

УДК: 551.581.2+551.583

М. И. Захаров¹, Н. И. Тананаев^{2,3}

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-1-31-431-444

ОЦЕНКА БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН КЁППЕНА-ГЕЙГЕРА В ЯКУТИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГИОНАЛЬНО-АДАПТИРОВАННОГО АНСАМБЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СМIP6

АННОТАЦИЯ

Для картографирования пространственной изменчивости климатических условий широко используется классификация климата Кёппена-Гейгера. Статья посвящена оценке будущих изменений положения климатических зон Кёппена-Гейгера на территории Якутии по четырем сценариям социально-экономического развития ИРСС (ssp1–2.6, ssp2–4.5, ssp3–7.0 и ssp5–8.5). В работе использованы данные ансамбля глобальных климатических моделей проекта СМIP6, в состав которого вошли модели, наилучшим образом воспроизводящие климатические условия региона (CESM2-WACCM, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1-HR, INM-CM5-0, MPI-ESM1-2-HR). Использованы осредненные данные о среднемесячной температуре воздуха и сумме осадков для периодов 2021–2050, 2051–2080 и 2071–2100 гг. Эти данные получены как сумма исторической климатической нормы 1981–2010 гг., определенной по реанализам GHCN-CAMS (температура воздуха) и CRU TS v.4.05 (осадки), и приращений соответствующих климатических переменных между историческим и прогнозным периодами, оцененных по данным модельного ансамбля. Карты климатических зон Кёппена-Гейгера построены для указанных временных срезов в пространственном разрешении 0,5°. Согласно полученным оценкам, наиболее распространенная зона субарктического климата (Dfc) будет увеличивать свою долю на территории Якутии за счет зон экстремально холодных климатов (Dfd и Dwd), а также климата полярных тундр (ET), а полярная тундра к концу столетия может быть вытеснена с материковой части. Анализ сдвигов климата по населенным пунктам указывает на переход с экстремально холодного климата практически во всех районных центрах Якутии вне зависимости от сценариев. При неблагоприятных сценариях ssp3–7.0 и ssp5–8.5 среднетаежные ландшафты и все районные центры центральной группы районов ко второй половине столетия окажутся в условиях субарктического климата с жарким летом. В этих условиях будут усиливаться пожароопасность лесов, засушливость почвы и деградация криолитозоны. Данное исследование вносит вклад в понимание климатических изменений будущего в регионе, полученные картографические материалы способствуют повышению осведомленности общества и обеспечивают информированную разработку регионального плана адаптации к изменениям климата и других документов стратегического планирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карты климата, классификация климата, Кёппен-Гейгер, изменение климата, траектории SSP, Якутия

¹ Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, ул. Кулаковского, д. 46, Якутск, Россия, 677007, e-mail: mi.zakharov@s-vfu.ru

² Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, ул. Кулаковского, д. 46, Якутск, Россия, 677007, e-mail: tanni@s-vfu.ru

³ Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, д. 36, Якутск, Россия, 677010, e-mail: tanni@s-vfu.ru

Moisei I. Zakharov⁴, Nikita I. Tananaev^{5,6}

ASSESSING FUTURE CHANGES OF KÖPPEN-GEIGER CLIMATE ZONES IN YAKUTIA USING CMIP6 REGIONAL ENSEMBLE

ABSTRACT

The Köppen-Geiger climate classification is widely used for mapping the spatial variability of climatic patterns. The paper is devoted to the assessment of future changes in the location of the Köppen-Geiger climate zones on the territory of Yakutia under four scenarios of socio-economic development of IPCC (ssp1–2.6, ssp2–4.5, ssp3–7.0 and ssp5–8.5). The data from the ensemble of global climate models of the CMIP6 project, which includes models that best reproduce the climatic conditions of the region (CESM2-WACCM, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1-HR, INM-CM5-0, MPI-ESM1-2-HR) were used. Averaged monthly mean air temperature and total precipitation data for the periods 2021–2050, 2051–2080, and 2071–2100 were used. Data have been obtained as the sum of the historical climatic norm 1981–2010 determined from the GHCN-CAMS reanalysis (air temperature) and CRU TS v.4.05 (precipitation), and the increments of the corresponding climatic variables between the historical and forecast periods estimated from the model ensemble data. Köppen-Geiger climate zone maps were constructed for the indicated time slices at a spatial resolution of 0.5°. According to the obtained estimates, the most widespread subarctic climate zone (Dfc) will increase its share on the territory of Yakutia at the expense of the zones of extremely cold climates (Dfd and Dwd), as well as the polar tundra climate (ET), and the polar tundra may be displaced from the continental part by the end of the century. Analysis of climate shifts by settlements indicates a transition from extremely cold climate in almost all district centers of Yakutia regardless of the scenarios. Under the unfavorable scenarios ssp3–7.0 and ssp5–8.5, the middle taiga landscapes and all district centers of the central group of districts will find themselves in subarctic climate with hot summers by the second half of the century. Under these conditions, forest fire hazard, soil aridity, and cryolithozone degradation will increase. This study contributes to the understanding of future climate change in the region, the resulting mapping materials contribute to public awareness and inform the development of the regional climate change adaptation plan and other strategic planning documents.

KEYWORDS: climate maps, climate classification, Köppen-Geiger, climate change, SSP projections, Yakutia

ВВЕДЕНИЕ

Потепление климата на территории Российской Федерации происходит вдвое быстрее, чем в целом над сушей, отмечается во все сезоны и сопровождается изменением других климатических переменных, прежде всего осадков. Ожидаемые в XXI в. изменения также превышают среднее глобальное потепление с выраженной динамикой зимних и летних термических режимов [Третий оценочный..., 2022]. Климатические изменения откликаются в функционировании и динамике мерзлотных ландшафтов [Горохов, Федоров, 2018]. Данный отклик выражен в смене гидрологических циклов, фазового состояния и термических параметров многолетнемерзлых грунтов, в усилении пространственной дифференциации засушливых и гумидных территорий.

