

*Н. И. Тананаев*

Северо-Восточный Федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия  
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия  
e-mail: tanni@s-vfu.ru

## ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КЛИМАТИЧЕСКОГО РЕАНАЛИЗА ПО СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

*Аннотация.* Данные о среднегодовых температурах воздуха (СГТВ) для исторического (1961-1990 гг.) и актуального (1991-2020 гг.) климатических периодов по 91 метеостанции на территории Республики Саха (Якутия) использованы для оценки точности воспроизведения наблюдаемой СГТВ и ее изменений современными моделями климатического реанализа. Анализ ошибок показывает, что модель GHCN-CAMS точнее прочих, с модулем средней ошибки менее 0.15°C, и наибольшим коэффициентом конкордации, воспроизводит современный климат и может использоваться как модель «базового климата» в различных расчетных и прогнозных приложениях. Ограничение этого продукта – временное разрешение (месяц). Одновременно, только для оценки изменения температурных характеристик между периодами допустимо использовать также данные реанализа ERA5-Land, имеющие более высокое пространственное и временное разрешение. Коэффициенты регрессии между наблюдаемыми СГТВ и данными реанализа ERA5-Land неустойчивы во времени, что увеличивает неопределенность регрессионного метода приведения одних данных к другим. Все рассмотренные модели реанализа занижают скорость роста СГТВ на некоторых метеостанциях центральной Якутии, что предполагает наличие устойчивых островов тепла в крупных населенных пунктах этой территории.

*Ключевые слова:* Республика Саха (Якутия), среднегодовая температура воздуха, региональный климат, климатический реанализ, климатические покрытия, коэффициент конкордации, пространственная скоррелированность, материалы метеонаблюдений, наблюдаемые климатические изменения, городские острова тепла

*N. I. Tananaev*

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia  
Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia  
e-mail: tanni@s-vfu.ru

## SELECTION OF THE BEST-PERFORMING CLIMATE REANALYSIS MODEL FOR THE SAKHA (YAKUTIA) REPUBLIC, BASED ON MEAN ANNUAL AIR TEMPERATURE

*Abstract.* Mean annual air temperature (MAAT) values for the historic (1961 – 1990) and modern (1991 – 2020) reference climatic periods, collected from 91 meteorological stations across the Sakha (Yakutia) Republic were used in an evaluation of the performance of several modern reanalysis products. The model error analysis shows GHCN-CAMS to be the best-performing MAAT reanalysis product, with the lowest absolute error, below 0.15°C, and best concordance with observation data. This product can be used as a ‘baseline climate’ in geospatial modeling and future climate forecasts. Its main limitation is monthly temporal resolution. The ERA5-Land product, having higher spatial and temporal resolution, can be used to track changes in climate-related variables between periods, but its absolute MAAT values deviate systematically and non-concordantly from the observed data. Parameters of the linear regression relating ERA5-Land data to observations are shown to be time-dependent, hence such evaluation yields increased uncertainty limiting the applicability of this approach. All reanalysis products underestimate the observed MAAT increase at stations across central Yakutia, which suggests the appearance of stable ‘urban heat islands’ in the recent decades.

*Keywords:* Sakha (Yakutia) Republic, mean annual air temperature, regional climate, climate reanalysis, climatic spatial coverage, coefficient of concordance, spatial correlation, meteorological observations data, observed climate warming, urban heat islands

## Введение

Региональный климатический анализ опирается на данные наблюдений на регулярной сети Росгидромета: выполненных по единой методике, однородных и сопоставимых между станциями. При достаточной плотности наблюдательной сети в регионе, равномерном распределении метеостанций по высотным зонам и типичным ландшафтам, картирование климатических характеристик может успешно опираться на методы автоматизированной интерполяции, дополненные географическими подходами: учётом атмосферной циркуляции, взаимосвязей климата с рельефом и другими природными факторами [1]. Нередко, особенно при решении задач регионального картирования, перечисленные условия не выполняются. Средняя плотность метеостанций в Республике Саха (Якутия) примерно втрое меньше, чем в среднем по территории РФ, особенно в труднодоступных и малонаселенных арктических и горных районах, что затрудняет решение интерполяционных задач.

В последние два десятилетия задача ассимиляции данных срочных и осредненных наблюдений в узлы регулярной сетки решается моделями климатического реанализа, сочетающими автоматизированную пространственную интерполяцию с методами краткосрочного прогноза погоды и климатического моделирования [2]. Выход таких моделей – пространственные покрытия, описывающие поля метеозадач в заданный срок, либо осредненные до нужного временного разрешения (сутки, месяцы, годы). Использование данных реанализа позволяет решать задачи, нерешаемые только по точечным данным метеостанций.

Во-первых, геопривязанные покрытия, представляющие выход моделей реанализа – база для климатического картирования, построения электронных карт-дериватов, например, суровости климата и подобных [3], анализа составляющих водного баланса крупных речных водосборов [4], других геопространственных расчетов. Во-вторых, данные реанализа целесообразно использовать в качестве «базового климата» для приведения к ним модельных климатических проекций, представляющих собой пространственные покрытия сопоставимого разрешения [5]. Известно, что ранние результаты прогнозного гидродинамического моделирования климата в моделях предыдущих поколений для территории РФ обладали малой достоверностью [6], эта черта присуща также индивидуальным моделям более поздних поколений [7,8]. По этой причине для региональной оценки климатических изменений следует использовать изменение модельного климата будущего относительно модельного климата некоторого исторического периода, «приложенное» к базовым значениям климатических переменных за тот же исторический период, как это сделано, например, в работе [5]. В качестве таких базовых значений могут быть использованы данные реанализа.

Данные реанализа, как было показано ранее в работах [2,9], имеют большую неопределенность и неравномерно распределенные по территории РФ погрешности. За время, прошедшее после выхода работы [2], расширился ряд доступных климатических архивов, повысилась их точность, появились новые задачи. Региональное планирование адаптационных мероприятий, проводимое в рамках национального плана адаптации к климатическим изменениям, должно быть обеспечено информацией. Для территории РС (Я) оценка точности некоторых моделей реанализа выполнялась ранее [10], однако сравнение в этой работе сделано только для двух моделей (ERA-Interim и NCEP/NCAR), и только по пяти метеостанциям, чего недостаточно для решения перечисленных задач. Подбор оптимальной модели реанализа для Республики Саха (Якутия) остается актуальной научно-практической задачей, до настоящего времени нерешенной.

В данной работе приведена оценка точности воспроизведения несколькими современными моделями реанализа наблюдаемых точечных данных о среднегодовой температуре воздуха (СГТВ) в исторический (1961-1990 гг.) и актуальный (1991-2020 гг.) климатические периоды, изменения СГТВ между этими периодами. Цель работы – определить оптимальную модель для решения перечисленных выше практических задач с использованием метрик корреляции и конкордации, сведений об ошибках моделей и их пространственном распределении.

### Материалы и методы

Климатические нормы СГТВ на метеостанциях РС(Я) за исторический (1961-1990 гг.) и актуальный (1991-2020 гг.) периоды получены с официального сайта Гидрометцентра РФ [11]. Использованы также точечные .shp файлы с геопривязкой, содержащие координаты метеостанций.

