



Оригинальная статья

Подбор оптимальной модели климатического реанализа по годовой сумме осадков для территории Республики Саха (Якутия)

Н. И. Тананаев^{1,2}

¹Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

tanni@s-vfu.ru

Аннотация

Региональные сценарные климатические прогнозы требуют знания исходного «базового климата», в частности, пространственного распределения годовой суммы осадков в современных климатических условиях в пределах региона. Данные о годовой сумме осадков за период с 1961 по 2020 г. по 40 метеостанциям на территории Республики Саха (Якутия) использованы для оценки точности моделей реанализа CRU TS, ERA5-Land, GPCC, NCEP-NCAR, PREC/L и JRA55 и выбора оптимальной модели реанализа. Оценка точности реанализа выполнялась сравнением данных наблюдений со значением поля реанализа в пикселе, в котором расположена метеостанция. В статистическом анализе использовались метрики сходства: коэффициент конкордации Лина, индекс согласия Вильмота, тау-критерий Кендалла, среднеквадратичная ошибка. Интерполяционные модели реанализа (CRU TS, GPCC, PREC/L) точнее воспроизводят наблюдаемые данные, тогда как модельные реанализы завышают сумму осадков на 100 мм/год и более (от 30 до 50 %), а также недооценивают изменение суммы осадков. Модель GPCC наиболее точно воспроизводит наблюдения, однако при этом имеет признаки «переподгонки», наиболее значимый из которых – отрицательная пространственная корреляция среднесезонных полей годовой суммы осадков за разные климатические периоды. В результате оптимальной для территории РС(Я) по годовой сумме осадков признана модель CRU TS 4, точнее прочих воспроизводящая изменение суммы осадков. Модель CRU TS 4 допустимо использовать в качестве модели «базового климата». По данным CRU TS 4, среднегодовая сумма осадков на территории РС(Я) в 1991–2020 гг. составляет 293 ± 92 мм; в 1961–1990 гг. она была равна 285 ± 81 мм. Между двумя климатическими периодами, следовательно, годовая сумма осадков в РС(Я) выросла на 8 ± 18 мм, что не является статистически значимой величиной.

Ключевые слова: годовая сумма осадков, региональный климат, климатические изменения, метеонаблюдения, климатический реанализ, пространственная скоррелированность

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-27-00344 «Климатические изменения и деградация криолитозоны в северных регионах Российской Федерации: Регионально-специфические стратегии адаптации».

Для цитирования: 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>

Original article

Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Republic of Sakha (Yakutia) based on mean annual precipitation

Nikita I. Tananaev^{1,2}

¹Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

²Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

tanni@s-vfu.ru

Abstract

Regional scenario-based projections require a comprehensive understanding of baseline climatic conditions, particularly the spatial distribution of total mean annual precipitation within the region. Precipitation data from 40 meteorological stations across the Republic of Sakha (Yakutia) for the period from 1961 to 2020 were used to evaluate the

performance of modern reanalyses: CRU TS, ERA5-Land, GPCC, NCEP-NCAR, PREC/L, and JRA55. The performance of each model was assessed by comparing the observed mean annual precipitation to the reanalysis field values in pixels corresponding to the locations of the observation points. The statistical assessment employed Lin's coefficient of concordance, Wilmott's index of agreement, Kendall's tau, and the root mean square error. Interpolation-based models (CRU TS, GPCC, PREC/L) demonstrated a superior ability to reproduce observed total precipitation, whereas modeling-based reanalyses tended to overestimate it by more than 100 mm/year, or by 30% to 50%. The GPCC reanalysis exhibited the best performance when compared to observations; however, it appeared to be significantly overfitted, as evidenced by a substantial negative spatial correlation between total precipitation coverages for the periods from 1961 to 1990 and 1991 to 2020. Consequently, the interpolation uncertainty associated with overfitting precludes the use of GPCC data as a reliable benchmark. Ultimately, the CRU TS 4 reanalysis was determined to be optimal as a baseline for total precipitation coverage. According to CRU TS 4 data, the mean annual precipitation across the Republic of Sakha (Yakutia) was 285 ± 81 mm for the period from 1961 to 1990 and 293 ± 92 mm for 1991 to 2020, indicating an insignificant change of 8 ± 18 mm. Thus, between the two climatic periods, the annual precipitation in the Republic of Sakha (Yakutia) increased by 8 ± 18 mm, a change that is not statistically significant.

