Global forecasting of thermal health hazards: The skill of probabilistic predictions of the Universal Thermal Climate Index (UTCI) // *Int. J. Biometeorol.* 2015. Vol. 59. № 3. P. 311–323.
<http://doi.org/10.1007/s00484-014-0843-3>
- Vinogradova V.V.* Using the Universal Thermal Climate Index (UTCI) for the assessment of bioclimatic conditions in Russia // *Int. J. Biometeorol.* 2021. Vol. 65 P. 1473–1483.
<https://doi.org/10.1007/s00484-020-01901-4>
- Staiger H., Laschewski G., Matzarakis A.* Selection of Appropriate Thermal Indices for Applications in Human Biometeorological Studies // *Atmosphere.* 2019. № 10. P. 18.
<https://doi.org/10.3390/atmos10010018>
- Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being / Final Report COST Action 730 / G. Jendritzky, G. Havenith, P. Weihs, E. Batchvarova (Eds.). Brussel, 2009.
- Williams K.D., Copsey D., Blockley E.W., Bodas-Salcedo A., Calvert D., Comer R., Davis P., Graham T., Hewitt H.T., Hill R., Hyder P., Ineson S., et al.* The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations // *JAMES.* 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017MS001115>
- WMO, 2021: State of the Global Climate 2020 // WMO. 2021. № 1264. 56 p. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618

Universal Thermal Climate Index (UTCI) in the Middle of the 21st Century According to Model Forecasts

V. V. Vinogradova*

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

*e-mail: vvvinog@yandex.ru

The Universal Thermal Climate Index (UTCI) was used to assess the bioclimatic conditions on the territory of Russia in the middle of the 21st century. Seasonal and regional features of the UTCI were studied under future climate conditions (2040–2059), for “soft” (SSP1-2.6) and “hard” (SSP5-8.5) scenarios. The BioKlima 2.6 software package was used to calculate average daily UTCI values. Daily data from three models participating in CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) were used for the calculation: the Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, the Met Office Hadley Centre and the Max Planck Institute for Meteorology. Cold stress conditions will continue to prevail on the territory of Russia under the future climate conditions for both scenarios. In winter (January), cold stress of various gradations will be observed in almost the whole territory. In summer (July), conditions without heat stress will be observed in most of Russia, and comfort in the south. The assessment of possible future changes in bioclimatic conditions in Russia in the middle of the 21st century (2040–2059) showed that for both scenarios there will be a noticeable trend towards a reduction in the number of days with severe cold stress and an increase in the number of days with heat stress in the south of the European territory and in the south and in center of Siberia, especially according to the SSP5-8.5 scenario. The percentage of days with the UTCI “no heat stress” gradation will increase over most of Russia. The emerging trends will contribute to the improvement of the bioclimate in the regions with the worst conditions, in the north and east of the country, and to the deterioration of conditions in the most favorable regions in the south, due to an increase in the number of days with heat stress.

Keywords: Universal Thermal Climate Index (UTCI), cold stress, heat loads, thermal comfort, model forecasts, climate change scenarios

REFERENCES

- Antonescu B., Mărmureanu L., Vasilescu J., Marin C., Andrei S., Boldeanu M., Ene D., Țilea A. A 41-year bioclimatology of thermal stress in Europe. *Int. J. Climatol.*, 2021, vol. 41, pp. 3934–3952.
- Błażejczyk K., Błażejczyk A. Assessment of bioclimatic variability on regional and local scales in central Europe using UTCI. *Sci. Annals Alexandru Ioan Cuza Univ. Iași Geogr. Ser.*, 2014, vol. 60, no. 1, pp. 67–82.
- Błażejczyk K., Kunert A. *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce* [Bioclimatic Principles of Recreation and Tourism in Poland]. Warszawa: IGiPZ PAN, 2011. 366 p.
- Błażejczyk K., Broede P., Fiala D., Havenith G., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Kunert A. Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale. *Misc. Geogr.*, 2010, no. 14, pp. 91–102.
- Błażejczyk K., Jendritzky G., Bröde P., Fiala D., Havenith G., Epstein Y., Psikuta A., Kampmann B. An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geogr. Pol.*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 5–10.
- Boko N.P., Vissin E., Houssou S., Błażejczyk K. Application de l'indice universel de charge thermique dans le contexte africain: exemple de Cotonou (republique du Benin). In *XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 2013, pp. 105–109. (In French).
- Bröde P., Jendritzky G., Fiala D., Havenith G. The universal thermal climate index UTCI in operational use. In *Proc. of conference. Adapting to change: New thinking on comfort*. Cumberland Lodge, Windsor, 2010.
- Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., et al. Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI). *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- de Freitas C.R., Grigorieva E.A. A comparison and appraisal of a comprehensive range of human thermal climate indices. *Int. J. Biometeorol.*, 2017, vol. 61, pp. 487–512. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1228-6>
- di Napoli C., Pappenberger F., Cloke H.L. Assessing heatrelated health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int. J. Biometeorol.*, 2018, vol. 62, pp. 1155–1165. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>
- Fiala D., Havenith G., Bröde P., Kampmann B., Jendritzky G. UTCI Fiala multinode model human

