

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-177-198>

УДК 551.50



Сравнительная оценка сеточных продуктов осадков и температуры воздуха по данным метеорологических станций в бассейне р. Лены

Д.О. Андреева¹✉, Л.С. Лебедева^{1, 2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

✉ st095063@student.spbu.ru

DOA,0009-0000-1565-1728; ЛСЛ, 0000-0002-7498-9902

Аннотация. Для бассейна р. Лены, играющего ключевую роль в формировании притока пресной воды в Северный Ледовитый океан, выполнена сравнительная оценка качества воспроизведения температуры воздуха и атмосферных осадков по современным климатическим сеточным продуктам и данным наземных наблюдений. Проанализированы 7 массивов данных о температуре воздуха и 13 массивов данных об осадках за периоды 1950–2024 и 1980–2024 гг. для температуры воздуха, 1966–2020 и 1982–2020 гг. для осадков. Для оценки использованы коэффициент корреляции Пирсона, среднеквадратичная ошибка и модифицированный критерий Клингга–Гупты. Температура воздуха в целом воспроизводится с высокой точностью, при этом наилучшие результаты демонстрируют GHCN CAMS, JRA-3Q и ERA5-Land. Воспроизведение осадков существенно сильнее зависит от типа продукта: наибольшее соответствие данным метеостанций в точках наблюдений показали продукты GPCC Full Data Monthly Product, GPCC Monitoring Product и CPC-Global для периода 1982–2020 гг., а для более длительного периода 1966–2020 гг. — GPCC Full Data Monthly Product, PREC/L и CRU TS4.09 в сочетании с WorldClim 2.1. Полученные результаты могут быть использованы при выборе входных климатических данных для различных исследований в бассейне р. Лены и арктической зоне его влияния.

Ключевые слова: сеточные климатические продукты, валидация климатических данных, бассейн р. Лены, температура воздуха, атмосферные осадки

Для цитирования: Андреева Д.О., Лебедева Л.С. Сравнительная оценка сеточных продуктов осадков и температуры воздуха по данным метеорологических станций в бассейне р. Лены. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2026;72(2):177–198. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-177-198>

Поступила 01.04.2026

После переработки 13.05.2026

Принята 21.05.2026

© Авторы, 2026

© Authors, 2026


Consistency of precipitation and air temperature across global climate products and ground-based observations in the Lena River basin

Daria O. Andreeva¹✉, Liudmila S. Lebedeva^{1,2}

¹ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

² Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

✉st095063@student.spbu.ru

 DOA,0009-0000-1565-1728; LSL, 0000-0002-7498-9902

Abstract. Information on air temperature and precipitation, often necessary for runoff modeling and forecasting, cannot always be obtained from ground-based observations. Therefore, the problem of selecting a source of climate data that is continuous in space and time becomes urgent. This paper evaluates the accuracy of 7 air temperature and 13 precipitation datasets for the Lena River basin in comparison with ground-based observations. For time series of average annual and seasonal air temperature and precipitation from 43 weather stations and climate products under consideration, the Pearson correlation coefficients, Root Mean Squared Error (*RMSE*), Kling–Gupta efficiency (*KGE'*) were calculated for two time periods: 1950–2024 and 1980–2024 for air temperature, 1966–2020 and 1982–2020 for precipitation. Correlation coefficients (average for the stations under consideration) with annual and seasonal mean air temperatures for 1980–2024, calculated from meteorological station observations, were found to range from 0.75 to 0.98 for all the products, while average *RMSE* ranged from 0.6 (GHCN CAMS) to 1.1 °C (NCEP-NCAR and NCEP/DOE Reanalysis) for annual mean temperatures. Climate products such as GHCN CAMS, JRA-3Q, ERA5-Land performed better than the others in reproducing air temperatures for both time periods. In the case of precipitation products, for the period 1982–2020 average correlation coefficients with ground-based observations ranged from 0.49 to 1.00, *RMSE* of annual precipitation totals was from 7 to 203 mm (the best results shown by GPCP Full Data Monthly Product, the worst — by NCEP-NCAR and NCEP/DOE reanalysis). For the period 1982–2020 the GPCP Full Data Monthly Product (*KGE'* for annual precipitation = 0.97), GPCP Monitoring Product (*KGE'* 0.84), CPC-Global (*KGE'* 0.83) datasets showed the best agreement with the ground-based observations. For the period 1966–2020, the best performance was shown by the GPCP Full Data Monthly Product, PREC/L, and data downscaled from CRU TS4.09 with WorldClim 2.1.

Keywords: gridded climate products, validation of climate data, Lena River basin, air temperature, total precipitation

For citation: Andreeva D.O., Lebedeva L.S. Consistency of precipitation and air temperature across global climate products and ground-based observations in the Lena River basin. *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(2):177–198. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-177-198>

Received 01.04.2026

Revised 13.05.2026

Accepted 21.05.2026

Введение

Температура воздуха и количество осадков на водосборе являются важнейшими факторами формирования стока, определяющими гидрологический режим водотоков. Информация о ходе этих характеристик применяется в качестве входных данных в моделях формирования стока, при проведении гидрологических расчетов, разработке методик прогнозирования, исследовании взаимосвязи между изменениями речного стока и климата. Использование при решении этих задач данных наземных наблюдений часто бывает затруднено неравномерностью сети метеостанций, недостаточной ее плотностью в северных районах и на Азиатской территории России (АТР), неоднородностью рядов и наличием пропусков в них. В связи с этим актуаль-

ным становится вопрос подбора источника непрерывных в пространстве и времени климатических данных, наиболее точно отражающих режим температуры воздуха и осадков на той или иной территории.

В настоящее время существует значительное число продуктов, предоставляющих с различным временным разрешением значения метеорологических переменных в узлах глобальной регулярной сети. Часть их основана исключительно на интерполяции данных наземных наблюдений, другие создаются на базе глобальных атмосферных моделей или данных дистанционного зондирования Земли [1]. Существует ряд исследований, в которых оценивается способность разных сеточных массивов климатических данных воспроизводить температуру воздуха и осадки в различных областях либо в целом по России [2–6]. В данной работе анализируется сходимость температур воздуха и сумм осадков за год и различные сезоны по различным климатическим продуктам и данным метеорологических станций на территории одного из крупнейших речных бассейнов РФ — реки Лены.

Бассейн р. Лены играет важную роль в формировании притока пресной воды в Северный Ледовитый океан и отличается широтной протяженностью, резкой континентальностью климата, значительной ролью криолитозоны и выраженной пространственной неоднородностью метеорологических условий. Для такой территории выбор климатического продукта принципиален как для задач моделирования речного стока, так и для исследований гидроклиматических изменений в арктической зоне. Несмотря на наличие работ, посвященных оценке отдельных реанализов и сеточных климатических массивов для России и отдельных ее регионов, для бассейна р. Лены до настоящего времени отсутствовала комплексная оценка широкого набора современных продуктов одновременно по температуре воздуха и осадкам, с анализом сезонных различий, пространственной неоднородности качества и сопоставлением результатов для рядов разной продолжительности.

Целью работы является сравнительная оценка сеточных климатических продуктов для воспроизведения температуры воздуха и атмосферных осадков в бассейне р. Лены по данным метеорологических станций. В задачи исследования входили: 1) оценка качества воспроизведения годовых и сезонных характеристик температуры воздуха и осадков различными продуктами; 2) анализ различий результатов для рядов разной продолжительности; 3) выявление пространственных особенностей точности воспроизведения климатических характеристик в пределах бассейна.

Объекты

Бассейн р. Лены площадью 2490 тыс. км² занимает значительную часть Восточной Сибири, простираясь от 53° до 72° с. ш. в широтном направлении и от 103° до 140° в. д. — в меридиональном. Рельеф значительной части водосбора представлен плоскогорьями, пластовыми плато и равнинами. Более расчлененный рельеф характерен для юга территории, где расположена Байкальская горноскладчатая область, и восточной окраины бассейна (Верхояно-Колымская горноскладчатая область), что препятствует поступлению тихоокеанских морских воздушных масс вглубь водосбора. Бассейн р. Лены практически полностью расположен в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты. Климат территории резко континентальный. В зимний период область оказывается под влиянием Азиатского антициклона [7]. По данным многолетних (1950–2024 гг.) наблюдений на метеорологических станциях, среднегодовые температуры воздуха изменяются от –2 °С на юго-западе области

до $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ на севере района. При этом в январе средние температуры составляют от $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$, в июле — от $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+19\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зима продолжительная, длится около 6–7 месяцев. Годовые суммы осадков в пределах бассейна р. Лены меняются от 200–300 мм в его северной части и на территории Центральной Якутии до 500–700 мм в южных горных областях. Большая часть осадков (более 70 %) выпадает в теплый период года, особенно в июле и августе¹.