Keywords: mean annual precipitation, regional climate, climate change, meteorological data, climate reanalyses, spatial correlation

Funding. This study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 22-27-00344 "Climate change and permafrost degradation in the northern regions of the Russian Federation: Regionally-specific adaptation strategies".

For citation: 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>

Введение

Увлажненность территории – одна из основных характеристик климата, которая определяет региональные особенности гидрологического цикла, условия формирования экосистем, включая почвы и растительность, устойчивость водных ресурсов [1]. Суммарный годовой слой осадков входит в перечень важнейших климатических переменных, опубликованный Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Основным источником данных об атмосферных осадках – материалы сетевых точечных наблюдений на метеостанциях, однако их однородность и достоверность в современной литературе обсуждаются. Возможная неоднородность рядов осадков связана с переносом станций либо со сменой стандартных измерительных приборов. В СССР таким моментом считается переход от дождемеров с защитой Нифера к осадкомерам Третьякова, для компенсации которого были разработаны методы приведения рядов к однородности [2]. Достоверность данных снижается под влиянием ветрового переноса осадков, в первую очередь – зимнего периода, когда во время метелей часть осадков из осадкомера выдувается [3] либо же осадкомер заполняется занесенными в него «ложными» осадками [4, 5]. Для коррекции данных также разрабатывались и применялись различные поправки [6]. По данным работ [7, 8], суммарная величина поправок может достигать 40 %, а в среднем для северных регионов составляет 28 %. В результате, для атмосферных осадков не существует

единого референсного массива данных [9, 10]. Большинство исследований, в том числе национальный Оценочный доклад по изменениям климата [10], используют массив ВНИИГМИ-МЦД, в котором в наблюдения введены поправки на смачивание, а в данные до 1966 г. – также поправки на приведение данных дождемера к показаниям осадкомера.

Климатический реанализ создает осредненные поля осадков, используя методы ассимиляции и интерполяции дискретных наблюдений метеостанций, методы краткосрочного прогноза и гидродинамического моделирования, а в последние десятилетия – также данные спутниковых наблюдений [11]. Построение полей осадков – сложная задача, поскольку в моменте поле осадков никогда не непрерывно, в отличие от поля температуры воздуха или атмосферного давления. Радиус пространственной корреляции в полях осадков намного меньше, чем температуры воздуха, 450 км и 1200 км соответственно [12]; с увеличением расстояния корреляция быстро затухает. В результате в моделях реанализа, построенных только на ассимиляции станционных наблюдений, на участках, удаленных от метеостанций, могут возникать интерполяционные артефакты; кроме того, количество станций может меняться, и возможны ситуации, когда поле осадков на некоторой территории в разные периоды определяется интерполяцией разных станций, расположенных на различном расстоянии [12].

В моделях реанализа, использующих элементы гидродинамического моделирования, точность интерполяции на недостаточно изученных территориях будет определяться в основном точностью использованной модели. В моделях реанализа, использующих также спутниковые данные, неоднородность рядов может быть связана с различной точностью спутниковых инструментов, данные которых использованы в расчетах [7]. В связи с такой неоднородностью не каждая модель реанализа: (а) имеет одинаковую точность во все климатические интервалы, причем разные модели могут иметь разные характеристики точности; (б) пригодна для оценок направленных изменений, поскольку есть вероятность, что часть выделенного тренда связана с погрешностями интерполяции, а не с реальными тенденциями [12].