⁴ North-Eastern Federal University, 46, Kulakovskogo str., Yakutsk, 677007, Russia,
e-mail: mi.zakharov@s-vfu.ru

⁵ North-Eastern Federal University, 46, Kulakovskogo str., Yakutsk, 677007, Russia, *e-mail: tanni@s-vfu.ru*

⁶ P. I. Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia,
e-mail: tanni@s-vfu.ru

Классификация климата является основным подходом к описанию многофакторных условий погодного режима регионов, привязываясь к циркуляции основных воздушных масс [Алисов, 1936], жизненным зонам [Holdridge, 1946], биомной организации [Köppen, 1884] и зональным ландшафтам [Берг, 1922]. В мировой практике для классификации глобального и регионального климата с использованием растровых покрытий приземной температуры и количества осадков преимущественно используется система выделения климатических зон, которая была разработана Владимиром Петровичем Кёппеном [Köppen, 1884] по пороговым значениям многолетних колебаний среднемесячных температур. Классификация в целом согласуется с распространением основных растительных формаций, где изначально выделялось пять поясов:

- тропический,
- субтропический,
- умеренный,
- холодный,
- полярный.

В дальнейшем классификация совершенствовалась, в т. ч. с появлением глобальных карт осадков. Законченную версию получила в труде Рудольфа Гейгера [Geiger, 1956]. Классификация Кёппена-Гейгера получила широкое распространение вследствие простоты подхода к определению климатических зон и возможности моделирования в ГИС-среде.

Классификация Кёппена-Гейгера выделяет пять основных типов климата, подразделяемых на 30 климатических зон [Peel et al., 2007] на основе форм растительности, наиболее распространенных в каждом регионе, что помогает определять региональные экосистемы и биомы. Первая цифровая модель климатических зон Кёппена-Гейгера была составлена группой зарубежных климатологов Университета Восточной Англии (CRU TS v.2.1) и немецкого Глобального центра климатологии осадков (VASClimO v1.1) на основе среднемесячных наборов данных климатических переменных на период 1950–2000 гг. [Kottek et al., 2006]. Последние глобальные карты климатических зон, современных (на период 1980–2016 гг.) по историческим данным наборов WorldClim, CHPclim и CHELSA и прогнозируемых, по сценарным прогнозам, CMIP5 (на период 2071–2100 гг.) в высоком однокилометровом разрешении были разработаны климатологами Университета Принстона и Швейцарского научно-исследовательского центра [Beck et al., 2018]. Отмечается, что используемые ансамблевые покрытия глобальных климатических зон, как современных, так и прогнозируемых, показывают низкую достоверность в высокоширотных регионах, где климатические данные имеют большую неопределенность. Не все модели одинаково эффективно воспроизводят изменение климата в региональном масштабе, поэтому в работе использован именно регионально-адаптированный ансамбль климатических моделей [Tananaev, 2024]. Для классификации климатических зон на региональном уровне принято использовать адаптированные ансамбли климатических моделей, как, например, было сделано для территорий Франции [Strohmenger et al., 2024], о. Калимантан [Sa'adi et al., 2024] и Юго-Восточной Азии [Hamed et al., 2023]. Классификация климатических зон чувствительна к переходам условий увлажнения и термического режима в летний сезон, что может быть использовано для оценки сдвигов сельскохозяйственных регионов [Andrade et al., 2024] и кумулятивного теплового и холодного стресса в городах [Wong et al., 2012]. Классификация используется в т. ч. и для восстановления климата прошлого. Так, на основе данных модели CCSM4 были картографированы климатические зоны климатического оптимума голоцена (6 тыс. л. н.) и последнего ледникового максимума (21 тыс. л. н.) [Yoo, Rohli, 2016].

Республика Саха (Якутия), как крупнейший по площади регион России, характеризуется зональным и высотным ландшафтным разнообразием (рис. 1а), вариациями субарктического климата (D) и значительной долей полярного климата (ET) (рис. 1б). Для территории Якутии были подобраны оптимальные климатические реанализы для среднегодовой температуры воздуха и суммы осадков на основе статистики ошибок и метрик пространственной корреляции. Реанализ GHCN-CAMS показал наилучшее воспроизведение пространственных закономерностей изменения температуры воздуха, полученных на основе данных наблюдений [Тананаев, 2023; Тананаев, Тимофеев, 2023]. Для количества осадков был реализован аналогичный подход, оптимальным реанализом был определен CRU TS v.4.05 [Тананаев, 2025]. На основе метрик пространственной корреляции данных глобальных климатических моделей CMIP6 с данными указанных реанализов были отобраны модели, наилучшим образом воспроизводящие климат региона, из которых был собран регионально-адаптированный ансамбль. В него вошли модели CESM2-WACCM, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1, INM-CM5-0, MPI-ESM1-2-HR, взвешенные по коэффициенту пространственной корреляции Пирсона между реанализом и модельными данными [Тананаев, 2024].