В работе использованы следующие основные модели реанализа:

1. NCEP/NCAR Reanalysis 1, NOAA, США; реанализ полей среднесуточной температуры воздуха, пересчитанных из четырехсрочных наблюдений (3, 9, 15 и 21 ч. UTC) на сетке разрешением  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  [12];

2. ERA5-Land, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), Великобритания; реанализ полей среднесуточной температуры воздуха на сетке разрешением  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  [13];

3. CRU TS v4.05 (Climate Research Unit), Университет Восточной Англии, Великобритания; реанализ полей среднесуточной температуры воздуха на сетке разрешением  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  [14];

4. GHCN-CAMS (Global Historical Climatology Network + Climate Anomaly Monitoring System), NOAA, Центр климатических прогнозов: реанализ полей среднемесячной температуры воздуха на сетке разрешением  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  [15].

Данные других моделей реанализа, в числе которых: NCEP/DOE Reanalysis 2, NCEP/CIRES/DOE 20CRv3, JRA-55, архив Университета штата Делавэр, в этой работе не использовались, поскольку они не закрывают всего периода с 1960 по 2020 гг. и не могут быть сопоставлены с данными метеостанций в оба климатических периода.

Статистический анализ выполняли в RStudio [16], графическом интерфейсе пользователя для языка R [17]. Данные реанализов, хранящиеся в файлах формата NetCDF, были преобразованы в геопривязанные растровые покрытия с использованием авторских скриптов на основе функций пакета ‘tidync’ [18]. Для каждого реанализа были построены поля СГТВ для периода с 1961 по 1990 г., периода с 1991 по 2020 г., а также для изменения СГТВ между двумя периодами (рассчитано в QGIS 3.11 [19], свободно распространяемом программном обеспечении, с помощью функции Raster Calculator).

Значения СГТВ для двух периодов и её изменения между периодами в точках расположения метеостанций для каждого покрытия определены в QGIS 3.11, используя плагин Point Sampling Tool версии 0.5.3. Оценка точности реанализа, его близости к данным наблюдений, выполнялась по трем параметрам: RMSE, root mean square error, корень среднеквадратичной ошибки;  $r_{\text{corr}}$ , коэффициент линейной корреляции (Пирсона); CCC, коэффициент конкордации Лина, показывающий близость линейной регрессии к линии 1:1. Расчеты выполнены в RStudio, с использованием функций *rmse()* пакета ‘Metrics’, *cor()* и *ks.test()* пакета ‘stats’, *CCC()* пакета ‘DescTools’.

### Результаты и обсуждение

*Описательная статистика.* В работе использованы данные по 91 метеостанции на территории РС(Я), для которых Росгидрометом опубликованы исторические и актуальные климатические нормы [11]. Существующая сеть метеостанций по преимуществу расположена в высотных зонах до 400 м и характеризует климат равнинных районов региона; только две станции расположены на высоте свыше 1000 м, тогда как наибольшая высота в РС(Я) превышает 3000 м над уровнем моря.

Следовательно, оценивается точность воспроизведения моделями реанализа в основном климата равнинной части республики.

Осредненная по всем метеостанциям СГТВ составляла  $-11.1 \pm 2.9^\circ\text{C}$  в 1961-1990 гг.,  $-9.7 \pm 2.8^\circ\text{C}$  в 1991-2020 гг., средний прирост СГТВ между этими периодами составил  $+1.4 \pm 0.3^\circ\text{C}$ . Аналогичные данные по моделям реанализа приведены в Табл. 1, из которой видно, что среди них выделяются модели с более высокой СГТВ (относительно наблюдений): NCEP/NCAR и ERA5-Land, с более низкой СГТВ: CRU TS, на фоне близкой к данным наблюдений модели GHCN-CAMS. Сравнение эмпирических функций распределения наблюдаемых и модельных данных сделано с помощью критерия согласия Колмогорова-Смирнова (Табл. 1). Оно показывает, что только данные модели GHCN-CAMS относятся к той же генеральной совокупности, что и наблюдаемые на метеостанциях ( $p > 0.05$ ).

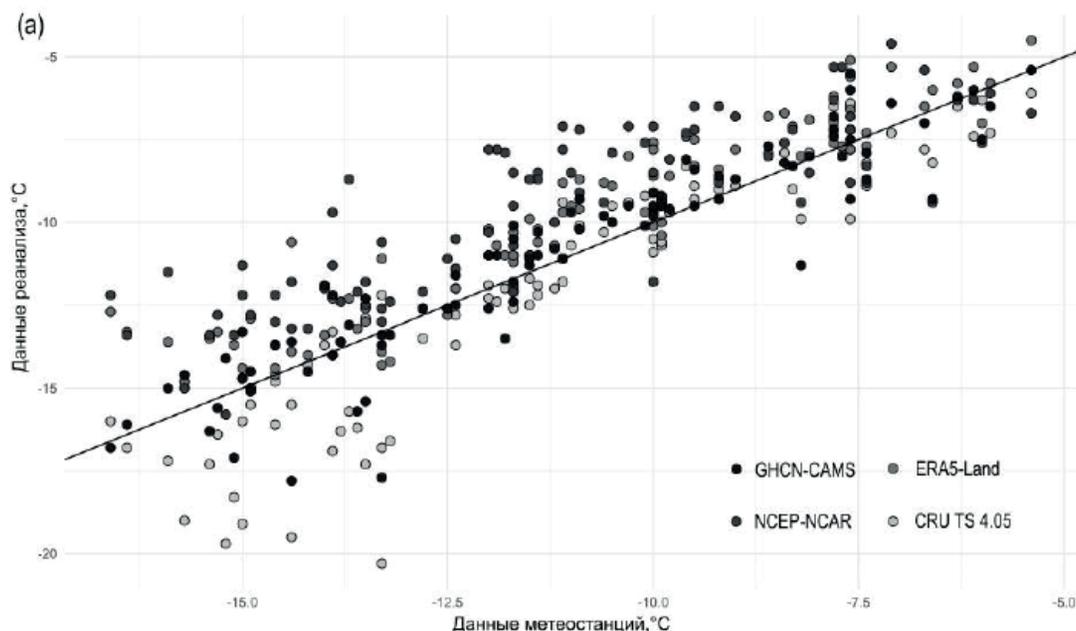
Таблица 1 – Среднегодовая температура воздуха в точках расположения метеостанций, по данным моделей реанализа