Модели реанализа различаются по пространственному и временному охвату и разрешению, и, как следствие, по решаемым с их помощью задачам. Данная работа посвящена подбору оптимальной модели реанализа по годовой сумме осадков для территории Республики Саха (Якутия). Основные направления, в которых могут быть использованы полученные результаты: (1) количественная оценка исторических изменений годовой суммы осадков на территории РС(Я); (2) сравнение точности климатических моделей в этом регионе с точки зрения воспроизведения исторических изменений (эксперимент CMIP6 ‘historical’); (3) использование в качестве «базового климата» для ансамблевого прогноза по основным климатическим сценариям.

Материалы и методы

Исходными материалами для работы послужила база данных ГГО и ВНИИГМИ-МЦД, содержащая сведения о годовой и месячной сумме осадков на 457 станциях на территории России и сопредельных государств [13, 14]. На территории РС(Я) расположено 40 станций, для которых доступны указанные данные. Из полного массива были выбраны только значения наблюдаемых месячных сумм осадков. В период до 1965 г. (включительно) эти значения представляют собой данные дождемеров, приведенные к показаниям осадкомеров согласно [2], в 1966 г. – данные наблюдений плюс постоянная поправка на смачивание, равная 0,2, с 1967 г. – данные наблюдений с поправкой на смачивание в соответствии с [15].

В работе использованы данные основных климатических реанализов за период с 1961 по 2020 г. Данный временной интервал необходим для расчета годовой суммы осадков за базовый климатический период 1961–1990 г., утвержденный ВМО, и сравнения с данными глобальных климатических моделей. Использованы реанализы:

1. CRU TS (Climate Research Unit Time Series), Университет Восточной Англии, Великобритания, версии 4.05, 4.06 и 4.07; реанализ полей месячных сумм осадков на сетке разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ [12, 16–18].

2. ERA5-Land, Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), Великобритания; реанализ полей месячных сумм осадков на сетке разрешением $0,1 \times 0,1^\circ$ [19].

3. GPCC (Global Precipitation Climatology Centre), Немецкая служба погоды (DWD), версия 2022; реанализ полей месячных сумм осадков на сетке разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ [20, 21].

4. NCEP-NCAR Reanalysis 1, Национальная администрация по изучению атмосферы и океана (NOAA), США; реанализ полей суточных сумм осадков, пересчитанных из четырехсрочных данных на сетке разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$ [22, 23].

5. PREC/L (Precipitation Reconstruction over Land), Национальная администрация по изучению атмосферы и океана (NOAA), США; реанализ полей месячных сумм осадков на сетке разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$ [24, 25].

6. JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis), Японское метеорологическое агентство (JMA); реанализ полей месячных сумм осадков, пересчитанных из четырехсрочных данных на сетке разрешением $0,5625 \times 0,5625^\circ$ [26, 27].

Статистическая обработка данных выполнялась в RStudio [28], графическом интерфейсе пользователя для языка R [29], с помощью набора авторских скриптов на основе библиотек ‘tidync’ и ‘ncmeta’. Табличные данные климатических реанализов осреднялись для репрезентативных климатических периодов (1961–1990, 1971–2000, 1981–2010, 1991–2020 гг.) и преобразовывались в растровый формат с исходным пространственным разрешением каждой модели, а затем при необходимости приводились к единому пространственному разрешению $0,5 \times 0,5^\circ$ в QGIS 3.22.11 [30], ГИС с открытым исходным кодом. В QGIS также рассчитывалось ΔP , мм, изменение годовой суммы осадков между периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. С полученных растровых покрытий снимались значения годово-

вой суммы осадков в пикселях, соответствующих координатам метеостанций; эти значения затем использовались в корреляционном анализе и анализе качества моделей.