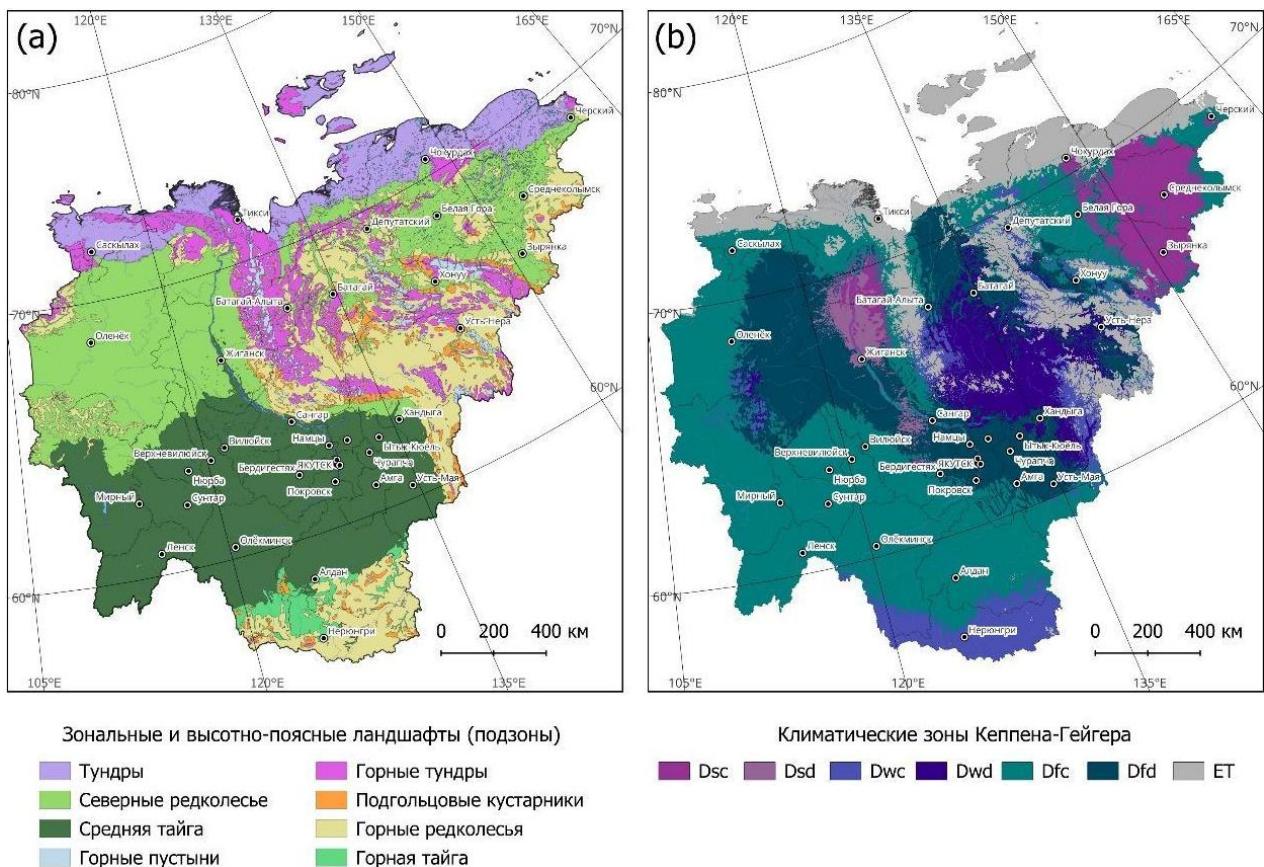


Рис. 1. Регион исследования — Республика Саха (Якутия): а) зональные ландшафты [Федоров, 1989]; б) климатические зоны Кёппена Гейгера на современный период 1980–2016 [Beck et al., 2018]

Fig. 1. The study region is the Sakha Republic (Yakutia): a) zonal landscapes [Fedorov, 1989]; б) high-resolution Köppen-Geiger climate zones for the present period 1980–2016 [Beck et al., 2018]

Цель данного исследования: составить прогнозные карты климатических зон Кёппена-Гейгера для территории Якутии с использованием регионального ансамбля глобальных климатических моделей и проанализировать предполагаемые сдвиги климатических зон по четырем сценарным прогнозам общих социально-экономических путей (SSP). Сценарий ssp1–2.6 предполагает путь стремления к устойчивому развитию со снижением выбросов диоксида углерода и стабилизацией роста температуры; ssp2–4.5 — сценарий, при котором сохраняется современный уровень выбросов диоксида углерода; ssp3–7.0 — сценарий пути усиления регионального соперничества в международном развитии с удвоением выбросов к концу XXI в.; ssp5–8.5 — сценарий ускоренного развития с удвоением выбросов к середине XXI в. [O'Neill, 2017].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы наборы данных о среднемесячной температуре воздуха и количестве осадков для территории Якутии из реанализов GHCN-CAMS и CRU TS v.4.05 за период 1981–2010 гг., имеющие пространственное разрешение 0,5 °С, и данные глобальных моделей CMIP6, входящих в регионально-адаптированный (далее — региональный) ансамбль климатических моделей (CESM2-WACCM, CMCC-ESM2, CNRM-CM6-1, INM-CM5-0, MPI-ESM1-2-HR) за периоды 1981–2010, 2021–2050, 2051–2080 и 2071–2100 гг. Пространственное разрешение климатических моделей — 100 км, кроме модели CNRM-CM6-1 (250 км). Обработка данных реанализа и моделей проводилась с помощью авторских скриптов на языке R, результаты обработки представлены в виде растров, поэтому термины «модельная ячейка» и «пиксель» используются в данной работе взаимозаменяемо. Растровые данные моделей были приведены к пространственному разрешению реанализа, что было необходимо для расчета будущих значений климатических переменных (ресамплинг по методу бикубического сплайна). Ансамблевые значения среднемесячных величин рассчитаны как средневзвешенное значение, где использованы весовые коэффициенты, численно равные коэффициенту пространственной корреляции Пирсона [Тананаев, 2024], по формуле (1):

$$E8 = (0.38 * A + 0.42 * B + 0.23 * C + 0.21 * D + 0.52 * E) / 1.76 \quad (1),$$

где

E8 — ансамблевая модель,

A — модель CESM2-WACCM,

B — модель CMCC-ESM2,

C — модель CNRM-CM6-1-HR,

D — модель INM-CM5-0,

E — модель MPI-ESM1-2-HR.

Для ускорения процесса создания набора данных использован графический модельер по инструментам GDAL в QGIS: калькулятор растра, деформация (warp) и обрезка по маске. Такой подход к формированию регионального ансамбля адекватен для наиболее точного описания изменения температуры и осадков [Тананаев, 2024]. Для создания набора прогнозных данных используется разница смоделированных данных и базового периода по реанализу. Для этого рассчитаны разницы смоделированных данных из ансамбля между базовым историческим периодом 1981–2010 гг. и интересующими нас периодами сценарного прогноза 2021–2050, 2051–2080 и 2071–2100 гг. Значения разницы прибавлены к значениям базового периода 1981–2010 гг. по температуре (реанализ GHCN-CAMS) и по осадкам (реанализ CRU TS v.4.05). Все наборы данных сохранены в системе

координат WGS84 с пространственным разрешением $0,5^\circ$, числом пикселей по широте 43 и по долготе 114, где для территории Якутии всего 4 902 пикселей.