- heat transfer and thermal comfort. *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, pp. 429–441.
- Founda D., Pierros F., Katavoutas G., Keramitsoglou I. Observed trends in thermal stress at European cities with different background climates. *Atmosphere*, 2019, vol. 10, no. 8, art. 436.
<https://doi.org/10.3390/atmos10080436>
- Grigorieva E.A., Alexeev V.A., Walsh J.E. Universal thermal climate index in the Arctic in an era of climate change: Alaska and Chukotka as a case study. *Int. J. Biometeorol.*, 2023, vol. 67, pp. 1703–1721.
<https://doi.org/10.1007/s00484-023-02531-2>
- Guerreiro S.B., Dawson R.J., Kilsby C., Lewis E., Ford A. Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environ. Res. Lett.*, 2018, vol. 13, art. 034009.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3>
- Havenith G., Fiala D., Błazejczyk K., Richards M., Bröde P., Holmér I., Rintamäki H., Benschabat Y., Jendritzky G. The UTCI-clothing model. *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, pp. 461–470.
<https://doi.org/10.1007/s00484-011-0451-4>
- IPCC 2021. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B., Eds. Cambridge, New York: CUP, 2021, pp. 3–32.
- Jendritzky G., de Dear R., Havenith G. UTCI – why another thermal index? *Int. J. Biometeorol.*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 421–428.
- Katavoutas G., Founda D., Varotsos K.V., Giannakopoulos Ch. Climate change impacts on thermal stress in four climatically diverse European cities. *Int. J. Biometeorol.*, 2022, vol. 66, pp. 2339–2355.
<https://doi.org/10.1007/s00484-022-02361-8>
- Mauritsen T., Roeckner E. Tuning the MPI-ESM1.2 Global Climate Model to improve the match with instrumental record warming by lowering its climate sensitivity. *JAMES*, 2020, vol. 12, no. 5, art. e2019MS002037.
<https://doi.org/10.1029/2019MS002037>
- Pappenberger F., Hannah L.C. Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int. J. Biometeorol.*, 2018, vol. 62, pp. 1155–1165.
<https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>
- Pappenberger F., Jendritzky G., Staiger H., Dutra E., di Giuseppe F., Richardson D.S., et al. Global forecasting of thermal health hazards: The skill of probabilistic predictions of the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int. J. Biometeorol.*, 2015, vol. 59, no. 3, pp. 311–323.
<http://doi.org/10.1007/s00484-014-0843-3>
- Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being*. Final Report COSTAction 730. Jendritzky G., Havenith G., Weihs P., Batchvarova E., Eds. Brussel, 2009.
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. St. Petersburg: Naukoemkieologii Publ., 2022. 676 p.
- Vinogradova V.V. Universal index of thermal comfort on the territory of Russia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2019, no. 2, pp. 3–19. (In Russ.).
- Vinogradova V.V. Using the Universal Thermal Climate Index (UTCI) for the assessment of bioclimatic conditions in Russia. *Int. J. Biometeorol.*, 2021, vol. 65, pp. 1473–1483.
<https://doi.org/10.1007/s00484-020-01901-4>
- Volodin E.M., Mortikov E.V., Kostykin S.V., Galin B.Ya., Lykosov V.N., Gritsun A.S., Diansky N.A., Gusev A.V., Yakovlev N.G. Reproduction of modern climate in a new version of the climate system model of the INM RAS. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fizika Atm. Okeana*, 2017, vol. 53, no. 2, pp. 164–178. (In Russ.).
- Staiger H., Laschewski G., Matzarakis A. Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies. *Atmosphere*, 2019, vol. 10, pp. 18.
<https://doi.org/10.3390/atmos10010018>
- Williams K.D., Copsey D., Blockley E.W., Bodas-Salcedo A., Calvert D., Comer R., Davis P., Graham T., Hewitt H.T., Hill R., Hyder P., Ineson S., et al. The Met Office Global Coupled Model 3.0 and 3.1 (GC3.0 and GC3.1) Configurations. *JAMES*, 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017MS001115>
- WMO. *State of the Global Climate 2020 WMO. No. 1264*. WMO, 2021. 56 p.