В расчете показателей описательной статистики использовались встроенные функции *mean()* и *median()*, пакет **'base'** для расчета среднего и медианы, а также *skewness()* и *kurtosis()*, пакет **'e1072'** для расчета коэффициентов асимметрии и эксцесса соответственно. Оценка точности реанализов относительно наблюдений выполнялась с помощью следующих показателей: τ , ранговый тау-критерий Кендалла (функция *cor.test()*, пакет **'stats'**); CCC, коэффициент конкордации Лина (функция *CCC()*, пакет **'DescTools'**); d , индекс согласия Вильмотта (функция *dr()*, пакет **'ie2misc'**); *RMSE*, среднеквадратичная ошибка, СКО (функция *rmse()*, пакет **'ie2misc'**). Пространственная корреляция между разновременными растрами оценивалась с помощью коэффициента пространственной корреляции Пирсона (функция *rasterCorrelation()*, пакет **'spatialEco'**), в скользящем окне размером 3×3 пикселя.

Результаты и обсуждение

Описательная статистика. Реанализы осадков заметно различаются по средним значениям годовой суммы осадков и другим статистическим характеристикам (табл. 1). Реанализы, основанные на ассимиляции данных наблюдений (CRU TS, GPCC, PREC/L), очевидно, ближе к данным наблюдений, чем реанализы, основанные на моделировании (ERA5-Land, NCEP-NCAR, JRA55), по факту интерполяционного подхода к их созданию. Отметим, что высокая точность реанализов определяется только относительно метеостанций и не характеризует точность интерполяции в пространстве между точками их расположения.

Модельные реанализы имеют тенденцию завышать годовую сумму осадков и имеют, как следствие большее среднеквадратичное отклонение (см. табл. 1). Интерполяционные реанализы имеют меньшую асимметрию и эксцесс, чем данные наблюдений; из этого ряда выбивается реанализ GPCC, по этим показателям приближающийся к статистикам наблюдаемых данных. На данном этапе анализа это уже позволяет предположить, что модель GPCC имеет признаки *overfitted model*, т. е. переподогнанной модели, излишне зависящей от исходных данных.

Как и в случае со среднегодовой температурой воздуха [31], наибольший интерес представ-

ляет то, как реанализы воспроизводят изменение годовой суммы осадков между периодами. Все модели, кроме NCEP-NCAR, воспроизводят увеличение средней по массиву годовой суммы осадков между периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. В случае NCEP-NCAR решающее значение имеет пространственное разрешение модели, $2,5 \times 2,5^\circ$, недостаточное для учета небольшого радиуса корреляции полей осадков.

Модельные реанализы, даже с высоким пространственным разрешением, занижают прирост годовой суммы осадков; прирост медианного значения близок к нулю (ERA5) или меньше нуля (NCEP-NCAR, JRA55). С этим связано и сохранение положительной асимметрии в их распределении, тогда как в данных наблюдений и интерполяционных моделей она близка к нулю или отрицательна, что приближает распределение ΔP к нормальному. Положительная асимметрия, в свою очередь, «утяжеляет» левый хвост распределения, вследствие чего эксцесс близок к нулю (ERA5, JRA55).

Точность моделей реанализа. Интерполяционные модели реанализа точнее воспроизводят данные наблюдений на метеостанциях, чем основанные на гидродинамическом моделировании (табл. 2), что в целом для территории РФ было ранее показано по данным предыдущих поколений реанализов и на их более узком наборе [7]. При выборе оптимальной модели реанализа, следовательно, следует обращать внимание на другие аспекты: (1) точность воспроизведения ΔP между периодами и (2) точность пространственной интерполяции, описания поля осадков между пунктами наблюдений.

Интерполяционные реанализы точнее, чем модельные, воспроизводят также и изменение годовой суммы осадков между периодами (см. табл. 2). Здесь отметим низкую точность реанализа NCEP-NCAR с околонулевыми значениями критериев точности. Значения СКО, нормированные на медианное значение ΔP по данным наблюдений (28,5), меньше единицы для интерполяционных реанализов и больше – для модельных, что указывает на значительный разброс в данных последних. В итоге, задача подбора оптимального реанализа для описания годовой суммы осадков на территории РС(Я) сводится к выбору среди интерполяционных моделей реанализа: CRU TS, GPCC, PREC/L, в котором предпочтение должно быть отдано той модели, которая имеет наиболее адекватный интерполяционный механизм.