Климатические зоны Кёппена-Гейгера определены с использованием функции *kgreclass()* в RStudio⁷. Предварительно растровые покрытия набора для каждого месяца загружены в виде стеков с использованием функции *stack()* пакета «*raster*». Полученные классификации сохранены через функцию *WriteRaster()* в том же охвате и разрешении, что и исходные наборы. Для территории Якутии характерно распространение зон холодного континентального климата (D) по классификации Кёппена-Гейгера, выделяемых там, где по крайней мере один месяц со средней температурой ниже 0°C и один месяц со средней температурой выше 10°C . Вариации первого порядка холодного континентального климата определяются осадками летнего и зимнего сезона (сухое лето (s), сухая зима (w) и без сухого сезона (f)). Вариации второго порядка выделяются температурными режимами лета и зимы (жаркое лето (a), теплое лето (b), холодное лето (c) и очень холодная зима (d)). Всего для холодного континентального климата можно выделить 12 климатических зон (табл. 1). Кроме того, для высокогорных областей и арктического побережья выделяется полярный климат (ET), к которому относятся территории с температурой самого теплого месяца ниже 10°C .

Табл. 1. Зоны Кёппена-Гейгера холодного континентального климата
Table 1. Köppen-Geiger zones of cold continental climate

Код	Название	Критерий выделения
Dsa	Континентальный климат с жарким и сухим летом	$P_{\text{лсух}} < 40$ и $P_{\text{лсух}} < P_{\text{звла}} / 3$; $T_{\text{июл}} \geq 22$ и $T_{\text{янв}} \leq 0$
Dsb	Континентальный климат с жарким и сухим летом	$P_{\text{лсух}} < 40$ и $P_{\text{лсух}} < P_{\text{звла}} / 3$; $T_{\text{мес10}} \geq 4$ и $T_{\text{янв}} \leq 0$; не Dsa
Dsc	Холодный субарктический с сухим летом	$P_{\text{лсух}} < 40$ и $P_{\text{лсух}} < P_{\text{звла}} / 3$; не Dsa, Dsb и Dsd
Dsd	Экстремально холодный субарктический с сухим летом	$P_{\text{лсух}} < 40$ и $P_{\text{лсух}} < P_{\text{звла}} / 3$; $T_{\text{янв}} < -38$
Dwa	Континентальный климат с жарким летом и сухой зимой	$P_{\text{звла}} < P_{\text{лвла}} / 10$; $T_{\text{июл}} \geq 22$ и $T_{\text{янв}} \leq 0$
Dwb	Континентальный климат с теплым летом и сухой зимой	$P_{\text{звла}} < P_{\text{лвла}} / 10$; $T_{\text{мес10}} \geq 4$ и $T_{\text{янв}} \leq 0$; не Dwa
Dwc	Холодный субарктический с сухой зимой	$P_{\text{звла}} < P_{\text{лвла}} / 10$; не Dwa, Dwb и Dwd
Dwd	Экстремально холодный субарктический с сухой зимой	$P_{\text{звла}} < P_{\text{лвла}} / 10$; $T_{\text{янв}} < -38$
Dfa	Континентальный с жарким летом	не $P_{\text{звла}} < P_{\text{лвла}} / 10$; не $P_{\text{лсух}} < 40$ и $P_{\text{лсух}} < P_{\text{звла}} / 3$; $T_{\text{июл}} \geq 22$ и $T_{\text{янв}} \leq 0$
Dfb	Континентальный с теплым летом	не $P_{\text{звла}} < P_{\text{лвла}} / 10$; не $P_{\text{лсух}} < 40$ и $P_{\text{лсух}} < P_{\text{звла}} / 3$; $T_{\text{мес10}} \geq 4$ и $T_{\text{янв}} \leq 0$; не Dfa
Dfc	Холодный субарктический	не $P_{\text{звла}} < P_{\text{лвла}} / 10$; не $P_{\text{лсух}} < 40$ и $P_{\text{лсух}} < P_{\text{звла}} / 3$; не Dfa, Dfb и Dfd
Dfd	Экстремально холодный субарктический	не $P_{\text{звла}} < P_{\text{лвла}} / 10$; не $P_{\text{лсух}} < 40$ и $P_{\text{лсух}} < P_{\text{звла}} / 3$; $T_{\text{янв}} < -38$

⁷ KöppenGeiger_inR. Электронный ресурс: https://github.com/MAPASlab/KoppenGeiger_inR/blob/main/kgreclass_Rfunction.R (дата обращения 02.03.2025)

Обозначения:

- $R_{\text{лсух}}$ — среднемесячное количество осадков самого сухого месяца лета;
- $R_{\text{лвла}}$ — среднемесячное количество осадков самого влажного месяца лета;
- $R_{\text{звла}}$ — среднемесячное количество осадков самого влажного месяца зимы;
- $T_{\text{июл}}$ — среднемесячная температура июля;
- $T_{\text{январь}}$ — среднемесячная температура января;
- $T_{\text{мес10}}$ — количество месяцев с среднемесячной температурой выше 10 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены результаты моделирования климатических зон базового исторического периода и климатических проекций для выбранных сценариев в периодах ближайшего будущего (2021–2050 гг.), начала второй половины XXI в. (2051–2070 гг.) и конца столетия (2071–2100 гг.).