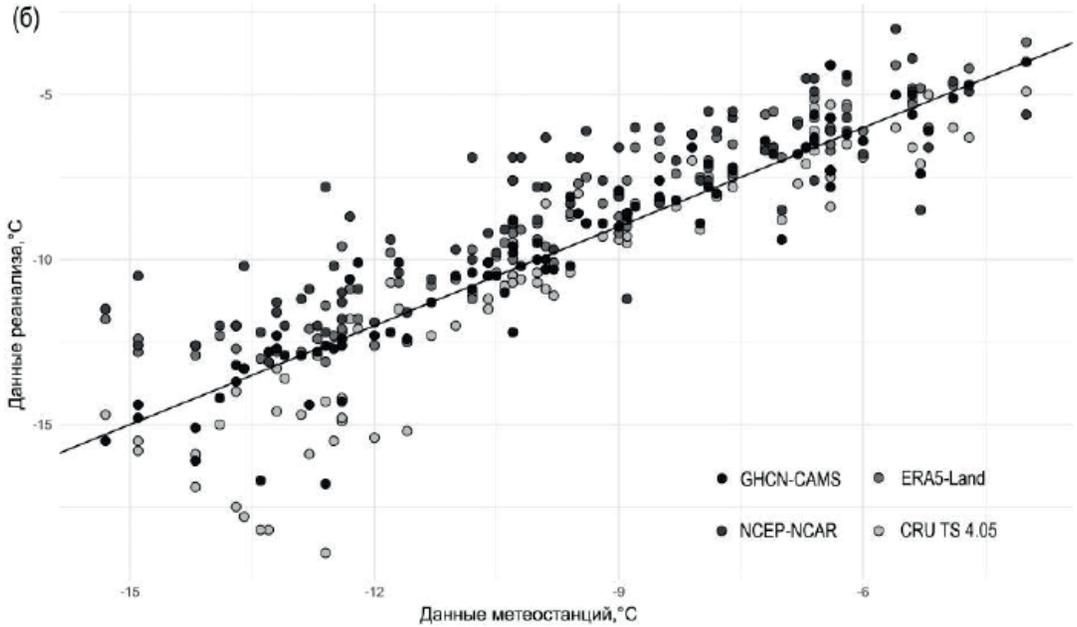
Реанализ	1961-1990 гг.		1991-2020 гг.		Изменение между периодами	
	СГТВ	$p$ , тест К-С*	СГТВ	$p$ , тест К-С	СГТВ	$p$ , тест К-С
NCEP/NCAR	$-9.6 \pm 2.6$	$< 0.01$	$-8.4 \pm 2.5$	0.02	$+1.2 \pm 0.45$	$< 0.01$
ERA5-Land	$-10.1 \pm 2.8$	0.10	$-8.8 \pm 2.8$	0.25	$+1.3 \pm 0.27$	$< 0.01$
CRU TS 4.05	$-11.8 \pm 3.7$	0.05	$-10.5 \pm 3.7$	0.07	$+1.3 \pm 0.11$	$< 0.01$
GHCN-CAMS	$-11.0 \pm 3.1$	0.72	$-9.7 \pm 3.1$	0.98	$+1.3 \pm 0.33$	0.12

\* тест К-С –  $p$ -значение, двухвыборочный тест Колмогорова-Смирнова

\* test K-S –  $p$ -value, two-sample Kolmogorov-Smirnov test

Сопоставление данных наблюдений и реанализа за периоды 1961-1990 гг. (рис. 1 а) и 1991-2020 гг. (рис. 1б) показывает, что все модели реанализа имеют тенденцию завышать СГТВ в диапазоне от  $-8^\circ\text{C}$  до  $-12.5^\circ\text{C}$ . В более теплых районах точки разбросаны относительно линии 1:1 равномерно; в холодных районах с СГТВ ниже  $-12 \dots -13^\circ\text{C}$  реанализ CRU TS 4.05 значительно занижает температуру, что отражено в табл. 1.





**Рис. 1.** Среднегодовая температура воздуха на метеостанциях РС(Я) и в точках их расположения по данным реанализа: (а) за период 1961-1990 гг., (б) за период 1991-2020 гг, прямая – линия 1:1.

**Fig. 1** Mean annual air temperature at meteo stations in Sakha (Yakutia) Republic and in reanalysis data at corresponding points: (a) in 1961 – 1990; (b) in 1991 – 2020; black line corresponds to unity (1:1) line

*Оценка тесноты линейной связи.* Метрики тесноты связи между данными наблюдений и реанализа (Табл. 2) отдают преимущество двум моделям: ERA5-Land и GHCN-CAMS, но не позволяют сделать однозначный выбор между ними. Два реанализа близки между собой, но показывают себя наилучшим образом в разных метриках. Реанализ ERA5-Land систематически завышает СГТВ, примерно на +1°C (табл. 1), потому при высоких значениях  $r$  имеет меньшие значения CCC; с другой стороны, изменение СГТВ во времени эта модель оценивает точнее по всем использованным метрикам. Реанализ GHCN-CAMS точнее ERA5-Land по коэффициенту конкордации, близок по другим метрикам, но хуже оценивает изменение СГТВ между периодами (табл. 2).

Таблица 2 – Метрики тесноты связи между данными метеостанций и реанализа

Параметр	СГТВ, период 1961-1990 гг.			СГТВ, период 1991-2020 гг.			Изменение СГТВ между периодами		
	$r$	RMSE	CCC	$r$	RMSE	CCC	$r$	RMSE	CCC
Метрика*									
NCEP-NCAR	0.84	1.56	0.717	0.86	1.43	0.764	0.39	0.50	0.30
ERA5-Land	<b>0.94</b>	<b>0.968</b>	0.888	<b>0.96</b>	<b>0.82</b>	0.915	<b>0.53</b>	<b>0.30</b>	<b>0.46</b>
CRU TS 4.05	0.92	1.104	0.875	0.93	1.044	0.877	0.33	0.29	0.22
GHCN-CAMS	0.93	1.079	<b>0.925</b>	0.945	0.92	<b>0.94</b>	0.28	0.39	0.27

\*  $r$  – коэффициент корреляции Пирсона, RMSE – корень среднеквадратичной ошибки, CCC – коэффициент конкордации Лина

\*  $r$  – Pearson correlation coefficient, RMSE – root mean square error, CCC – Lin’s concordance correlation coefficient

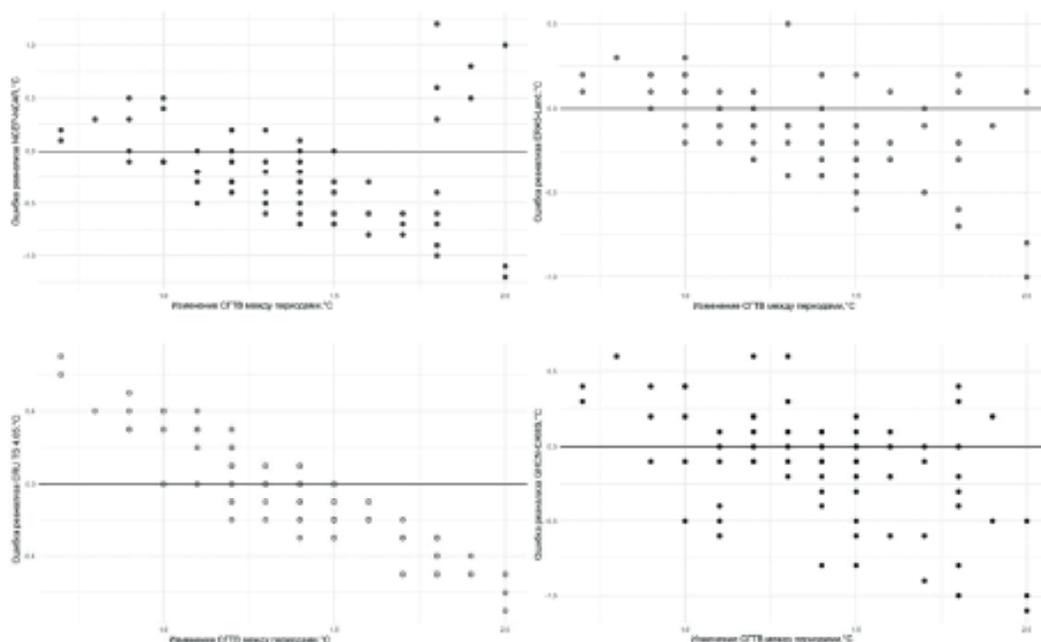
*Анализ ошибок моделей реанализа.* Оценка абсолютных ошибок моделей реанализа, приведенная в табл. 3, показывает, что низкое пространственное разрешение данных, приводит и к наибольшим ошибкам (модель NCEP/NCAR). Наименьшие ошибки у реанализа GHCN-CAMS, близкого к данным наблюдений по средним значениям (см. табл. 1). Распределение ошибок почти всех моделей гетероскедастично (рис. 2), что завышает значения рассчитанных коэффициентов корреляции и других мер качества линейных моделей. Менее всего гетероскедастичность выражена в поле ошибок модели GHCN-CAMS, как следствие, для нее данные, приведенные в табл. 2, наиболее достоверны.