**Основные статистические характеристики наборов данных метеостанций и реанализов
(в соответствующих пикселях)**

Table 1

**Descriptive statistics of total precipitation datasets obtained
from meteorological stations and reanalyses (data derived from the corresponding pixels)**

Период	M/c	CRU4.05	CRU4.06	ERA5	GPCC	NCEP	PREC/L	JRA55
Среднее								
1961–1990	305	308	314	417	310	464	309	423
1971–2000	314	308	313	422	314	458	307	429
1981–2010	324	316	321	423	324	463	314	434
1991–2020	329	322	327	420	330	448	324	430
ΔP	24,5	13,2	13,2	2,9	19,6	-16,4	15,2	6,5
Медиана								
1961–1990	280	282	280	372	286	420	282	388
1971–2000	287	286	284	374	290	432	290	386
1981–2010	294	293	290	376	294	418	294	391
1991–2020	300	302	300	370	302	386	302	378
ΔP	28,5	12,5	12,5	1,0	23	-12,5	19,0	-3,0
Среднеквадратичное отклонение								
1961–1990	109	107	103	140	108	247	115	124
1971–2000	121	114	110	149	119	234	121	132
1981–2010	127	117	113	150	127	238	123	138
1991–2020	133	122	118	148	132	240	125	136
ΔP	35,5	22,5	22,8	17,5	34,5	35,3	17,8	32,6
Коэффициент асимметрии								
1961–1990	1,30	0,98	1,06	1,23	1,29	1,22	1,12	1,17
1971–2000	1,26	0,94	1,02	1,26	1,19	1,17	1,11	1,21
1981–2010	1,29	0,93	1,02	1,31	1,27	1,16	1,09	1,20
1991–2020	1,21	0,88	0,96	1,31	1,19	1,31	1,02	1,14
ΔP	-0,12	0,11	0,08	0,68	-0,01	0,26	-0,32	0,57
Коэффициент эксцесса								
1961–1990	1,16	0,22	0,35	0,25	1,05	2,39	0,74	0,27
1971–2000	1,10	0,21	0,41	0,40	0,91	2,31	0,74	0,33
1981–2010	1,28	0,31	0,54	0,60	1,27	1,89	0,78	0,29
1991–2020	1,26	0,28	0,40	0,56	1,22	2,39	0,67	0,09
ΔP	-0,32	-0,55	-0,66	0,05	-0,33	-0,44	-0,76	0,00

Точность реанализов, в особенности модельных, возрастает со временем (см. табл. 2). Действительно, годовая сумма осадков в среднем по набору данных наблюдений увеличивается быстрее, чем в модельных реанализах, что автоматически приближает данные последних к наблюдаемой реальности и повышает оценки их точности.

Показатели точности моделей реанализа (см. табл. 2) отдадут предпочтение модели GPCC, затем CRU TS и PREC/L, в порядке убывания точ-

ности. Однако, как уже отмечалось выше, модель GPCC имеет признаки переподгонки, что видно также в значениях коэффициента корреляции Лина, равных 1, и значениях других метрик. Проблема переподогнанных моделей, в случае поля годовых осадков, заключается в их зависимости от данных метеостанций и исключительной чувствительности к их пространственной конфигурации. В результате, если количество ассимилируемых моделью станций или их расположение меняется со временем, качест-

**Показатели точности моделей реанализа
(относительно данных наблюдений на метеостанциях на территории РС(Я))**

Table 2

**Precision metrics of reanalyses compared to observations
at meteorological stations across the Republic of Sakha (Yakutia)**