Исходные данные и методы

Климатические сеточные данные. Для анализа были отобраны массивы данных о температуре воздуха и осадках, которые покрывают всю территорию бассейна р. Лены и временной охват которых включает период с начала 1980-х по настоящее время. Всего было рассмотрено 7 продуктов с данными о температуре воздуха и 13 — с данными об осадках, их краткое описание приведено в табл. 1.

Практически все рассматриваемые климатические продукты предоставляют данные в формате NetCDF (Network Common Data Form), ориентированном на многомерные массивы. Только данные набора CRU TS4.09, масштабированные с использованием продукта WorldClim 2.1 (далее обозначаемые как CRU TS4.09/WorldClim), были получены в виде комплекта растровых изображений в формате TIFF. Данные наблюдений метеостанций сравнивались с величинами температуры воздуха и суммы осадков, извлеченными из ближайших к ним узлов сетки. Все операции с исходными файлами обоих форматов (агрегирование в месячные значения при необходимости, получение значений климатических параметров в ближайших к метеостанциям узлах сетки) производились в среде MATLAB R2021b.

При верификации данных различных климатических продуктов были использованы ряды среднемесячных температур воздуха и месячных сумм осадков на 43 метеостанциях, расположенных в пределах бассейна р. Лены либо близких к его границам (рис. 1), которые были получены из базы данных ВНИИГМИ-МЦД².

При анализе сходимости температур воздуха и сумм осадков по данным метеорологических станций и различных климатических продуктов рассматривались два временных периода для каждой характеристики: 1950–2024 гг. и 1980–2024 гг. для температуры воздуха, 1966–2020 гг. и 1982–2020 гг. для осадков. Более короткие периоды выбирались таким образом, чтобы их полностью охватывали все рассматриваемые продукты. Использование двух периодов позволило значительно расширить список сравниваемых климатических продуктов, так как многие из них имеют временной охват, начинающийся с 1979–1982 гг. (NCEP/DOE Reanalysis 2, CPC-Global, GPCP, CMAP, MERRA-2, GPCP Monitoring Product). В случае осадков первый период начинается с 1966 г., а не с более раннего времени, так как в этот год была нарушена однородность рядов наблюдений на метеорологических станциях в связи с вводом поправок на смачивание осадкомерного ведра. Сравнение продуктов об осадках выполнено за период вплоть до 2020 г., что обусловлено отсутствием более поздних данных в массиве GPCP Full Data Monthly Product.

¹ Официальный сайт ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». Режим доступа: <http://meteo.ru/data/> (дата обращения: 16.06.2025).

² Там же.

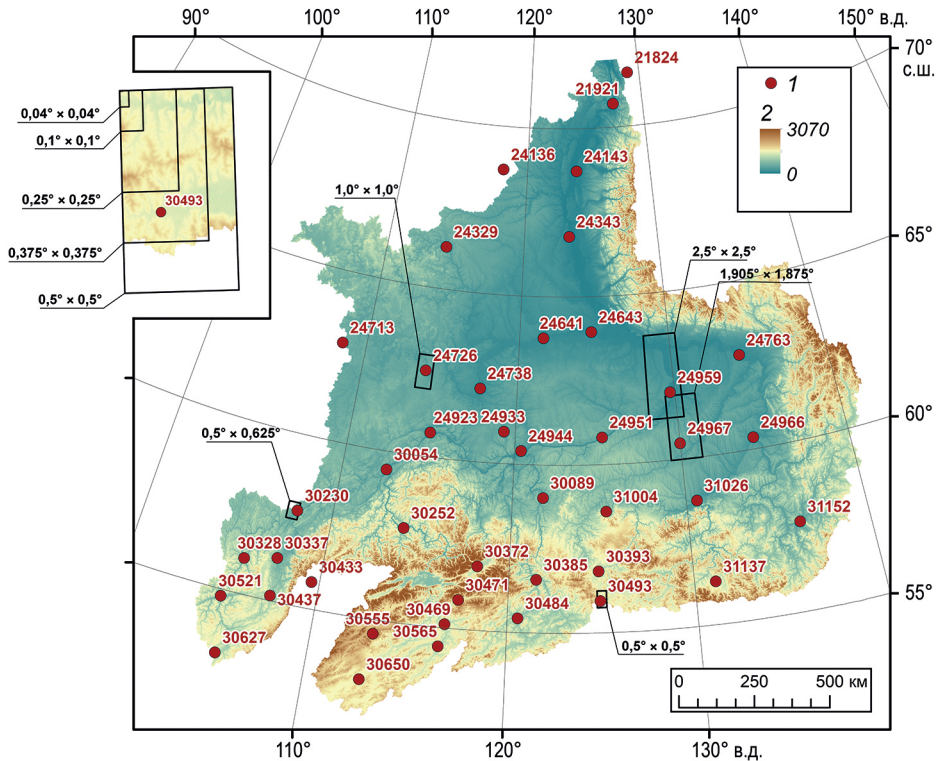


Рис. 1. Метеостанции, данные наблюдений которых использовались при верификации данных различных климатических продуктов.

1 — метеостанции и их синоптические индексы; 2 — высота, м над уровнем моря. Также на рисунке показан размер ячейки сетки различных продуктов

Fig. 1. Weather stations whose observation data were used to verify the climate product data.

1 — Weather stations and their synoptic indices; 2 — Altitude, m above sea level. The figure also shows the cell size of the different product data

При сравнении точности различных продуктов был использован ряд критериев [21–23]:

1) коэффициент корреляции Пирсона (CC), определяющий силу и направление линейной связи между двумя переменными:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}},$$

где x_i — оценочное значение в ячейке сетки i ; y_i — фактическое значение, полученное в результате наблюдения; \bar{x} , \bar{y} — выборочные средние; n — количество наблюдений;

2) среднеквадратичная ошибка ($RMSE$) — мера отклонения между данными наблюдений и оценочными данными:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2};$$

Таблица 1

Характеристики климатических массивов данных, рассмотренных в работе

Table 1

Массив данных	Географический охват	Временной охват	Пространственное разрешение	Временное разрешение	Тип продукта / источник данных	Ссылка	Ссылка на источник данных
Температура воздуха							
CRU TS4.09	Глобальный (суша)	1901–2024	0,5°×0,5°	1 месяц	На основе наземных наблюдений	Harris et al. (2020)	https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/9cf07e92afaa405da4f40b6733f362d3/
ERA5-Land	Глобальный (суша)	1950 — н. в.	0,1°×0,1°	1 час	Модельный реанализ	Muñoz-Sabater et al. (2021)	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview
GHCN CAMS	Глобальный (суша)	1948 — н. в.	0,5°×0,5°	1 месяц	На основе наземных наблюдений	Fan and Van den Dool (2008)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ghecams.html
JRA-3Q	Глобальный	1947 — н. в.	0,375°×0,375°	6 часов	Модельный реанализ	Kosaka et al. (2024)	https://gdex.ucar.edu/datasets/d64000/#
MERRA-2	Глобальный	1980 — н. в.	0,5°×0,625°	1 час	Модельный реанализ	Gelaro et al. (2017)	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2TINXSLV_5.12.4/summary?keywords=MERRA-2
NCEP-NCAR Reanalysis 1	Глобальный	1948 — н. в.	1,9°×1,875°	6 часов	Модельный реанализ	Kalnay et al. (1996)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep_reanalysis.html
NCEP/DOE Reanalysis 2	Глобальный	1979 — н. в.	1,9°×1,875°	6 часов	Модельный реанализ	Kanamitsu et al. (2002)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep_reanalysis2.html
Осадки							
CMAP	Глобальный	1979 — н. в.	2,5°×2,5°	5 дней	На основе спутниковых данных и наземных наблюдений	Xie and Arkin (1997)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cmap.html
CPC-Global	Глобальный (суша)	1979 — н. в.	0,5°×0,5°	1 день	На основе наземных наблюдений	Chen et al. (2008)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html