Таблица 3 – Ошибки моделей реанализа относительно данных наблюдений

Реанализ	1961-1990 гг.	1991-2020 гг.	Изменение
NCEP/NCAR	<u>1.56</u> -2.8 / 5.0	<u>1.31</u> -3.2 / 4.8	<u>-0.25</u> -1.2 / 1.2
ERA5-Land	<u>0.98</u> -1.0 / 3.9	<u>0.83</u> -0.9 / 3.5	<u>-0.15</u> -1.0 / 0.5
CRU TS 4.05	<u>-0.69</u> -7.0 / 1.7	<u>-0.73</u> -6.3 / 1.6	<u>-0.04</u> -0.7 / 0.7
GHCN-CAMS	<u>0.12</u> -4.4 / 2.1	<u>0.02</u> -4.2 / 2.3	<u>-0.10</u> -1.1 / 0.6

*Примечание:* в числителе – средняя ошибка модели, в знаменателе приведены минимальная и максимальная ошибки.

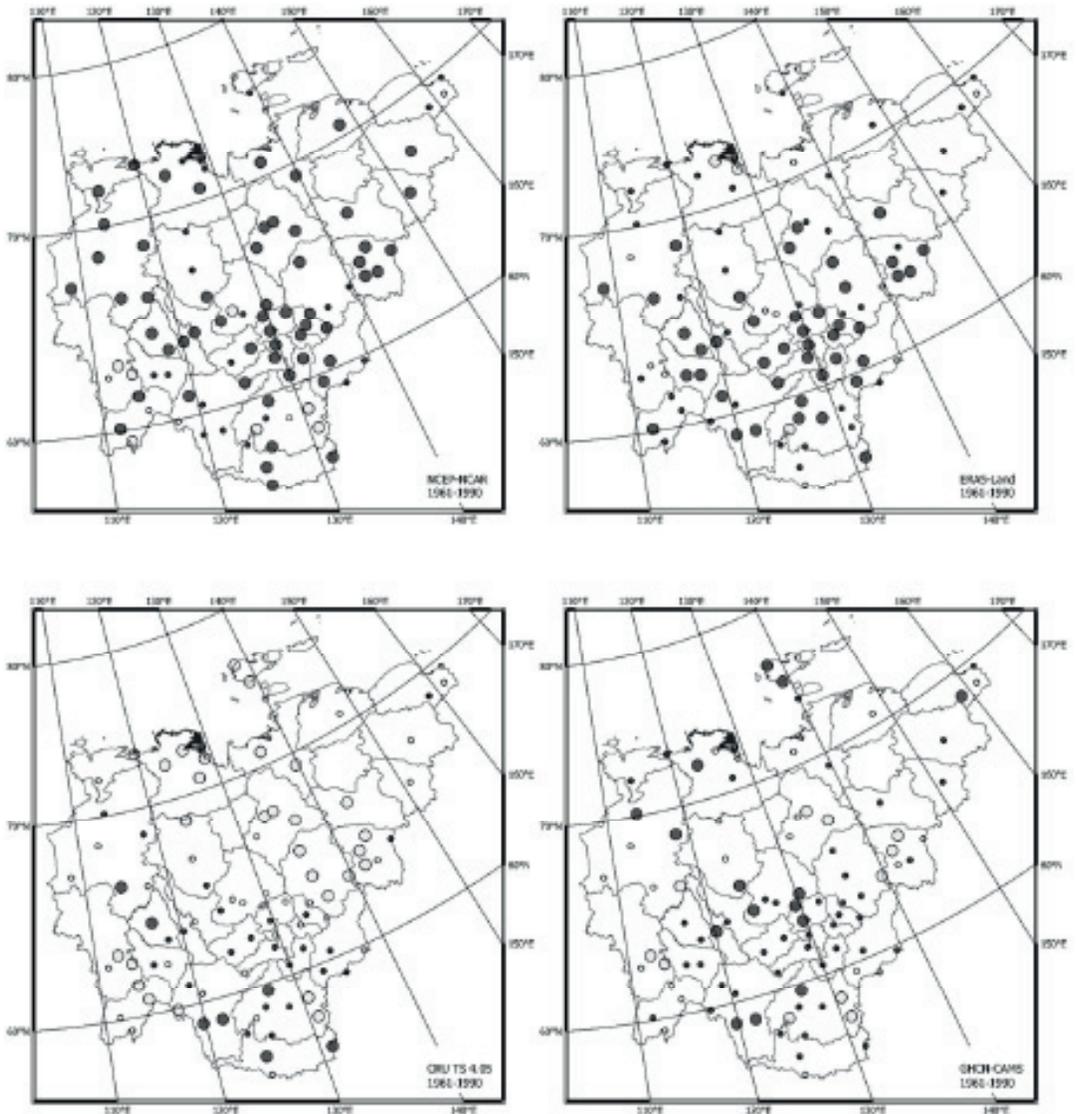
*Note:* numerator, mean model error; denominator, model error range (minimum and maximum errors, separated by a slash)



**Рис. 2.** Ошибки определения изменения СГТВ между климатическими периодами 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. различными моделями реанализа, сопоставленные с данными наблюдений