Период	CRU4.05	CRU4.06	ERA5	GPCC	NCEP	PREC/L	JRA55
Коэффициент конкордации Лина							
1961–1990	0,92	0,88	0,65	1,00	0,25	0,95	0,56
1971–2000	0,92	0,90	0,70	1,00	0,28	0,96	0,61
1981–2010	0,92	0,90	0,75	1,00	0,32	0,97	0,63
1991–2020	0,93	0,90	0,78	1,00	0,38	0,97	0,66
ΔP	0,74	0,74	0,35	0,95	-0,06	0,57	0,32
Индекс согласия Вильмота							
1961–1990	0,80	0,80	0,31	0,96	-0,17	0,86	0,26
1971–2000	0,82	0,83	0,39	0,97	-0,04	0,89	0,34
1981–2010	0,81	0,83	0,46	0,98	0,01	0,89	0,37
1991–2020	0,82	0,84	0,53	0,98	0,14	0,88	0,44
ΔP	0,68	0,68	0,42	0,85	-0,03	0,62	0,40
Тау-критерий Кендалла							
1961–1990	0,69	0,72	0,78	0,95	0,34	0,81	0,67
1971–2000	0,70	0,72	0,77	0,97	0,31	0,84	0,66
1981–2010	0,73	0,73	0,78	0,99	0,35	0,83	0,62
1991–2020	0,74	0,74	0,79	0,98	0,37	0,84	0,65
ΔP	0,71	0,71	0,38	0,83	-0,02	0,56	0,28
Среднеквадратичная ошибка							
1961–1990	44,0	50,4	123	9,6	268	33,3	133
1971–2000	46,2	48,1	119	7,9	253	32,2	132
1981–2010	47,7	53,1	110	4,3	248	31,2	131
1991–2020	48,4	54,5	102	5,5	234	32,1	125
ΔP	21,8	21,9	36,1	11,1	65,9	26,5	41,9

во интерполяции модели также неоднородно во времени, и его сложно контролировать.

Пространственная корреляция в данных реанализа. Оценить влияние подгонки реанализа под данные наблюдений и возможное присутствие эффекта переподгонки позволяет анализ пространственной корреляции. Предполагается, что между двумя растрами, содержащими данные о годовой сумме осадков, осредненной за различные периоды, пространственная корреляция, оцененная методом скользящего окна, будет в основном устойчиво положительной, если влияние других локальных факторов невелико. В противном случае, когда картину пространственной корреляции определяют, помимо естественной изменчивости, другие факторы, например расположение метеостанций, следует ожидать на-

личия областей отрицательной пространственной корреляции.

Отрицательная пространственная корреляция между разновременными полями годовой суммы осадков для территории РС(Я) реанализам не присуща (рис. 1), независимо от их типа. В интерполяционных реанализах она представляет артефакт интерполяции и отмечается чаще всего в небольшом радиусе вблизи пунктов наблюдений (см. рис. 1, а, д). На этом фоне выделяется реанализ GPCC, для которого области отрицательной пространственной корреляции (ОПК) занимают значительную часть территории РС(Я).

Как обсуждалось выше, это следствие «переподгонки» модели и также влияния интерполяционной модели, создающей артефакты на