CRU TS4.09	Глобальный (суша)	1901–2024	$0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$	1 месяц	На основе наземных наблюдений	Harris et al. (2020)	https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/9cf07e92afaa405da4f40b6733f362d3/
ERA5-Land	Глобальный (суша)	1950 — н. в.	$0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$	1 час	Модельный реанализ	Муñoz-Sabater et al. (2021)	https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land?tab=overview
GPCC Full Monthly Product	Глобальный (суша)	1891–2020	$0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$	1 месяц	На основе наземных наблюдений	Becker et al. (2013)	https://opendata.dwd.de/climate_environment/GPCC/html/fulldata-monthly_v2022_doi_download.html
GPCC Monitoring Product	Глобальный (суша)	1982 — н. в.	$1,0^{\circ} \times 1,0^{\circ}$				https://opendata.dwd.de/climate_environment/GPCC/html/gpcc_monitoring_v20
GPCP	Глобальный	1979 — н. в.	$2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$	1 месяц	На основе спутниковых данных и наземных наблюдений	Adler et al. (2003)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcp.html
JRA-3Q	Глобальный	1947 — н. в.	$0,375^{\circ} \times 0,375^{\circ}$	1 час	Модельный реанализ	Kosaka et al. (2024)	https://gdex.ucar.edu/datasets/d640000/#
MERRA-2	Глобальный	1980 — н. в.	$0,5^{\circ} \times 0,625^{\circ}$	1 час	Модельный реанализ	Gelaro et al. (2017)	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M21NXSLV_5.12.4/summary?keywords=MERRA-2
NCEP-NCAR Reanalysis 1	Глобальный	1948 — н. в.	$1,9^{\circ} \times 1,875^{\circ}$	6 часов	Модельный реанализ	Kalnay et al. (1996)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep_reanalysis.html
NCEP/DOE Reanalysis 2	Глобальный	1979 — н. в.	$1,9^{\circ} \times 1,875^{\circ}$	6 часов	Модельный реанализ	Kanamitsu et al. (2002)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep_reanalysis2.html
PREC/L	Глобальный (суша)	1948 — н. в.	$0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$	1 месяц	На основе наземных наблюдений	Chen et al. (2002)	https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.prcel.html
CRU TS4.09/WorldClim 2.1	Глобальный (суша)	1950–2024	$0,04^{\circ} \times 0,04^{\circ}$	1 месяц	Уменьшенный масштаб данных CRU-TS4.09	Harris et al. (2020); Fick and Hijmans (2017)	https://www.worldclim.org/data/monthlyv2.html

3) модифицированный критерий Клинга–Гупты (KGE'), при оценке уравнивающего вклад корреляции, смещения и изменчивости (диапазон от $-\infty$ до 1, где 1 указывает на идеальное соответствие):

$$KGE' = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2},$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\bar{y}},$$

$$\gamma = \frac{CV_x}{CV_y},$$

где CV_x и CV_y — коэффициенты вариации метеорологических величин, полученных по данным климатических продуктов и данным наблюдений метеостанций.

Результаты

Температура воздуха. Средний коэффициент корреляции между рядами рассчитанной по данным наблюдений на метеостанциях и определенной по данным различных климатических продуктов температурой воздуха за период 1980–2024 гг. составил более 0,90 для года и четырех сезонов в случае всех продуктов, кроме NCEP-NCAR Reanalysis 1 (далее — NCEP-NCAR), NCEP/DOE Reanalysis 2 (далее — NCEP/DOE) (рис. 2, табл. 2). Наиболее высокие значения данного критерия получили продукты ERA5-Land, GHCN CAMS и JRA-3Q (средний по используемым метеостанциям CC от 0,95 до 0,98 во все сезоны). Для отдельных метеостанций полученные для этих наборов данных значения CC за год и сезоны не опускались ниже 0,65.

Наименьшая среднеквадратичная ошибка в зимний, осенний сезон и в целом за год, средняя по всем метеостанциям, выявлена для данных GHCN CAMS (1,2, 0,7 и 0,6 °C соответственно). Весной и летом минимальное среднее $RMSE$ получено для данных ERA5-Land (0,8 и 0,6 °C). Для продуктов CRU TS4.09, JRA-3Q,

Таблица 2

Медианные значения критериев соответствия для различных продуктов, описывающих температуру воздуха для 1980–2024 гг. ($CC / RMSE, ^\circ C / KGE'$)

Table 2

Median values of the compliance criteria for different products describing air temperature for 1980–2024 ($CC / RMSE, ^\circ C / KGE'$)

Климатический продукт	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
CRU TS4.09	0,92 / 1,7 / 0,80	0,95 / 1,0 / 0,64	0,93 / 0,8 / 0,82	0,95 / 1,0 / 0,73	0,95 / 0,9 / 0,79
ERA5-Land	0,95 / 2,2 / 0,87	0,97 / 0,8 / 0,82	0,96 / 0,6 / 0,84	0,96 / 0,9 / 0,84	0,97 / 0,9 / 0,81
GHCN CAMS	0,96 / 1,2 / 0,85	0,98 / 1,0 / 0,74	0,95 / 1,0 / 0,88	0,97 / 0,7 / 0,86	0,97 / 0,6 / 0,84
JRA-3Q	0,95 / 1,4 / 0,90	0,98 / 0,9 / 0,79	0,97 / 0,7 / 0,90	0,97 / 0,9 / 0,86	0,97 / 0,8 / 0,83
MERRA-2	0,91 / 1,9 / 0,84	0,95 / 1,7 / 0,42	0,94 / 1,0 / 0,80	0,92 / 1,5 / 0,73	0,91 / 0,9 / 0,73
NCEP-NCAR Reanalysis 1	0,86 / 4,1 / 0,77	0,86 / 2,9 / 0,10	0,77 / 1,6 / 0,62	0,88 / 1,6 / 0,68	0,82 / 1,1 / 0,63
NCEP/DOE Reanalysis 2	0,89 / 5,1 / 0,75	0,88 / 2,3 / 0,47	0,75 / 1,4 / 0,63	0,90 / 1,1 / 0,78	0,87 / 1,1 / 0,72

Consistency of precipitation and air temperature across global climate products...

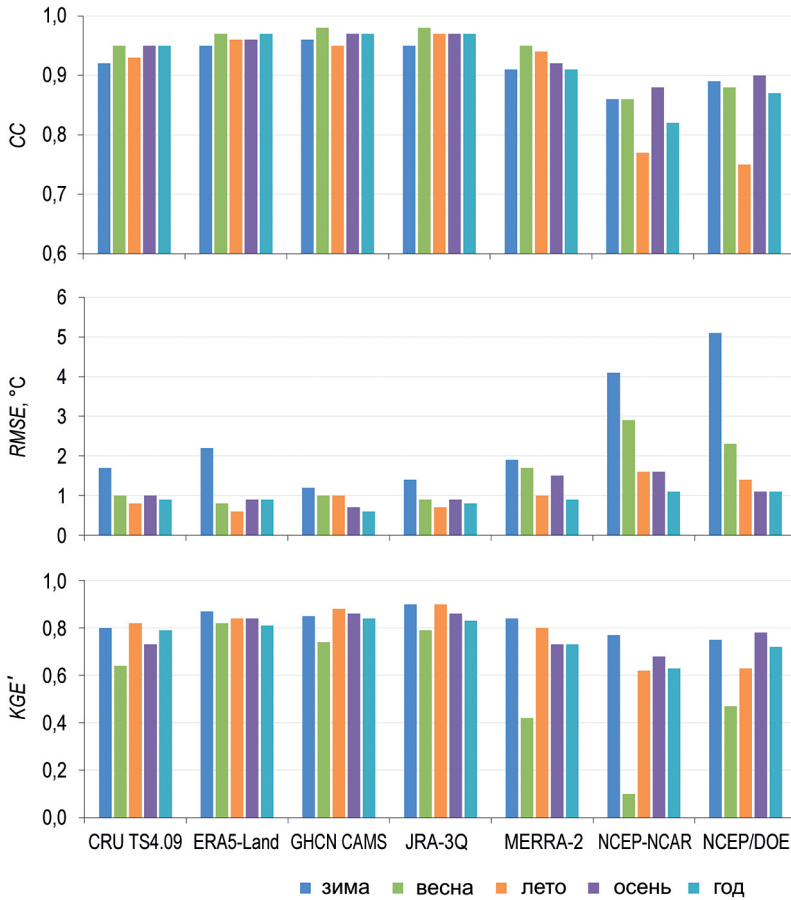


Рис. 2. Гистограмма медианных значений CC , $RMSE$ и KGE' для различных продуктов, описывающих температуру воздуха (для периода 1980–2024 гг.)

Fig. 2. Histogram of median CC , $RMSE$ and KGE' values for different air temperature products (for the period 1980–2024)

MERRA-2 почти во все сезоны получены близкие к этим значениям среднеквадратичные ошибки, в то время как у реанализов NCEP-NCAR и NCEP/DOE они зимой возрастают до 4–5 °C.

Согласно критерию Клинга–Гупты, весенние температуры воздуха за 1980–2024 гг. всеми продуктами воспроизводятся хуже температур за другие сезоны (см. рис. 2). Как показывает рис. 3а, в этот сезон метеостанции с отрицательным KGE' зафиксированы в случае всех массивов данных, кроме реанализа ERA5-Land, а в случае реанализа NCEP-NCAR таких станций почти половина — 21 из 43. Среднее по метеостанциям значение KGE' для зимних либо летних температур в большинстве случаев выше, чем для остальных сезонов. Наибольшая средняя величина KGE' для годовых температур отмечается в случае данных GHCN CAMS (0,84), для зимних и летних — реанализа JRA-3Q (0,90), весенних — ERA5-Land (0,82), осенних — GHCN CAMS и JRA-3Q (0,86).