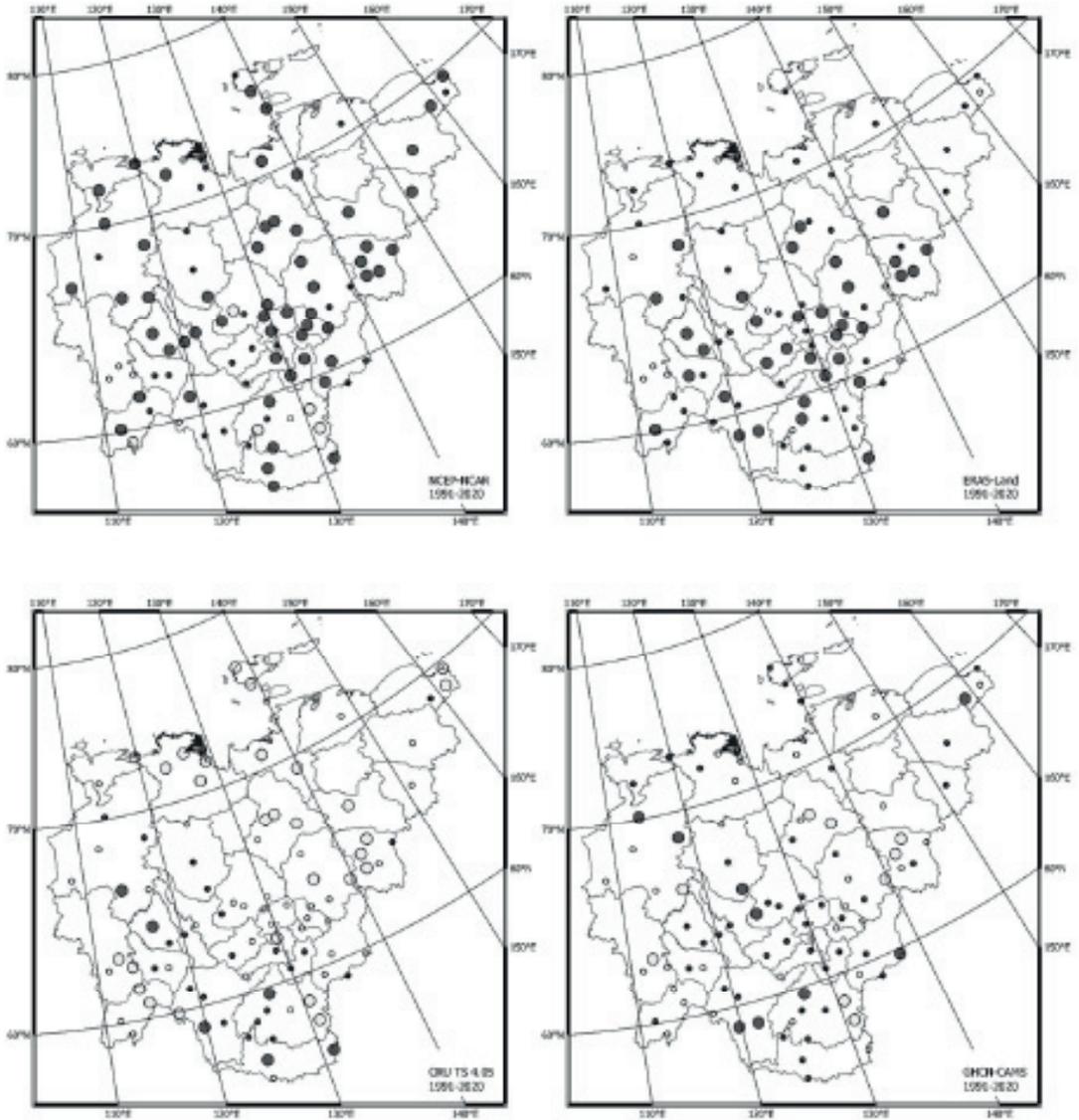
**Fig. 2** Estimation errors for reanalyses-derived difference in MAAT between reference periods (1961-1990 and 1991-2020) compared to observed difference

Пространственное распределение ошибок моделей (рис. 3, 4) подтверждает сделанные выше выводы: модели завышают значения СГТВ повсеместно (NCEP/NCAR) или преимущественно в центральной Якутии (ERA5-Land), занижают их на горном Северо-Востоке (CRU TS 4.05). Климат 1991-2020 гг. модели реанализа воспроизводят точнее климата 1961-1990 гг. или с сопоставимой точностью (см. также табл. 3).



**Рис. 3.** Пространственное распределение ошибок моделей реанализа относительно данных метеостанций, период 1961-1990 гг. Тон пунсона: светлый – занижение, темный – завышение СГТВ; размер пунсона: малый – ошибка менее 1°C, крупный – более 1°C

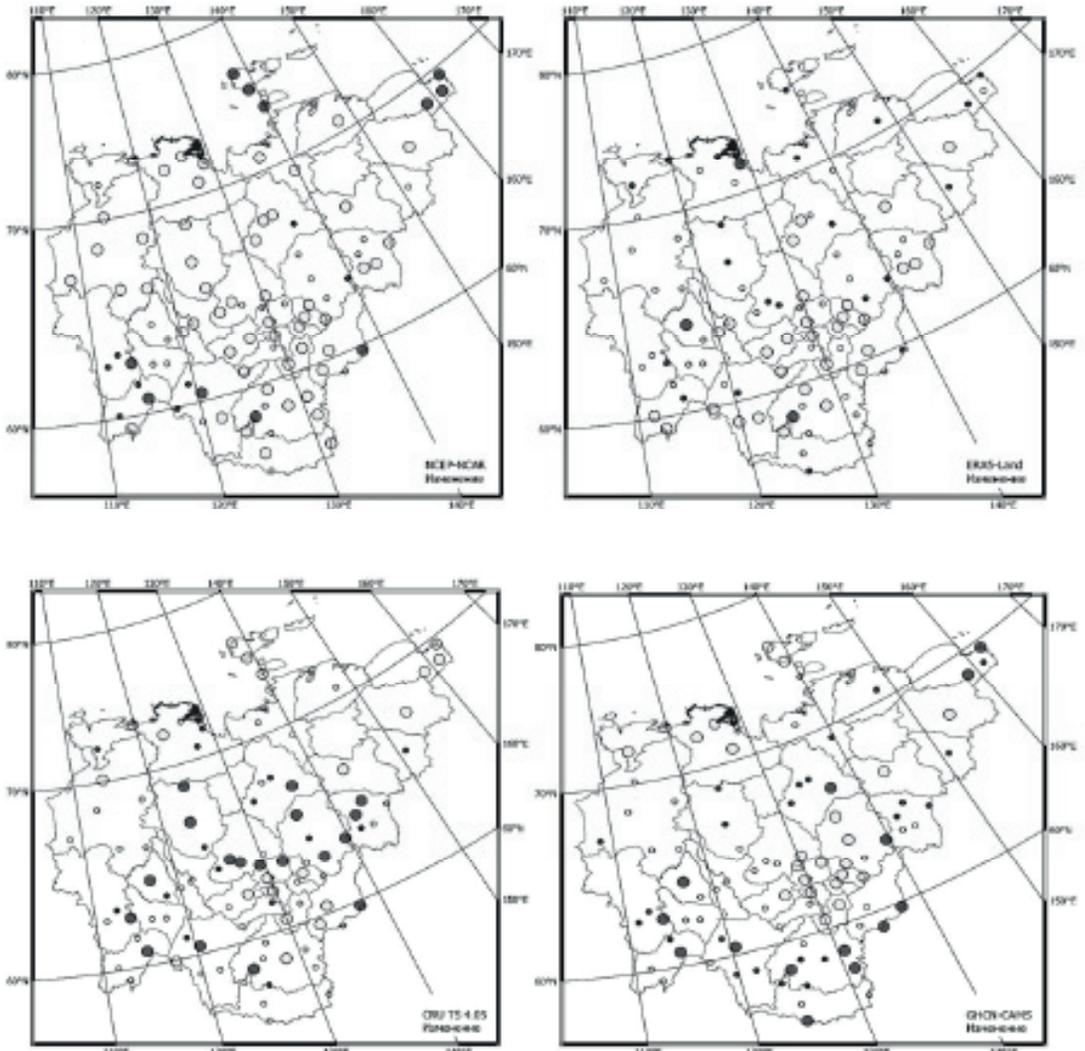
**Fig. 3** Spatial distribution of reanalyses errors in MAAT relative to observed data, 1961-1990. Point shades correspond to overestimation (dark) or underestimation (light), point size corresponds to within 1°C (small), over 1°C (large)