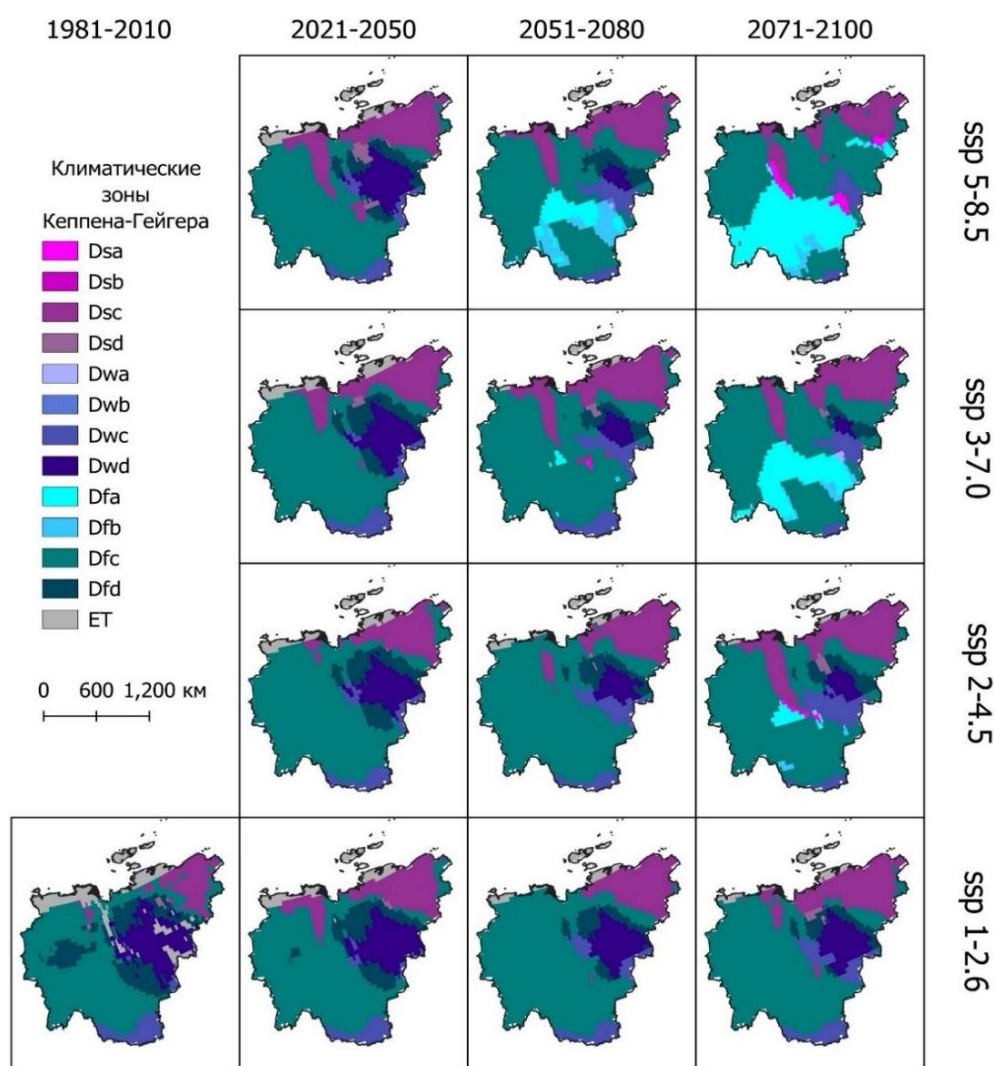


Рис. 2. Климатические зоны Кёппена-Гейгера для территории Якутии в историческом периоде 1981–2010 гг. и, по сценарным прогнозам, изменения климата на 2021–2050, 2051–2080 и 2071–2100 гг.

Fig. 2. Köppen-Geiger climate zones for the territory of Yakutia in the historical period 1981–2010 and scenario-based future projections for 2021–2050, 2051–2080 and 2071–2100

Климатические зоны на территории Якутии в историческом периоде 1981–2010 гг. были представлены в основном субарктическими холодным и экстремально холодным климатами без сухого сезона (Dfc и Dfd), расположенными в равнинных среднетаежных и северотаежных областях. Северо-восток Якутии отличается характером выпадения осадков, где выделяются зона с сухим летом на низменностях Колымы и Индигирки, и зона с сухой зимой в среднегорных и низкогорных областях (Dsc, Dwc и Dwd). Полярный климат (ET) охватывает все арктическое побережье, включая Новосибирские о-ва, а также среднегорья Верхоянского хребта и хребта Черского.

Изменения в ближайшем будущем (2021–2050 гг.) представлены локальными сдвигами существующих зон в горных областях северо-востока Якутии и на нижнем течении р. Лены, где увеличивается доля зоны с сухим летом. В равнинных областях Западной и Центральной Якутии (кроме Лено-Амгинского междуречья) исчезает зона с экстремально холодным субарктическим климатом. В горах Южной Якутии изменений не наблюдается.

Новые климатические зоны появляются ко второй половине столетия при сценариях ssp3–7.0 и ssp5–8.5. Основные изменения сосредоточены в горных областях и усиливаются с увеличением радиационного форсинга в сценарии. Зона полярной тундры начинает переходить в зоны субарктического климата и при сценарии ssp5–8.5 остается только на арктических островах. В Центральной Якутии при наихудшем сценарии усиления глобального потепления появляется зона субарктического климата с жарким летом со средней температурой июля выше 22 °С.

В конце столетия при трех сценариях возникают области с жарким летом, и только при сценарии с устойчивым развитием сохраняется современная конфигурация климатических зон. При сценарии ssp5–8.5 практически все среднетаежные ландшафты с сильнольדיстыми ландшафтами окажутся в зоне с жарким летом. Также зона Dfa появится на низменностях северо-востока Якутии. В трех сценариях сохраняются зоны с экстремально холодным климатом в горных областях. Полярная тундра сохраняется на Новосибирских о-вах при любом из четырех сценариев до конца столетия. В ssp3–7.0 и ssp5–8.5 полярная тундра полностью вытесняется с материковой части региона.

Как наиболее стабильная область в отношении сдвигов климатических зон выделяется Западная Якутия с северными редколесьями, где субарктический холодный климат сохраняется во всех сценариях до конца столетия. Холодный субарктический климат с сухим летом стабильно будет преобладать над низменностями северо-востока Якутии. Прогнозируемые переходы между зонами климата происходят за счет температурного критерия, из чего можно предположить, что смена условий выпадения осадков не будет ярко выраженной между летним и зимним сезонами.