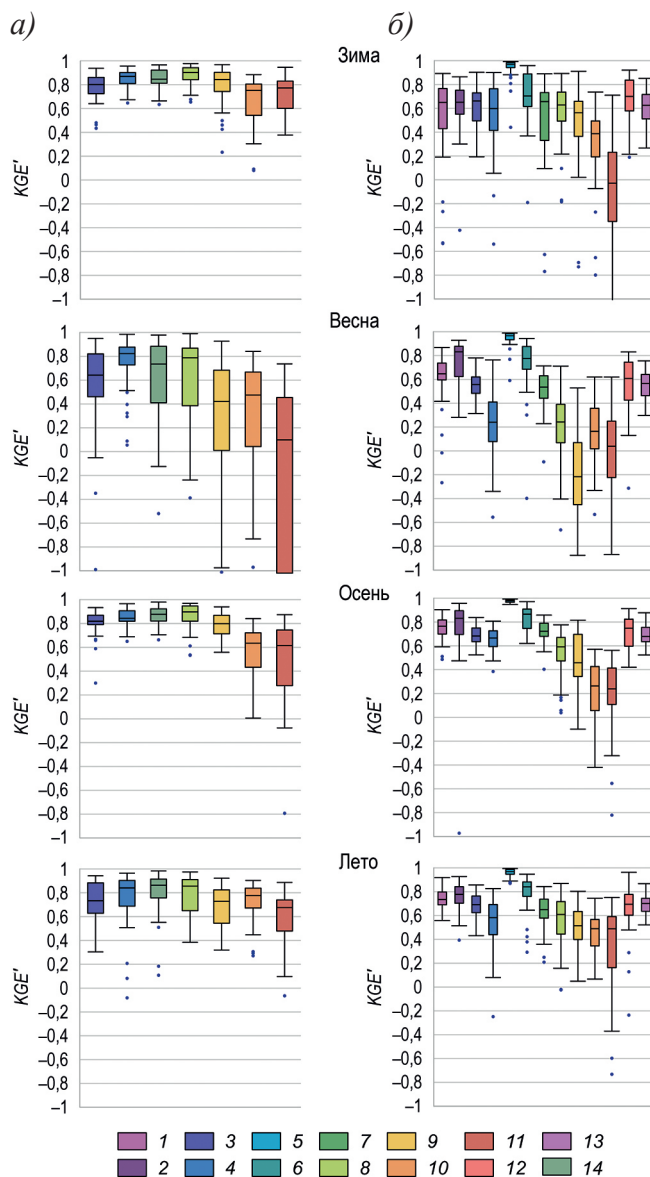


Рис. 3. Ящики с усами KGE' средней температуры воздуха (а) и осадков (б) за отдельные сезоны для различных климатических продуктов.

1 — CMAP, 2 — CPC-Global, 3 — CRU TS4.09, 4 — ERA5-Land, 5 — GPCC Full Data, 6 — GPCC Monitoring Product, 7 — GPCP, 8 — JRA-3Q, 9 — MERRA-2, 10 — NCEP/DOE Reanalysis 2, 11 — NCEP-NCAR Reanalysis 1, 12 — PREC/L, 13 — CRU TS4.09/WorldClim, 14 — GHCN CAMS

Fig. 3. KGE' box plots of annual and seasonal mean air temperature (a) and total precipitation (b) for various climate products.

Notation: 1 — CMAP, 2 — CPC-Global, 3 — CRU TS4.09, 4 — ERA5-Land, 5 — GPCC Full Data, 6 — GPCC Monitoring Product, 7 — GPCP, 8 — JRA-3Q, 9 — MERRA-2, 10 — NCEP/DOE Reanalysis 2, 11 — NCEP-NCAR Reanalysis 1, 12 — PREC/L, 13 — CRU TS4.09/WorldClim, 14 — GHCN CAMS

При рассмотрении температур воздуха за период 1950–2024 гг. были получены аналогичные результаты: в различные сезоны и по разным критериям лучшие показатели имеют продукты JRA-3Q, GHCN CAMS либо ERA5-Land. Средние значения CC , $RMSE$ и KGE' при этом незначительно отличаются от величин, рассчитанных для 1980–2024 гг.

Часто меньшие значения KGE' среднегодовых температур воздуха встречаются на метеостанциях, расположенных на юго-западе бассейна Лены, что в той или иной степени характерно почти для всех продуктов (рис. 4). Так, в точках метеостанций в районе Верхней Лены (до впадения Витима) величина KGE' составляет менее 0,70 в случае реанализа JRA3-Q. Менее 0,66 — в большинстве пунктов в области верхних частей бассейна Лены, Витима по данным реанализа ERA5-Land. У некоторых продуктов с высотой наблюдается увеличение разброса значений KGE' . Например, для реанализа ERA5-Land на метеостанциях, расположенных ниже 170 м, данный

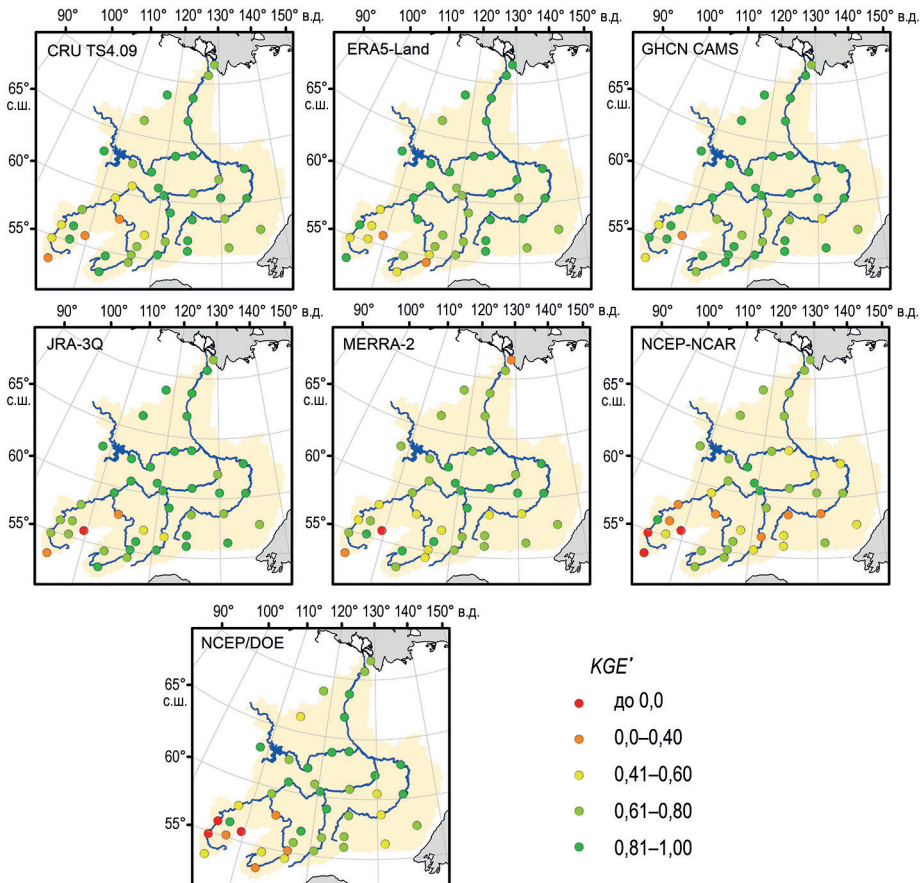


Рис. 4. Пространственное распределение KGE' для различных источников данных о температурах воздуха (для среднегодовых температур за 1980–2024 гг.)

Fig. 4. Spatial distribution of KGE' for different air temperature datasets (for annual mean temperatures for 1980–2024)

параметр составляет от 0,80 и выше, а на высотах более 400 м может снижаться до 0,20 в отдельных пунктах наблюдений. В случае всех остальных продуктов, за исключением NCEP/DOE и JRA-3Q, подобная связь не прослеживается. Однако минимальные величины KGE' всегда наблюдаются на станциях высотой более 200 м. Величины $RMSE$ оказались не связаны с высотой пункта наблюдений. Обычно более слабая корреляция между данными наблюдений и всех массивов присутствует на юге бассейна. Обратная связь выявлена между высотой метеостанций и значениями CC у всех продуктов, кроме NCEP-NCAR и NCEP/DOE. Наиболее сильна она в случае реанализов MERRA-2 (коэффициент корреляции с высотой составил $-0,49$), ERA5-Land ($-0,39$), CRU TS4.09 ($-0,36$).