**Рис. 4.** Пространственное распределение ошибок моделей реанализа относительно данных метеостанций, период 1991-2020 гг. Тон пунсона: светлый – занижение, темный – завышение СГТВ; размер пунсона: малый – ошибка менее 1°C, крупный – более 1°C

**Fig. 4** Spatial distribution of reanalyses errors in MAAT relative to observed data, 1991-2020. Point shades correspond to overestimation (dark) or underestimation (light), point size corresponds to within 1°C (small), over 1°C (large)

Пространственное распределение ошибок реанализа относительно изменения СГТВ между периодами также различается между моделями с положительной и отрицательной средней ошибкой (рис. 5, табл. 3). Модели NCEP/NCAR и ERA5-Land занижают изменения по всей территории РС (Я), CRU TS их завышает, GHCN-CAMS – завышает в южной и юго-западной Якутии, и занижает в центральной Якутии.



**Рис. 5.** Пространственное распределение ошибок моделей реанализа относительно данных метеостанций, изменение между периодами 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. Тон пунсона: светлый – занижение, темный – завышение СГТВ; размер пунсона: малый – ошибка менее 0.25°C, крупный – более 0.25°C

**Fig. 5** Spatial distribution of reanalyses errors in MAAT inter-period difference relative to observed data. Point shades correspond to overestimation (dark) or underestimation (light), point size corresponds to within 1°C (small), over 1°C (large)

«Городские острова тепла». Все использованные модели реанализа показывают значительно, на 0.25-0.5°C и более, заниженные оценки изменения СГТВ между периодами на метеостанциях центральной Якутии – Бердигестях, Намцы, Ытык-Кюель, Крест-Хальджай, и отдельно следует выделить м/с Якутск, где ошибки моделей наибольшие, от -0.8 до -1.1°C. Данные этих метеостанций ассимилируются в реанализе, поэтому такое занижение указывает, что их влияние отнено другими географическими факторами. Локальный климат в точках их расположения может отличаться от окружающей «фоновой» территории вследствие естественных причин, например, положения в рельефе, либо антропогенного влияния, например, отепляющего эффекта «городских островов тепла».

Метеостанции Намцы, Крест-Хальджай и Якутск расположены в долинах крупных рек, для которых типично формирование выраженных температурных инверсий зимнего периода [20]. Переоценка этого эффекта моделями реанализа потенциально может занижать оценку изменений, но должна была приводить также к занижению абсолютных значений СГТВ, чего в реальности не наблюдается (Рис. 3, 4).

«Городские острова тепла» обнаруживаются во многих арктических поселениях с численностью населения свыше 3000 жителей [21]. Для 75 % поселений их средний температурный эффект оценивается в пределах от  $+0.5^{\circ}\text{C}$  до  $+2.5^{\circ}\text{C}$ , а сезонные различия, в отличие от поселений умеренных широт, оказываются незначительными [22]. В летний сезон – интенсивный нагрев освоенных территорий, лишенных растительности, а в зимний сезон – прямая теплоотдача зданий, приводят к выраженному эффекту «острова тепла», слабо зависящего от численности населения [21, 22]. Предположительно, модели реанализа, использующие, помимо ассимиляции наблюдений, также методы краткосрочного прогноза и климатического моделирования, не в состоянии воспроизвести этот локальный эффект. В Якутске его величина регулярно достигает  $+5^{\circ}\text{C}$  [23], в крупных сельских поселениях РС(Я) он совершенно неизучен.

*Особенности использования моделей GHCN-CAMS и ERA5-Land.* Данные о СГТВ реанализа GHCN-CAMS для территории РС(Я) оптимальны для использования в качестве «базового климата», относительно которого оценивается качество гидродинамических моделей в историческом эксперименте, и к которому применяются прогнозные (сценарные) изменения для оценки будущего климата. В данной работе не затрагиваются вопросы, связанные с оптимальностью этой модели в отношении среднесезонной и среднемесячной температуры воздуха. Предполагается, что модель, успешно описывающая СГТВ, компетентна и в описании температуры более дробных периодов. Выбор оптимальной модели для описания климата отдельных улусов (районов) РС(Я) может опираться на сведения о пространственном распределении ошибок моделей реанализа, приведенном на рис. 3-5.

Временное разрешение модели (месяц) ограничивает её использование в задачах сценарного прогнозирования климатических характеристик, основанных на среднесуточных данных – например, сумма биологических температур, средняя температура наиболее жаркой 30-тидневки, и подобных. Для оценки изменений таких характеристик между отдельными периодами, например, 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг., целесообразно использовать данные реанализа ERA5-Land, хотя вопрос, насколько эти данные точны на территории РС(Я) именно в суточном разрешении, требует дополнительных исследований. В качестве модели «базового климата» для сценарных прогнозов, а также для региональных геопространственных расчетов, для которых нужно точное значение СГТВ, эту модель предпочтительнее не использовать.

В более ранних региональных исследованиях, также отмечавших систематическую погрешность в данных реанализа ERA [10], предлагалось использовать регрессионный анализ для устранения такой погрешности и пересчета реанализа к наблюдаемым данным в точке расположения метеостанции (на примере м/с Тикси). Данная задача технически решается просто, но применимость такого подхода ограничена только пикселями, в которых расположены метеостанции (91 пиксель из 25760). Теоретически, коэффициенты регрессии могут быть интерполированы между соседними метеостанциями для получения непрерывного покрытия, однако необходимо также быть уверенным, что они устойчивы во времени.

Устойчивость коэффициентов линейной регрессии во времени оценим по всем имеющимся данным метеостанций, построив единую для территории РС(Я) модель приведения данных ERA5-Land к наблюдаемым. Для периода 1961-1990 гг. нами получено регрессионное уравнение между СГТВ на метеостанции  $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , и СГТВ в соответствующем пикселе  $T_{\text{ERA5}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ :

$$T = 0.94 \cdot T_{ERA5} - 1.59, r = 0.93;$$

для периода 1991-2020 гг.:

$$T = 0.97 \cdot T_{ERA5} - 1.10, r = 0.96.$$

Таким образом, коэффициенты линейной регрессии, приводящей значения СГТВ в пикселе по данным ERA5-Land к фактически наблюдаемым, неустойчивы во времени. По нашим оценкам, неучёт этой изменчивости вносит дополнительную неопределенность на уровне  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , в расчет СГТВ по данным ERA5-Land.

### Заключение

Совместный анализ данных метеостанций и моделей реанализа, а также ошибок этих моделей и их пространственного распределения, приводит к выводу об оптимальности модели GHCN – CAMS для описания исторических и современных полей СГТВ на территории РС (Я). Такой вывод позволяют сделать (в совокупности): максимальные  $p$ -значения теста Колмогорова – Смирнова; близость средних СГТВ между данными метеостанций и реанализа; высокие значения метрик сходства, среди которых наиболее значимым считаем коэффициент конкордации Лина; слабо смещённые и относительно гомоскедастичные ошибки. Подразумеваем также, что этот реанализ оптимален также для решения задач, связанных со среднемесячной и среднесезонной температурой воздуха, и в масштабе отдельных улусов (районов) РС (Я).