Для оценки смен климатических условий в населенных пунктах и их окрестностях нами проведен анализ ожидаемых зон климата по 36 районным центрам Якутии, в т. ч. в столице республики — г. Якутске (рис. 3). Среди них можно выделить три группы населенных пунктов: без смены зон, со сменой зоны к середине века и к концу века. В первую группу без смены климатических зон входят г. Алдан (Dfc), с. Оленёк (Dfc), г. Среднеколымск (Dsc), пос. Чокурдах (Dsc). Кроме того, некоторые районные центры севера Якутии не меняют зону при любых сценариях, к которым перешли с базового периода: с. Саскылах (с ET в Dfc), пос. Депутатский (с Dwd в Dfc), пос. Белая Гора (с Dfc в Dcs и обратно в Dfc при ssp5–8.5). Города Ленск и Мирный сменяют климат, но только при ssp5–8.5 и к периодам 2071–2100 гг.

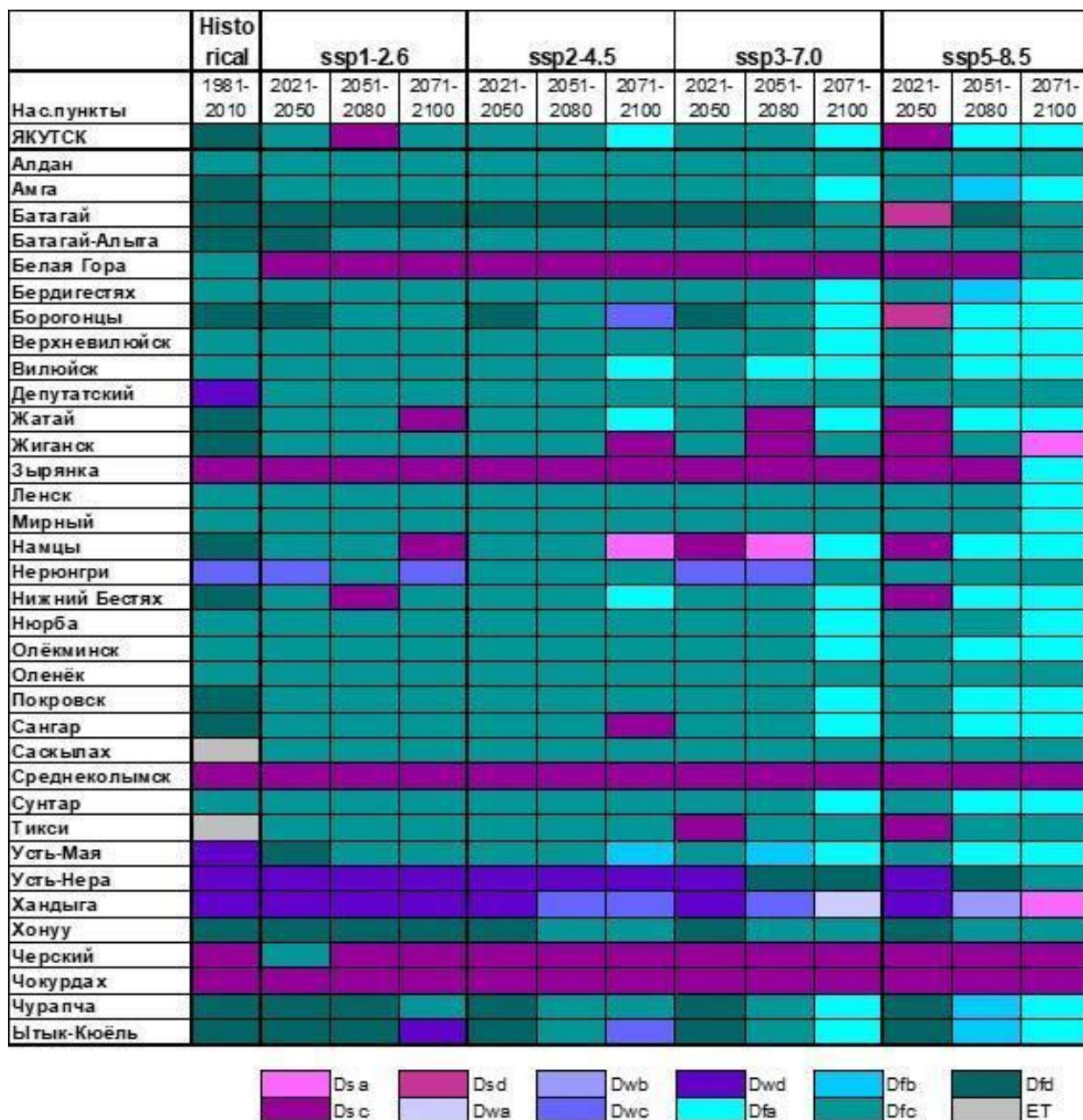


Рис. 3. Сценарный прогноз сдвигов климатических зон Кёппена-Гейгера для г. Якутска и районных центров Республики Саха (Якутия)
Fig. 3. Scenario projections of shifts in Köppen-Geiger climate zones for Yakutsk and district centers of the Republic of Sakha (Yakutia)

Большинство наиболее густонаселенных районных центров при ssp5–8.5 к середине столетия перейдут в зону Dfa, где потепление летних месяцев будет особенно сильным, что при отсутствии существенных изменений в характере выпадения осадков предполагает формирование негативных условий для сельского хозяйства, противопожарной охраны лесов и климатической комфортности проживания в населенных пунктах. Для г. Якутска и близлежащих поселений (Намцы, Жатай и Нижний Бестях) в сценарии ssp5–8.5 переход в Dfa произойдет ко второй половине столетия; сменится также количество осадков летних месяцев. При ssp3–7.0 переход к субарктическому климату с жарким летом у этих же населенных пунктов ожидается к концу столетия. Сценарий

ssp2–4.5 предполагает, что климат с жарким летом ожидается в Якутске, Жатае, Нижнем Бестяхе и г. Вилюйске. Для районных центров заречных районов (Борогонцы, Чурапча и Ытык-Кюель) и для г. Вилюйска характерны смены зон между каждым периодом с Dfd, Dfc и Dfa (или Dfb) при ssp3–7.0 и ssp5–8.5.