Средняя по используемым метеостанциям температура воздуха за 1980–2024 гг. оказалась в той или иной степени занижена всеми продуктами, кроме ERA5-Land и NCEP/DOE (табл. 3). Пространственное распределение средних за этот период температур воздуха лучше всего передали данные GHCN CAMS согласно всем рассмотренным критериям (CC , $RMSE$, KGE').

Таблица 3

Соответствие среднемноголетних годовых температур воздуха, полученных из различных климатических продуктов, данным метеостанций (за 1980–2024 гг.)

Table 3

Correspondence of mean annual air temperatures obtained from various climate products to weather station data (for 1980–2024)

Климатический продукт	Средняя по метеостанциям температура воздуха, °С/год	Отклонение от данных метеостанций, °С	CC	$RMSE$, °С	KGE'
CRU TS4.09	-7,1	-0,3	0,95	0,98	0,89
ERA5-Land	-6,1	0,7	0,96	1,05	0,87
GHCN CAMS	-6,9	-0,1	0,96	0,81	0,93
JRA-3Q	-7,3	-0,6	0,96	0,99	0,83
MERRA-2	-7,4	-0,6	0,91	1,36	0,82
NCEP-NCAR	-7,3	-0,5	0,86	1,62	0,79
Reanalysis 1					
NCEP/DOE	-6,2	0,5	0,90	1,39	0,87
Reanalysis 2					

Осадки. В случае осадков оценка проводилась для большего числа климатических продуктов. Для большинства из них средний по всем метеостанциям коэффициент корреляции с данными наземных наблюдений за 1982–2020 гг. составил более 0,70 как для годовых сумм осадков, так и для различных сезонов (рис. 5). Ниже уровень корреляции годовых осадков у реанализов NCEP-NCAR и NCEP/DOE (табл. 4). Лучшие же результаты по этому критерию показывают продукты GPCC Full Data Monthly Product (далее — GPCC FD) (1,00), GPCC Monitoring Product (далее — GPCC MP) (0,90), CPC-Global (0,90) и GPCP (0,89). Весной и летом коэффициенты корреляции с данными наблюдений метеостанций у этих продуктов также выше, чем у других, а осенью данные CPC-Global уступают по величине CC ряду продуктов (см. табл. 4). В зимний сезон с данными наземных наблюдений сильнее коррелируют продукты GPCC FD, GPCP, CRU TS4.09/WorldClim и CRU TS4.09 (средний по рассматриваемым метеостанциям CC более 0,84).

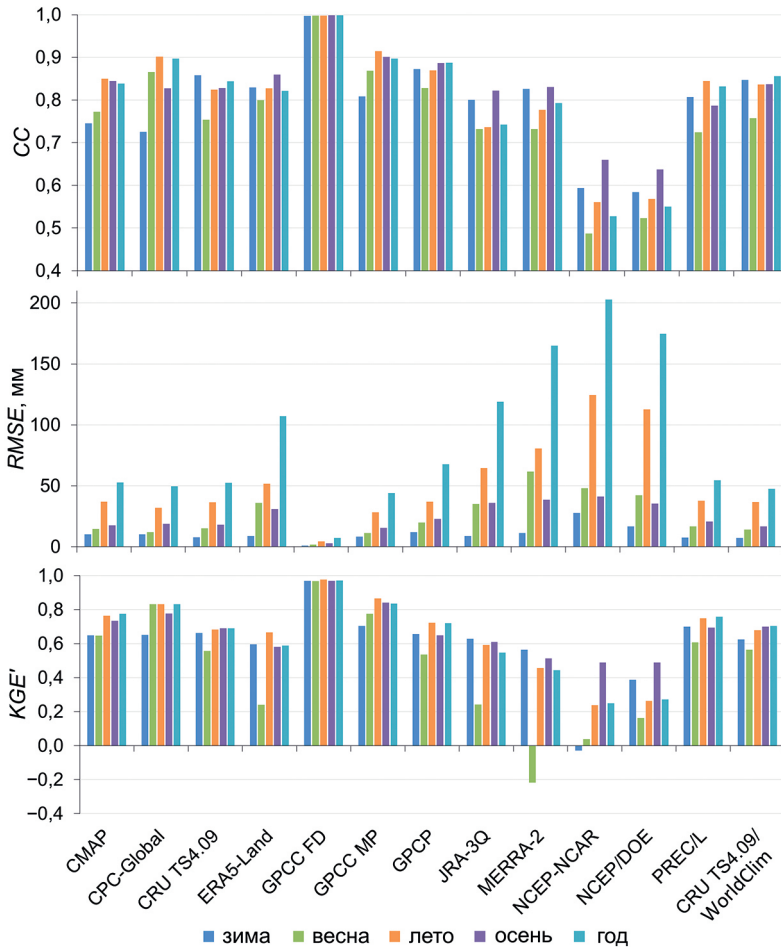


Рис. 5. Гистограмма медианных значений CC , $RMSE$ и KGE' для различных продуктов, описывающих осадки (для периода 1982–2020 гг.)

Fig. 5. Histogram of median CC , $RMSE$ and KGE' values for different precipitation products (for the period 1982–2020)

Большая среднеквадратичная ошибка характерна для продуктов, являющихся модельными реанализами: NCEP-NCAR, NCEP/DOE, MERRA-2, JRA-3Q, ERA5-Land. В их случае среднее по метеостанциям $RMSE$ годовых осадков составило более 100 мм, в то время как у остальных продуктов — 68 мм и менее. Наиболее низкие значения ошибки выявлены в случае обоих продуктов GPCC (7 мм у GPCC FD, 44 мм у GPCC MP), а также продукта CRU TS4.09/WorldClim (47 мм). Осенью эти наборы данных также имеют наименьшую среднеквадратичную ошибку (см. табл. 4). Весной менее 13 мм $RMSE$ составляет у продуктов GPCC FD, GPCC MP, CPC-Global. Летом среднеквадратичная ошибка минимальна у данных GPCC FD (5 мм), GPCC MP (28 мм).

В большинстве случаев средняя по рассматриваемым метеостанциям величина KGE' годовых осадков для разных продуктов превышает 0,68, меньшие значения

Таблица 4

Медианные значения критериев соответствия для различных продуктов, описывающих осадки, для периода 1982–2020 гг. ($CC / RMSE$, мм / KGE')

Table 4

Median values of the fit criteria for different precipitation products for the period 1982–2020 ($CC / RMSE$, mm / KGE')

Климатический продукт	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
CMAP	0,75 / 10 / 0,65	0,77 / 15 / 0,65	0,85 / 37 / 0,76	0,84 / 18 / 0,73	0,84 / 53 / 0,78
CPC-Global	0,73 / 10 / 0,65	0,87 / 12 / 0,83	0,90 / 32 / 0,83	0,83 / 19 / 0,78	0,90 / 50 / 0,83
CRU TS4.09	0,86 / 8 / 0,66	0,75 / 15 / 0,56	0,82 / 36 / 0,68	0,83 / 18 / 0,69	0,84 / 52 / 0,69
ERA5-Land	0,83 / 9 / 0,60	0,80 / 36 / 0,24	0,83 / 52 / 0,67	0,86 / 31 / 0,58	0,82 / 107 / 0,59
GPCC FD	1,00 / 1 / 0,97	1,00 / 2 / 0,97	1,00 / 5 / 0,98	1,00 / 3 / 0,97	1,00 / 7 / 0,97
GPCC MP	0,81 / 8 / 0,70	0,87 / 11 / 0,77	0,91 / 28 / 0,87	0,90 / 16 / 0,84	0,90 / 44 / 0,84
GPCP	0,87 / 12 / 0,66	0,83 / 20 / 0,54	0,87 / 37 / 0,72	0,89 / 23 / 0,65	0,89 / 68 / 0,72
JRA-3Q	0,80 / 9 / 0,63	0,73 / 35 / 0,24	0,74 / 64 / 0,59	0,82 / 36 / 0,61	0,74 / 119 / 0,55
MERRA-2	0,83 / 11 / 0,56	0,73 / 62 / -0,22	0,78 / 81 / 0,46	0,83 / 39 / 0,51	0,79 / 165 / 0,44
NCEP-NCAR Reanalysis 1	0,59 / 28 / -0,03	0,49 / 48 / 0,04	0,56 / 125 / 0,24	0,66 / 41 / 0,49	0,53 / 203 / 0,25
NCEP/DOE Reanalysis 2	0,58 / 17 / 0,39	0,52 / 42 / 0,16	0,57 / 113 / 0,26	0,64 / 35 / 0,49	0,55 / 175 / 0,27
PREC/L	0,81 / 8 / 0,70	0,72 / 17 / 0,61	0,84 / 38 / 0,75	0,79 / 21 / 0,70	0,83 / 55 / 0,76
CRU TS4.09/WorldClim	0,85 / 7 / 0,62	0,76 / 14 / 0,57	0,84 / 37 / 0,68	0,84 / 17 / 0,70	0,86 / 47 / 0,70

характерны для модельных реанализов (см. табл. 4). Наиболее высокие значения показателя у данных GPCC FD (0,97), GPCC MP (0,84), CPC-Global (0,83). В зимний сезон KGE' , равное 0,70 и более, наблюдается в случае продуктов GPCC FD, PREC/L, GPCC MP. В остальные сезоны, помимо обоих наборов данных GPCC, высокий относительно остальных продуктов KGE' характерен для данных CPC-Global. Хуже всего воспроизводятся зимние и весенние осадки реанализом NCEP-NCAR, а также весенние реанализом MERRA-2 (KGE' от -0,22 до 0,04). Рис. 3б показывает, что только в случае трех продуктов KGE' на отдельных метеостанциях во все сезоны не опускается ниже нуля: CRU TS4.09, GPCC FD, CRU TS4.09/WorldClim.