Пространственное распределение ошибок моделей реанализа, в том числе GHCN-CAMS, указывает, что они занижают интенсивность роста СГТВ на территории центральной Якутии, по сравнению с наблюдаемым на метеостанциях. Наиболее вероятно, что такое занижение связано с эффектом «городских островов тепла», влияние которых в реанализе нивелируется использованием, параллельно с ассимиляцией наблюдений, методов и данных краткосрочного прогноза, и моделирования.

Недостаток модели GHCN – CAMS – месячное временное разрешение, что делает невозможным её использования в расчетах, для которых требуются среднесуточные данные о температуре воздуха. В таких случаях оценку изменений климатических параметров допустимо выполнять с использованием данных реанализа ERA5 – Land, учитывая их смещённый характер. Смещение допустимо устранять с использованием методов линейной регрессии, коэффициенты которой зависят от выбранного временного интервала.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-27-00344.*

### Литература

1. Божиллина, Е. А. Принципы географической картографии в современной климатологии / Е. А. Божиллина, В. Н. Сорокина. – Текст: непосредственный // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2012. – № 1. – С. 61–66.
2. Жильцова, Е. Л. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами / Е. Л. Жильцова, О. А. Анисимов. – Текст: непосредственный // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 10. – С. 79–89.
3. Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики: руководство / под редакцией Н. В. Кобышевой; Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова. – Санкт-Петербург: Росгидромет, 2008. – 336 с. – Текст: непосредственный.
4. Булавина, А. С. Пространственно-временной анализ климатических факторов формирования стока Оби / А. С. Булавина. – Текст: непосредственный // Труды Кольского научного центра РАН. – 2022. – Выпуск 10. Океанология. – С. 15–26.

5. Kirillina, K.S. Climate change impacts the state of winter roads connecting indigenous communities: Case study of Sakha (Yakutia) Republic / K. S. Kirillina, N. I. Tananaev, A. N. Savvinova, V. A. Lobanov [et al.]. – Текст: непосредственный // *Climate Services*. – 2023. – Vol. 30. – 100356. – DOI: 10.1016/j.cliser.2023.100356.
6. Груза, Г. В. О неопределенности некоторых сценарных климатических прогнозов температуры воздуха и осадков на территории России / Г. В. Груза, Э. Я. Ранькова, Л. Н. Аристова, Л. К. Клещенко. – Текст: непосредственный // *Метеорология и гидрология*. – 2006. – № 10. – С. 2–23.
7. Лемешко, Н. А., Белокопытова М.А. Анализ достоверности и точности современных модельных сценариев климата для юга европейской территории России / Н. А. Лемешко, М. А. Белокопытова // *Экологическая деятельность и экологическое просвещение: региональный аспект (материалы всероссийской научной конференции)*. – Санкт-Петербург, Издательство ЛГУ им. А. С. Пушкина. – 2020. – С. 136–140. – Текст: непосредственный.
8. Кириллина, К. С. Оценка будущего климата Республики Саха (Якутия) / К. С. Кириллина, В. А. Лобанов, Н. Е. Сердитова. – Текст: непосредственный // *Ученые записки РГМУ*. – 2015. – № 40. – С. 113–126.
9. Кулаков, М. Ю. Верификация данных реанализа NCEP/NCAR по результатам наблюдений на дрейфующих станциях «Северный полюс» / М. Ю. Кулаков, А. П. Макштас, С. В. Шутилин. – Текст: непосредственный // *Проблемы Арктики и Антарктики*. – 2013. – № 1(95). – С. 88–96.
10. Васильев, М. С. Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений / М. С. Васильев, С. В. Николашкин, Р. Р. Каримов. – Текст: непосредственный // *Вестник СВФУ*. – 2014. – Т. 14. – № 5. – С. 82–88.
11. Гидрометцентр РФ. – URL : <https://meteoinfo.ru/climatecities>, свободный (дата обращения : 11.03.2023). – Электронные данные: электронные.
12. Kalnay, E. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins [et al.]. – Текст: непосредственный // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1996. – Vol. 77(3). – P. 437–472. – DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437: TNYRP>2.0.CO;2.
13. Muñoz-Sabater, J. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications / J. Muñoz-Sabater, E. Dutra, A. Agustí-Panareda, C. Albergel [et al.]. – Текст: непосредственный // *Earth System Science Data*. – 2021. – Vol. 13. – P. 4349–4383. – DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
14. Harris, I. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset / I. Harris, T. J. Osborn, P. Jones, D. Lister. – Текст: непосредственный // *Scientific Data*. – 2020. – Vol. 7. – 109. – DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
15. Fan, Y. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present / Y. Fan, H. van den Dool. – Текст: непосредственный // *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. – 2008. – Vol. 113. – D01103. – DOI: 10.1029/2007JD008470.
16. RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. – URL: <http://www.rstudio.com/>. – Электронная программа: электронная.
17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – 2020. – URL : <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 10.01.2023). – Электронная программа: электронная.
18. Sumner, M. tidync: A Tidy Approach to ‘NetCDF’ Data Exploration and Extraction. R package version 0.3.0.9001. / Sumner, M. – 2023. – URL : <https://docs.ropensci.org/tidync/> (дата обращения: 12.05.2023). – Электронная программа: электронная.
19. QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. – URL : <http://qgis.osgeo.org> (дата обращения: 12.05.2023). – Электронная программа: электронный.
20. Макаров В.С. Анализ зимних температурных инверсий в горно-котловинных ландшафтах Оймяконского нагорья // В. С. Макаров. – Текст: непосредственный // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле»*. – 2020. – № 2. – С. 40–45.

21. Esau, I. Urban heat islands in the Arctic cities: an updated compilation of in situ and remote-sensing estimations / I. Esau, V. Miles, A. Soromotin, O. Sizov // *Advances in Science and Research*. – 2021. – Vol. 18. – P. 51–57. – DOI: 10.5194/asr-18-51-2021.

22. Varentsov, M. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city / M. Varentsov, P. Konstantinov, A. Baklanov, I. Esau // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2018. – Vol. 18(23). – P. 17573–17587.

23. Константинов, П.И. Городские острова тепла российской Федерации: основные характеристики и проблемы изучения / П. И. Константинов, Е. А. Куканова. – Другой вид содержания: электронное // Доклад на Международной конференции ENVIROMIS'2014. – URL: [http://www.scert.ru/enviromis/2014/presentation/Presentation/Conference/Session\\_5/Oral\\_reports/Konstantinov.pdf](http://www.scert.ru/enviromis/2014/presentation/Presentation/Conference/Session_5/Oral_reports/Konstantinov.pdf) (дата обращения: 12.05.2023).

## References

1. Bozhilina, E. A. Principy geograficheskoy kartografii v sovremennoy klimatologii / E. A. Bozhilina, V. N. Sorokina. – Tekst: neposredstvennyj // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografija*. – 2012. – № 1. – S. 61–66.