К числу стабильно холодных районных центров до конца столетия можно причислить с. Усть-Нера (Оймяконский район). Районный центр «Полюса холода» будет сохранять экстремально холодный климат при ssp1–2.6, ssp2–4.5 и ssp3–7.0 до конца столетия и до середины при всех сценариях. Экстремально холодный климат сохранится и для другого «Полюса холода» — пос. Батагай (Верхоянский район), где переход к холодному субарктическому климату возможен к концу столетия при ssp3–7.0 и ssp5–8.5.

При неблагоприятных сценариях социально-экономического развития с увеличением выбросов парниковых газов значительная часть районных центров к середине и к концу столетия окажется в зоне жаркого лета, причем Намцы, Жиганск и Хандыга — в условиях сухого и жаркого лета. Зона континентального климата с жарким летом (Dfa) и теплым летом (DFb) в современном климате характерна для степных и лесостепных ландшафтов Европейской России (Ростов-на-Дону, Ставрополь и Краснодар) и Западной Сибири (Оренбург, Барнаул и Омск). Переход с экстремально холодного климата в большинстве населенных пунктов произойдет уже в ближайшем будущем. При самом негативном сценарии все территории зон с экстремально холодным климатом к концу столетия перейдут на более мягкие.

ВЫВОДЫ

Картографирование климата является важным инструментом повышения осведомленности общества о грядущих изменениях климатических условий и информированного принятия адаптационных мер. Зоны Кёппена-Гейгера являются одной из наиболее популярных систем классификации климата точкой отсчета для прогнозирования климатических сдвигов. В этом исследовании мы представили сценарные климатические проекции распространения зон Кёппена-Гейгера на территории Якутии по четырем сценариям социально-экономического развития. В исследованиях на региональном масштабе подход, основанный на использовании регионально-адаптированных модельных ансамблей, широко распространен и сравнительно более точен.

Наши результаты указывают на переход из экстремально холодного климата практически всех районных центров Якутии в ближайшем будущем вне зависимости от сценария. Субарктический климат с жарким летом будет доминировать в зоне среднетаежных ландшафтов. Климат полярной тундры к концу столетия будет вытеснен с материковой части Якутии. Наиболее устойчивыми к потеплению климата являются горные области и межгорные котловины северо-востока Якутии. При реализации наиболее неблагоприятных сценариев социально-экономического развития (а именно ssp3–7.0 и ssp5–8.5), которые нам кажутся наиболее правдоподобными, можно ожидать для территории Якутии значительные климатические сдвиги в сторону потепления летнего периода уже к середине XXI в. Учитывая, что при этом смены количества осадков не ожидается, то пожароопасность лесов и засушливость почвы будет возрастать. Данный факт влечет негативные последствия для энергетической инфраструктуры, сохранения биоразнообразия, сельского и водного хозяйства. Исследование вносит вклад в понимание ожидаемых климатических изменений на уровне крупнейшего административного региона в мире, а также в накопление информации, необходимой для совершенствования регионального плана адаптации к изменениям климата. Полученные картографические и

инфографические материалы способствуют увеличению доступности сведений о прогнозируемых климатических изменениях для широкой публики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках научного проекта «Оценка современных и прогноз будущих тенденций изменения климата и их влияния на экосистемы Республики Саха (Якутия)» по плану НИР научно-исследовательской лаборатории по изучению климата и экосистем северных регионов ИЕН СВФУ по приоритетным направлениям Программы развития СВФУ им. М. К. Аммосова на 2024 и 2025 гг.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out within the research project “Assessment of current and future trends of climate change and their impact on ecosystems of the Republic of Sakha (Yakutia)” under the plan of scientific work of the Research Laboratory for the Study of Climate and Ecosystems of Northern Regions in the Institute of Natural Sciences North-Eastern Federal University under the priority directions of Development Program for 2024 and 2025.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алисов Б. П.* Географические типы климатов. Метеорология и гидрология, 1936. № 6. С. 16–25.
- Берг Л. С.* Климат и жизнь. М.: Государственное издательство (Госиздат/ГИЗ), 1922. 196 с.
- Горохов А. Н., Федоров А. Н.* Современные тенденции климатических изменений в Якутии. География и природные ресурсы, 2018. № 2. С. 111–119. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(111-119).
- Тананаев Н. И.* Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия). Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле», 2023. № 2. С. 88–101. DOI: 10.25587/SVFU.2023.30.2.008.
- Тананаев Н. И.* Подбор оптимальной модели климатического реанализа по годовой сумме осадков для территории Республики Саха (Якутия). Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2025. № 30(1). С. 61–72. DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-1-61-72.
- Тананаев Н. И., Тимофеев М. А.* Оценка точности реанализа GHCN-CAMS в расчетах внутригодового распределения температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия). Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле», 2023. № 4. С. 99–110. DOI: 10.25587/2587-8751-2023-4-99-110.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Росгидромет. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.
- Федоров А. Н., Ботулу Т. А., Варламов С. П., Васильев И. С., Грибанова С. П., Дорофеев И. В., Климовский И. В., Самсонова В. В., Соловьев П. А.* Мерзлотные ландшафты Якутии. Пояснительная записка к мерзлотно-ландшафтной карте Якутской АССР м-ба 1:2 500 000. Новосибирск: ГУГК, 1989.
- Andrade C., Fonseca A., Santos J. A., Bois B., Jones G. V.* Historic Changes and Future Projections in Köppen-Geiger Climate Classifications in Major Wine Regions Worldwide. Climate, 2024. V. 12. No. 94. DOI: 10.3390/cli12070094.
- Beck H., Zimmermann N., McVicar T., Vergopolan N., Berg A., Wood E.* Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. Sci Data, 2018. V. 5. P. 180214. DOI: 10.1038/sdata.2018.21.

Geiger R. Landolt-Börnstein — Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, alte Serie. V. 3: Ch. Klassifikation der Klimate nach W. Köppen. Berlin: Springer, 1954. S. 603–607.

Holdridge L. R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 1947. V. 105. P. 367–368.

Köppen W. Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heißen, gemäßigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet. *Meteorologische Zeitschrift*, 1884. V. 1. S. 215–226.

Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006. V. 15. S. 259–263.

O'Neill B. C., Kriegler E., Ebi K. L., Kemp-Benedict E., Riahi K., Rothman D. S., Van Ruijven B. J., Van Vuuren D. P., Birkmann J., Kok K., Levy M., Solecki W. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 2017. V. 42. P. 169–180. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.

Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007. V. 11. P. 1633–1644.

Sa'adi Z., Al-Suwaiyan M., Yaseen Z. M., Tan M. L., Goliattf L., Heddami S., Halder B., Ahmadianfari I., Homod R., Shafik S. Observed and future shifts in climate zone of Borneo based on CMIP6 models. *Journal of Environmental Management*, 2024. V. 340. P. 121087. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121087.

Strohmenger L., Collet L., Andreassian V., Corre L., Rousset F., Thirel G. Köppen-Geiger climate classification across France based on an ensemble of high-resolution climate projections. *Comptes Rendus. Geoscience*, 2024. V. 356. P. 67–82. DOI: 10.5802/crgeos.263.

Tananaev N. I. Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia. *Polar Science*, 2024. P. 101066. 13 p.

Wong S. L., Wan K., Yang L., Lam J. C. Changes in bio climates in different climates around the world and implications for the built environment. *Building and Environment*, 2012. V. 57. P. 214–222. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.05.006.

Yoo J., Rohli R. Global distribution of Köppen-Geiger climate types during the Last Glacial Maximum, Mid-Holocene, and present. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016. V. 446. P. 326–337. DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.12.010.

REFERENCES

Alisov B. P. Geographical types of climates. *Russian Meteorology and Hydrology*, 1936. No. 6. P. 16–25. (in Russian).

Andrade C., Fonseca A., Santos J. A., Bois B., Jones G. V. Historic Changes and Future Projections in Köppen-Geiger Climate Classifications in Major Wine Regions Worldwide. *Climate*, 2024. V. 12. No. 94. DOI: 10.3390/cli12070094.

Beck H., Zimmermann N., McVicar T., Vergopolan N., Berg A., Wood E. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data*, 2018. V. 5. P. 180214. DOI: 10.1038/sdata.2018.21.

Berg L. S. *Climate and Life*, Moscow: Gosizdat (State Publishing House), 1922. 196 p. (in Russian).

Fedorov A. N., Botulu T. A., Varlamov S. P., Vasilyev I. S., Gribanova S. P., Dorofeev I. V., Klimovsky I. V., Samsonova V. V., Soloviev P. A. Permafrost Landscapes in Yakutia. Explanation Note to the Permafrost-Landscape Map of the Yakut ASSR at a scale 1:2 500 000. Novosibirsk: General Administration of Geodesy and Cartography, 1989 (in Russian).

Geiger R. Landolt-Börnstein — Numerical values and functions from physics, chemistry, astronomy, geophysics and engineering, old series. V. 3: Ch. Classification of climates according to W. Köppen. Berlin: Springer, 1954. P. 603–607 (in German).

Gorokhov A. N., Fedorov A. N. Modern trends of climatic changes in Yakutia. Geography and Natural Resources, 2018. No. 2. P. 111–119 (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(111-119).

Holdridge L. R. Determination of world plant formations from simple climatic data. Science, 1947. V. 105. P. 367–368.

Köppen W. The heat zones of the Earth, considered according to the duration of the hot, temperate and cold period and according to the effect of heat on the organic world. Meteorologische Zeitschrift (Meteorological Journal), 1884. V. 1. P. 215–226 (in German).

Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift (Meteorological Journal), 2006. V. 15. P. 259–263.

O'Neill B. C., Kriegler E., Ebi K. L., Kemp-Benedict E., Riahi K., Rothman D. S., Van Ruijven B. J., Van Vuuren D. P., Birkmann J., Kok K., Levy M., Solecki W. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change, 2017. V. 42. P. 169–180. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.

Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences, 2007. V. 11. P. 1633–1644.

Sa'adi Z., Al-Suwaiyan M., Yaseen Z. M., Tan M. L., Goliattf L., Heddam S., Halder B., Ahmadianfari I., Homod R., Shafik S. Observed and future shifts in climate zone of Borneo based on CMIP6 models. Journal of Environmental Management, 2024. V. 340. P. 121087. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121087.

Strohmenger L., Collet L., Andreassian V., Corre L., Rousset F., Thirel G. Köppen-Geiger climate classification across France based on an ensemble of high-resolution climate projections. Comptes Rendus. Geoscience, 2024. V. 356. P. 67–82. DOI: 10.5802/crgeos.263.

Tananaev N. I. Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Sakha (Yakutia) Republic, based on mean annual air temperature. Vestnik of North-Eastern Federal University. Series “Earth Sciences”, 2023. No. 2. P. 88–101 (in Russian). DOI: 10.25587/SVFU.2023.30.2.008.

Tananaev N. I. Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia. Polar Science, 2024. P. 101066. 13 p.

Tananaev N. I. Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Republic of Sakha (Yakutia) based on mean annual precipitation. Arctic and Subarctic Natural Resources, 2025. No. 30(1). P. 61–72 (in Russian). DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-1-61-72.

Tananaev N. I., Timofeyev M. A. Estimation of the accuracy of GHCN-CAMS reanalysis in calculations of the intra-annual distribution of air temperature in the territory of the Sakha Republic (Yakutia). Vestnik of North-Eastern Federal University. Series “Earth Sciences”, 2023. No. 4. P. 99–110 (in Russian). DOI: 10.25587/2587-8751-2023-4-99-110.

Third Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation. Rosgidromet. Saint Petersburg: Science Intensive Technologies, 2022. 676 p. (in Russian).

Wong S. L., Wan K., Yang L., Lam J. C. Changes in bio climates in different climates around the world and implications for the built environment. *Building and Environment*, 2012. V. 57. P. 214–222. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.05.006.

Yoo J., Rohli R. Global distribution of Köppen-Geiger climate types during the Last Glacial Maximum, Mid-Holocene, and present. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016. V. 446. P. 326–337. DOI: 10.1016/j.palaeo.2015.12.010.