Анализ пространственного распределения величин KGE' показывает, что реанализ JRA-3Q хуже воспроизводит годовые осадки в южной части рассматриваемой территории, в то время как для данных MERRA-2 наблюдается обратная ситуация — в этом районе встречаются наиболее высокие значения KGE' (рис. 6). В целом у некоторых модельных реанализов величина этого критерия связана с высотой пункта наблюдений (прямо — у MERRA-2, обратно — у JRA-3Q, в меньшей степени у ERA5-Land). Аналогичные связи наблюдаются у данных MERRA-2 и JRA-3Q между высотой и величиной CC . В то же время у реанализа ERA5-Land, как и у остальных продуктов, эти параметры слабо зависят друг от друга. Более низкие значения CC в южной или юго-западной части бассейна Лены обнаружены у данных CMAP, CRU TS4.09, JRA-3Q, NCEP-NCAR, NCEP/DOE, CRU TS4.09/WorldClim. Возрастающие $RMSE$ с высотой выявлено у многих источников данных. Наиболее значительно

Consistency of precipitation and air temperature across global climate products...

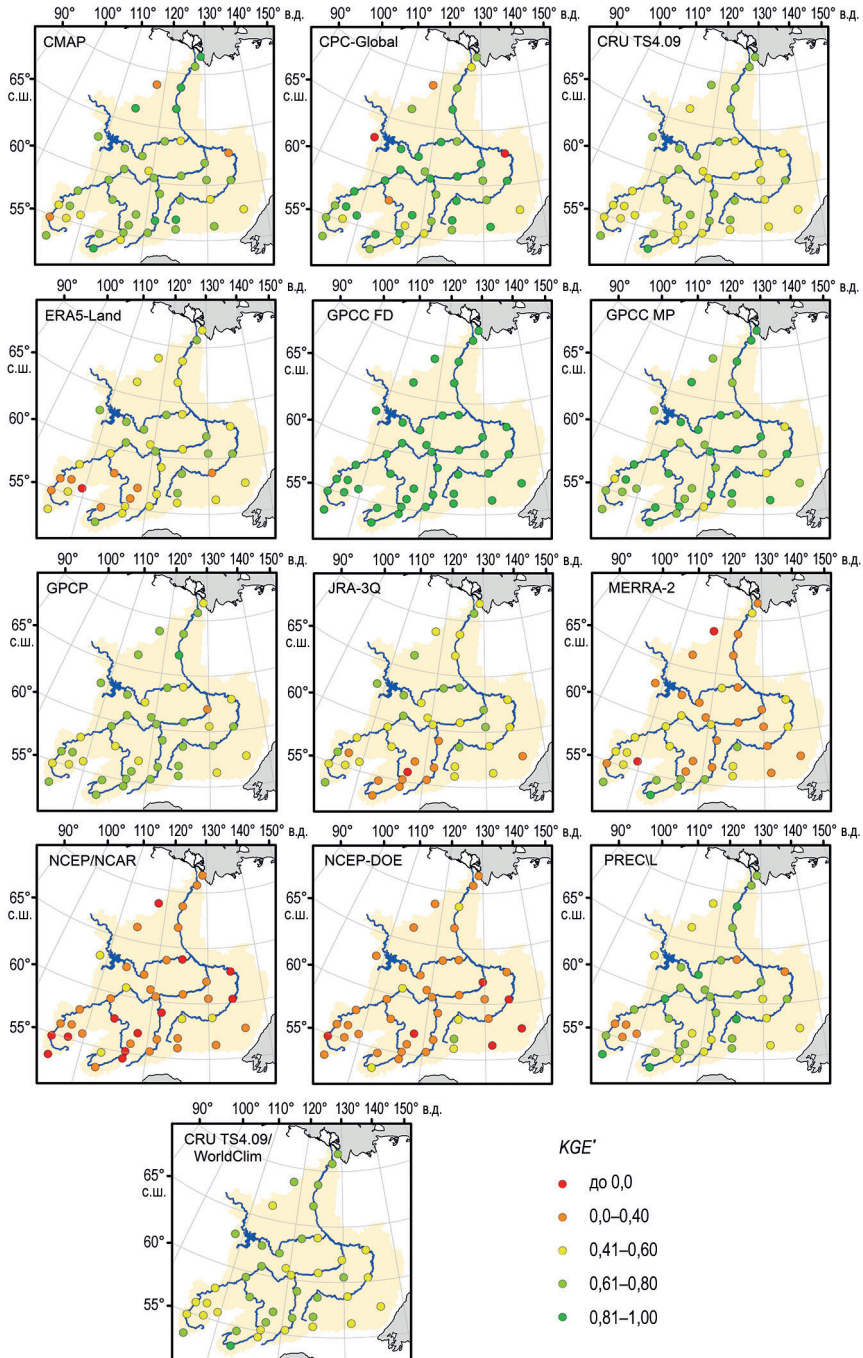


Рис. 6. Пространственное распределение KGE' для различных продуктов данных об осадках (для периода 1982–2020 гг.)

Fig. 6. Spatial distribution of KGE' for different precipitation data products (for the period 1982–2020)

оно проявляется у продуктов JRA-3Q, CRU TS4.09 и CRU TS4.09/WorldClim, ERA5-Land, в меньшей степени — у GPCC MP, GPCC FD, CPC-Global. В целом у всех климатических продуктов среднеквадратичные ошибки больше на метеостанциях южной части территории, исключение составили данные GPCP и MERRA-2.

Среди наборов данных об осадках, охватывающих период с 1966 по 2020 г., наиболее высок уровень корреляции с данными метеостанций у продукта GPCC FD (0,99–1,00 для года и отдельных сезонов). Также чуть более высокие значения *CC*, чем у остальных продуктов, имеют данные CRU TS4.09 и CRU TS4.09/WorldClim (0,77–0,82). *RMSE* за 1966–2020 гг. для GPCC FD составило в районе 1–10 мм за год и сезоны, для CRU TS4.09/WorldClim, PREC/L, CRU TS4.09 — от 7–8 мм в зимний сезон до 35–38 мм в летний. У реанализов ERA5-Land, JRA-3Q, NCEP-NCAR среднеквадратичная ошибка имеет большие значения и, например, в летний период доходит до 56, 73 и 132 мм соответственно. Согласно критерию *KGE'*, данные GPCC FD точнее всего воспроизводят результаты наблюдений на метеостанциях (0,96–0,97 для осадков за год и сезоны). При этом для продукта PREC/L получены более высокие значения критерия Клинга–Гупты (0,64–0,76), чем для CRU TS4.09/WorldClim и CRU TS4.09 (0,57–0,66). Для модельных реанализов величина *KGE'* за 1966–2024 гг. составила от 0,19 весной до 0,61 зимой у ERA5-Land, JRA-3Q и от –0,12 зимой до 0,33 осенью у NCEP-NCAR.