2. Zhil'cova, E. L. O tochnosti vosproizvedeniya temperatury i osadkov na territorii Rossii global'nymi klimaticheskimi arhivami / E. L. Zhil'cova, O. A. Anisimov. – Tekst: neposredstvennyj // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2009. – № 10. – S. 79–89.

3. Rukovodstvo po specializirovannomu klimatologicheskomu obsluzhivaniju jekonomiki: rukovodstvo / pod redakciej N. V. Kobyshevoj; Glavnaja geofizicheskaja observatorija im. A. I. Voejkova. – Sankt-Peterburg: Rosgidromet, 2008. – 336 s. – Tekst: neposredstvennyj.

4. Bulavina, A. S. Prostranstvenno-vremennoj analiz klimaticheskih faktorov formirovaniya stoka Obi / A. S. Bulavina. – Tekst: neposredstvennyj // *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN*. – 2022. – Vypusk 10. *Okeanologiya*. – S. 15–26.

5. Kirillina, K.S. Climate change impacts the state of winter roads connecting indigenous communities: Case study of Sakha (Yakutia) Republic / K. S. Kirillina, N. I. Tananaev, A. N. Savvinova, V. A. Lobanov [et al.]. – Tekst: neposredstvennyj // *Climate Services*. – 2023. – Vol. 30. – 100356. – DOI: 10.1016/j.cliser.2023.100356.

6. Gruza, G. V. O neopredelennosti nekotoryh scenarnyh klimaticheskih prognozov temperatury vozduha i osadkov na territorii Rossii / G. V. Gruza, Je. Ja. Ran'kova, L. N. Aristova, L. K. Kleshhenko. – Tekst: neposredstvennyj // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2006. – № 10. – S. 2–23.

7. Lemeshko, N. A., Belokopytova M.A. Analiz dostovernosti i tochnosti sovremennyh model'nyh scenarijev klimata dlja juga evropejskoj territorii Rossii / N. A. Lemeshko, M. A. Belokopytova // *Jekologicheskaja dejatel'nost' i jekologicheskoe prosveshhenie: regional'nyj aspekt (materialy vserossijskoj nauchnoj konferencii)*. – Sankt-Peterburg, Izdatel'stvo LGU im. A. S. Pushkina. – 2020. – S. 136–140. – Tekst: neposredstvennyj.

8. Kirillina, K. S. Ocenka budushhego klimata Respubliki Saha (Jakutija) / K.S. Kirillina, V. A. Lobanov, N. E. Serditova. – Tekst: neposredstvennyj // *Uchenye zapiski RGGMU*. – 2015. – № 40. – S. 113–126.

9. Kulakov, M. Ju. Verifikacija dannyh reanaliza NCEP/NCAR po rezul'tatam nabljudenij na drejfujujshih stancijah «Severnyj poljus» / M. Ju. Kulakov, A. P. Makshtas, S. V. Shutilin. – Tekst: neposredstvennyj // *Problemy Arktiki i Antarktiki*. – 2013. – № 1(95). – S. 88–96.

10. Vasil'ev, M. S. Sravnenie prizemnoj temperatury vozduha v Jakutii po dannyh reanaliza i nazemnyh nabljudenij / M. S. Vasil'ev, S. V. Nikolashkin, R. R. Karimov. – Tekst: neposredstvennyj // *Vestnik SVFU*. – 2014. – T. 14. – № 5. – S. 82–88.

11. Gidrometcentr RF. – URL: <https://meteoinfo.ru/climaticities>, svobodnyj (data obrashhenija: 11.03.2023). – Jelektronnye dannye: jelektronnye.

12. Kalnay, E. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project / E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins [et al.]. – Tekst: neposredstvennyj // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 1996. – Vol. 77(3). – P. 437–472. – DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437: TNYRP>2.0.CO;2.

13. Muñoz-Sabater, J. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications / J. Muñoz-Sabater, E. Dutra, A. Agustí-Panareda, C. Albergel [et al.]. – Tekst: neposredstvennyj // Earth System Science Data. – 2021. – Vol. 13. – P. 4349–4383. – DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
14. Harris, I. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset / I. Harris, T. J. Osborn, P. Jones, D. Lister. – Tekst: neposredstvennyj // Scientific Data. – 2020. – Vol. 7. – 109. – DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
15. Fan, Y. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present / Y. Fan, H. van den Dool. – Tekst: neposredstvennyj // Journal of Geophysical Research: Atmosphere. – 2008. – Vol. 113. – D01103. – DOI: 10.1029/2007JD008470.
16. RStudio: Integrated Development for R, v.1.2.5042. 2020. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. – URL: <http://www.rstudio.com/>. – Jelektronnaja programma : jelektronnaja.
17. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – 2020. – URL: <https://www.R-project.org/> (data obrashhenija: 10.01.2023). – Jelektronnaja programma: jelektronnaja.
18. Sumner, M. tidync: A Tidy Approach to ‘NetCDF’ Data Exploration and Extraction. R package version 0.3.0.9001. / Sumner, M. – 2023. – URL : <https://docs.ropensci.org/tidync/> (data obrashhenija: 12.05.2023). – Jelektronnaja programma : jelektronnaja.
19. QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. – URL: <http://qgis.osgeo.org> (data obrashhenija: 12.05.2023). – Jelektronnaja programma: jelektronnyj.
20. Makarov V.S. Analiz zimnih temperaturnyh inversij v gorno-kotlovinyh landshaftah Ojmjakonskogo nagor’ja // V. S. Makarov. – Tekst: neposredstvennyj // Vestnik Severo-Vostochnogo federal’nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Serija «Nauki o Zemle». – 2020. – № 2. – S. 40–45.
21. Esau, I. Urban heat islands in the Arctic cities: an updated compilation of in situ and remote-sensing estimations / I. Esau, V. Miles, A. Soromotin, O. Sizov // Advances in Science and Research. – 2021. – Vol. 18. – P. 51–57. – DOI: 10.5194/asr-18-51-2021.
22. Varentsov, M. Anthropogenic and natural drivers of a strong winter urban heat island in a typical Arctic city / M. Varentsov, P. Konstantinov, A. Baklanov, I. Esau // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2018. – Vol. 18(23). – P. 17573–17587.
23. Konstantinov, P.I. Gorodskie ostrova tepla rossijskoj Federacii: osnovnye charakteristiki i problemy izucheniya / P. I. Konstantinov, E. A. Kukanova. – Drugoj vid sodержaniya: jelektronnoe // Doklad na Mezhdunarodnoj konferencii ENVIROMIS’2014. – URL: [http://www.scert.ru/enviromis/2014/presentation/Presentation/Conference/Session\\_5/Oral\\_reports/Konstantinov.pdf](http://www.scert.ru/enviromis/2014/presentation/Presentation/Conference/Session_5/Oral_reports/Konstantinov.pdf) (data obrashhenija: 12.05.2023).

#### Сведения об авторах

*ТАНАНАЕВ Никита Иванович* – к.г.н., заведующий лабораторией по изучению климата и экосистем северных регионов Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, в.н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, e-mail: [tanni@s-vfu.ru](mailto:tanni@s-vfu.ru)

*TANANAEV Nikita Ivanovich* – Candidate of Geographic Sciences, Head, Climate and Northern Regions Ecosystems Research Lab, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University; Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, e-mail: [tanni@s-vfu.ru](mailto:tanni@s-vfu.ru)