Среднее по всем метеостанциям за 1982–2020 гг. годовое количество осадков оказалось завышено реанализами NCEP-NCAR, MERRA-2, NCEP/DOE, JRA-3Q,

Таблица 5

**Соответствие среднемноголетних годовых сумм осадков,
полученных из различных климатических продуктов, данным метеостанций
(за период 1982–2020 гг.)**

Table 5

**Correspondence between average annual precipitation amounts
obtained from various climate products and meteorological station data
(for the period 1982–2020)**

Климатический продукт	Средняя по метеостанциям сумма осадков, мм/год	Отклонение от данных метеостанций, мм	<i>CC</i>	<i>RMSE</i> , мм	<i>KGE'</i>
CMAP	385	+2,4	0,90	44	0,86
CPC-Global	364	–19	0,96	35	0,91
CRU TS4.09	387	+4,8	0,87	48	0,78
ERA5-Land	495	+112	0,88	131	0,68
GPCC FD	383	+0,31	1,00	8	0,97
GPCC MP	382	–0,67	0,98	22	0,91
GPCP	436	+54	0,89	70	0,70
JRA-3Q	513	+131	0,79	162	0,57
MERRA-2	557	+175	0,80	189	0,48
NCEP-NCAR	574	+191	0,35	305	–0,09
Reanalysis 1					
NCEP/DOE	519	+137	0,63	173	0,49
Reanalysis 2					
PREC/L	380	–2,9	0,96	29	0,88
CRU TS4.09/ WorldClim	379	–3,2	0,98	22	0,92

ERA5-Land более чем на 100 мм (табл. 5). Наиболее точно среднемноголетние осадки переданы продуктами GPCC FD, GPCC MP, CMAP, PREC/L (расхождение менее 3 мм). Более высок уровень корреляции между средними за 1982–2020 гг. осадками на различных станциях в случае данных GPCC FD, GPCC MP, CRU TS4.09/WorldClim, CPC-Global, PREC/L (CC от 0,96 до 1,00). С меньшей $RMSE$ пространственное распределение среднемноголетних осадков отображают продукты GPCC FD (8 мм), GPCC MP и CRU TS4.09/WorldClim (22 мм), PREC/L (29 мм). Наиболее высокая величина KGE' наблюдается у данных GPCC FD, CRU TS4.09/WorldClim, GPCC MP, CPC-Global (KGE' от 0,97 до 0,91).

Обсуждение

Анализ сходимости данных о температуре воздуха наземных наблюдений с данными разных климатических продуктов за период 1980–2024 и 1950–2024 гг. показал, что большая их часть отображает температурные условия за год и сезоны с достаточно высокой точностью. Наиболее слабое соответствие наблюдалось в случае реанализов NCEP-NCAR и NCEP/DOE, имеющих самое низкое пространственное разрешение. Лучше всего температуры воздуха за сезоны и год воспроизводят массивы GHCN CAMS, JRA-3Q и ERA5-Land в оба рассматриваемых периода (табл. 6). Первый продукт интерполирует данные наземных наблюдений, два других являются модельными реанализами. Показано, что набор GHCN CAMS точнее отражает пространственное распределение среднегодовых температур воздуха за многолетний период. В целом результаты данного исследования подтверждают выводы из работы [5], где было выявлено, что для значительной части рассматриваемой территории массивы ERA5-Land и GHCN-CAMS лучше воспроизводят температуру воздуха либо ее изменение, чем данные CRU TS4.09 и NCEP-NCAR.

Осадки в пунктах наблюдений, согласно всем критериям, лучше отображают данные GPCC Full Data (см. табл. 6). Этот продукт часто используется в качестве эталонного при оценке качества других наборов климатических данных, так как он основан на результатах наблюдений наиболее полного массива метеостанций [1, 24].

Таблица 6

Климатические продукты, показавшие наиболее высокие результаты согласно используемым критериям

Table 6

Climate products with the best performance according to the criteria used

Продукт	CC	$RMSE$	KGE'	Продукт	CC	$RMSE$	KGE'
Среднегодовая температура воздуха							
1950–2024 гг.				1980–2024 гг.			
ERA5-Land	0,97	0,9	0,83	ERA5-Land	0,97	0,9	0,81
GHCN CAMS	0,97	0,6	0,83	GHCN CAMS	0,97	0,6	0,84
JRA-3Q	0,97	0,8	0,82	JRA-3Q	0,97	0,8	0,83
Годовое количество осадков							
1966–2020 гг.				1982–2020 гг.			
GPCC FD	1,00	10	0,96	GPCC FD	1,00	7	0,97
PREC/L	0,80	50	0,71	GPCC MP	0,90	44	0,84
CRU TS4.09/ WorldClim	0,81	47	0,63	CPC-Global	0,90	50	0,83

Например, в основе продукта GPCC Full Data Monthly Product Version 2022 лежат данные из 86000 пунктов наблюдений. Для сравнения, при создании набора GPCC Monitoring Product Version 2020 массив исходных данных содержал информацию по 7000–9000 метеостанциям, что примерно на порядок меньше. Однако, как было показано в работе [6], интерполяционный продукт GPCC FD имеет признаки переподогнанной модели. Следствием этого является то, что качество интерполяции сильно зависит от количества и расположения ассимилируемых метеостанций, является неоднородным во времени. Также стоит отметить, что высокая точность воспроизведения осадков в точках метеостанций не характеризует качество интерполяции в пространство между ними, что стоит помнить при оценке и других продуктов, основанных на данных наземных наблюдений.

Из числа продуктов, использующих как основу данные метеостанций либо их сочетание со спутниковой информацией, более высокие результаты за период 1982–2020 гг. имел набор данных GPCC MP. Среди остальных источников климатической информации сложно выделить тот, который превосходил бы другие. Показываемые ими результаты меняются от сезона к сезону, а также от критерия к критерию. Какие-то продукты лучше воспроизводят изменение осадков во времени: GPCP, а в случае весенних, летних и годовых осадков — еще и CPC-Global. Другие массивы данных дают меньшие величины $RMSE$, как, например, CRU TS4.09/WorldClim. Критерий KGE' , дающий комплексную оценку соответствия данных, за период 1982–2020 гг. в среднем по метеостанциям имеет наиболее высокие значения у массивов GPCC (FD и MP) и продукта CPC-Global, за исключением зимнего сезона в случае последнего. Среди источников данных об осадках, имеющих временной охват, начинающийся с середины прошлого века или раньше, CRU TS4.09/WorldClim в основном превосходит другие продукты (за исключением GPCC FD) по таким критериям, как корреляция с данными метеостанций и величина среднеквадратичной ошибки. При этом данные CRU TS4.09, на которых основан данный набор, имеют практически равные величины CC за год и сезоны, но слегка большие $RMSE$ (разница, однако, не превышает 5 мм). Массив PREC/L в то же время имеет более высокие значения KGE' для осадков за год и сезоны (см. табл. 6).

Модельные реанализы, такие как NCEP-NCAR, NCEP/DOE, MERRA-2, JRA-3Q, в меньшей степени ERA5-Land, показали значительные отклонения от данных наземных наблюдений. Среднее по используемым метеостанциям количество осадков за многолетний период оказалось ими завышено более чем на 100 мм, и для этих массивов данных характерны большие значения $RMSE$, чем для продуктов, интерполирующих данные наземных наблюдений. При этом уровень корреляции с суммами осадков, наблюдаемыми на метеостанциях, за период 1982–2020 гг. у реанализа ERA5-Land сопоставим со значениями, показываемыми данными CRU TS4.09 и CRU TS4.09/WorldClim. Остальные модельные реанализы менее точно отображают изменение осадков во времени.

Сравниваемые климатические продукты различаются по пространственному разрешению, что необходимо учитывать при интерпретации результатов. Поскольку значение в узле сетки соответствует осредненному значению для ячейки, в пределах которой находится метеостанция, увеличение размера этой ячейки ведет к росту ошибки. Отчасти этим могут быть обусловлены низкие значения всех критериев, полученные для реанализов NCEP-NCAR и NCEP/DOE. В то же время для продук-

тов с шагом сетки $0,5^\circ$ и менее влияние масштаба явным образом не сказалось на результатах. Например, в случае температур воздуха продукты GHCN CAMS (разрешение $0,5^\circ$) и JRA-3Q ($0,375^\circ$) демонстрируют более высокие показатели, чем ERA5-Land ($0,1^\circ$). Что касается осадков, набор CRU TS4.09/WorldClim ($0,04^\circ$) показал лишь незначительное улучшение по сравнению с немасштабированными данными CRU TS4.09 ($0,5^\circ$). Также стоит отметить, что интерполяционные продукты с существенно более крупной сеткой — CMAP, GPCP с разрешением $2,5^\circ$ — практически не уступают многим продуктам, пространственное разрешение которых составляет $0,5^\circ$ и мельче. Однако различия в масштабе могли негативно повлиять на показатели некоторых продуктов.

Расхождения в значениях статистических критериев также могут быть связаны с особенностями выбранного временного периода, особенно в полярных регионах на фоне выраженной нестационарности современного климата. Даже небольшие сдвиги по периодам внутри выборки способны вызвать значимые различия в значениях критериев для разных продуктов. Чтобы сравнение было более корректным, в данном исследовании временные интервалы подбирались таким образом, чтобы они охватывались всеми используемыми массивами климатических данных.

Многими продуктами, как интерполяционными, так и реанализами, с меньшей достоверностью воспроизводятся температуры воздуха в южной горной части бассейна р. Лены. Для района севернее 60° с. ш., в т. ч. для заполярной области, были получены более удовлетворительные результаты. Например, средняя по станциям в этом районе величина KGE' среднегодовых температур составила более 0,80 для большей части продуктов (исключениями являются MERRA-2, NCEP-NCAR, NCEP/DOE), а на отдельных станциях KGE' менее 0,40 было получено лишь в одном случае (MERRA-2, Тикси). У годовых осадков в большинстве случаев распределение высоких и низких значений KGE' более случайное. Большая точность воспроизведения осадков для северного региона по сравнению с южным ярче проявляется у отдельных массивов данных (JRA-3Q, ERA5-Land), а в одном случае наблюдается и обратная картина (MERRA-2). При этом агрегированный характер модифицированного критерия Клинга–Гупты, объединяющего оценку корреляции, смещения и изменчивости, затрудняет интерпретацию того, чем конкретно вызваны пространственные различия в значениях данного критерия. Анализ распределения коэффициента корреляции, как одной из составляющих KGE' , показал, что как для массивов данных о температурах воздуха, так и для ряда продуктов об осадках характерно большее расхождение с данными наземных наблюдений в южной части территории.

Заключение

Выполнена оценка качества воспроизведения различными климатическими продуктами температур воздуха и сумм осадков на территории бассейна р. Лены. Для 43 пунктов, в пределах которых расположены метеорологические станции, чьи данные использовались при валидации, были получены ряды температур воздуха и осадков на основе 7 продуктов, содержащих информацию о температурах воздуха, и 13 источников данных об осадках. Сравнение полученных рядов с результатами наземных наблюдений проводилось путем расчета для них таких критериев, как коэффициент корреляции Пирсона, среднеквадратичная ошибка, модифицированный критерий Клинга–Гупты.

Температуру воздуха точнее всего воспроизводят (в периоды 1950–2024 и 1980–2024 гг.) продукты JRA-3Q, ERA5-Land, GHCN CAMS. В их случае CC равен 0,97 для среднегодовых температур; $RMSE$ составило 0,6 °C для набора GHCN CAMS, чуть выше его значения у реанализов JRA-3Q (0,8 °C) и ERA5-Land (0,9 °C). Величина KGE' также имеет более удовлетворительное значение у продукта GHCN CAMS — 0,84 за период 1980–2024 гг., в то время как для двух других наборов за этот же период KGE' чуть ниже: 0,83 у реанализа JRA-3Q, 0,81 у реанализа ERA5-Land. Среди продуктов, описывающих осадки, труднее выделить тот, который лучше отображает режим увлажнения исследуемой территории. Согласно используемым критериям, наибольшую точность имеют данные GPCC Full Data Monthly Product (KGE' оказался равным 0,96 и 0,97 для двух периодов), однако по имеющимся данным нельзя сделать вывод о качестве интерполяции в области между метеорологическими станциями. Меньшей точностью, чем у данных GPCC Full Data Monthly Product, но большей, чем у реанализов NCEP-NCAR Reanalysis 1, NCEP/DOE Reanalysis 2, MERRA-2, JRA-3Q, характеризуются такие наборы данных об осадках, как GPCC Monitoring Product (KGE' 0,84) и CPC-Global (KGE' 0,83) для 1982–2020 гг., PREC/L (KGE' 0,71) и CRU TS4.09/WorldClim (KGE' 0,63) для 1966–2020 гг.

Выявлена пространственная неоднородность качества воспроизведения климатических характеристик. Более низкие значения критериев чаще наблюдаются в южной, юго-западной и горной частях бассейна, где сильнее проявляется влияние орографии и региональной контрастности климатических условий.

Полученные результаты могут быть использованы при выборе климатических входных данных для задач гидрологического моделирования, анализа гидроклиматических изменений и оценки формирования стока в бассейне р. Лены как одном из крупнейших источников пресной воды, поступающей в Северный Ледовитый океан.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИОКТР № 126020516689–6 (ИМЗ СО РАН).

Competing interests. The authors have no conflict of interest to declare.

Financing. The study was carried out within the framework of R&D project No. 126020516689–6 (MPI, SB RAS).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Sun Q., Miao C., Duan Q., Ashouri H., Sorooshian S., Hsu K.-L. A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*. 2018;56:79–107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
2. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2022;86(3):435–446. <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
Grigorev V.Yu., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M. Spatial and Temporal Variability of ERA5 Precipitation Accuracy over Russia. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2022;86(3):435–446. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062>
3. Титкова Т.Б., Ананичева М.Д. Использование реанализа ERA5-Land и данных метеостанций в горных районах России для оценки изменения ледниковых систем Восточной Сибири и Дальнего Востока. *Лед и Снег*. 2023;63(2):199–213. <https://doi.org/10.31857/S2076673423020163>

- Titkova T.B., Ananicheva M.D. Using ERA5-Land Reanalysis and Data from Weather Stations in the Mountainous Regions of Russia to Assess Changes in the Glacial Systems of Eastern Siberia and the Far East. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2023;63(2):199–213. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673423020163>
4. Морейдо В.М., Терский П.Н., Абрамов Д.В. Оценка качества воспроизведения метеорологических характеристик несколькими моделями атмосферного реанализа на территории Крымского полуострова. *Водные ресурсы*. 2024;51(6):731–742. <https://doi.org/10.31857/S0321059624060011>
Moreido V.M., Terskii P.N., Abramov D.V. Assessing the reproduction quality of meteorological characteristics by several atmospheric reanalysis models on the territory of Crimean peninsula. *Water Resources*. 2024;51:873–881. <https://doi.org/10.1134/S0097807824701215>
 5. 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(30):88–101. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.30.2.008>
Tananaev N.I. Selection of the best-performing climate reanalysis models for the Sakha (Yakutia) Republic based on mean annual air temperature. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series Earth Sciences*. 2023;2(30):88–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.30.2.008>
 6. 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):61–72. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-61-72>
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;30(1):61–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-61-72>
 7. Протасьев М.С. (ред.). *Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 17. Лено-Индижирский район*. Л.: Гидрометеониздат; 1972. 629 с.
 8. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D. G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*. 2021;13:4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
 9. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS4.09 monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*. 2020;7:109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
 10. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996;77(3):437–472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
 11. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S., Hnilo J. J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002;83:1631–1644. <https://doi.org/10.1175/BAMS-83-11-1631>
 12. Fan Y., Van den Dool H. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. 2008;113:D01103. <https://doi.org/10.1029/2007JD008470>
 13. Gelaro R., McCarty W., Suárez M., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C., Darmenov A., Bosilovich M., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A., Gu W., Kim G., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S., Sienkiewicz M., Zhao B. The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*. 2017;30(14):5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>

14. Kosaka Y., Kobayashi S., Harada Y., Kobayashi C., Naoe H., Yoshimoto K., Harada M., Goto N., Chiba J., Miyaoka K., Sekiguchi R., Deushi M., Kamahori H., Nakaegawa T., Tanaka T.Y., Tokuhito T., Sato Y., Matsushita Y., Onogi K. The JRA-3Q Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2024;Ser.II, 102(1):49–109. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2024-004>
15. Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf B., Schamm K., Schneider U., Ziese M. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth System Science Data*. 2013;5:71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>
16. Chen M., Xie P., Janowiak J.E., Arkin P.A. Global Land Precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *Journal of Hydrometeorology*. 2002;3:249–266. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2)
17. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 2017;37(12):4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
18. Chen M., Shi W., Xie P., Silva V.B., Kousky V.E., Wayne Higgins R., Janowiak J.E. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysics*. 2008;113:D04110. <https://doi.org/10.1029/2007JD009132>
19. Adler R.F., Huffman G.J., Chang A., Ferraro R., Xie P., Janowiak J.E., Rudolf B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D.T., Gruber A., Susskind J., Arkin P.A., Nelkin E. The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *Journal of Hydrometeorology*. 2003;4:1147–1167. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2)
20. Xie P., Arkin P.A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997;78(11):2539–2558. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2539:GPAYMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2539:GPAYMA>2.0.CO;2)
21. Ebert E.E. Methods for verifying satellite precipitation estimates. In: V. Levizzani, P. Bauer, F.J. Turk (eds.). *Measuring Precipitation From Space*. Dordrecht: Springer; 2007. P. 345–356.
22. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 2009;377:80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
23. Kling H., Fuchs M., Paulin M. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*. 2012;424–425: 264–277. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>
24. Hu X., Zhou Z., Xiong H., Gao Q., Cao X., Yang X. Inter-comparison of global precipitation data products at the river basin scale. *Hydrology Research*. 2024;55(1):1–16. <https://doi.org/10.2166/nh.2023.062>