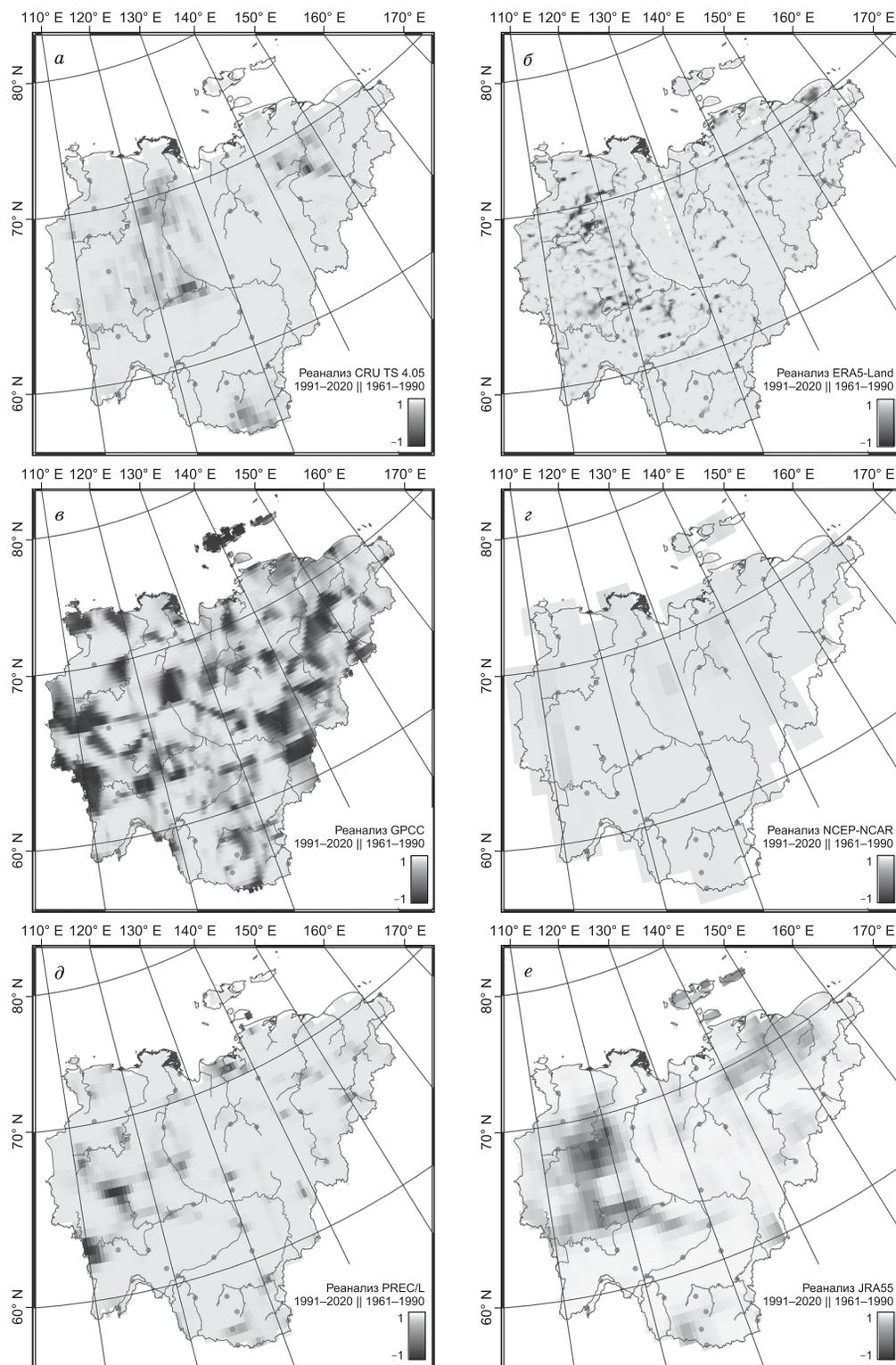


Рис. 1. Пространственная корреляция между полями годовой суммы осадков в 1961–1990 и 1991–2020 гг. в реанализах: *a* – CRU TS 4.05; *б* – ERA5; *в* – GPCP; *г* – NCEP-NCAR; *д* – PREC/L; *е* – JRA55

Fig. 1. Spatial correlation between total precipitation coverages for the periods 1961–1990 and 1991–2020 in reanalyses: *a*) CRU TS 4.05; *б*) ERA5; *в*) GPCP; *г*) NCEP-NCAR; *д*) PREC/L; *е*) JRA55

значительном удалении от метеостанций. В модельных реанализах, где влияние интерполяции незначительно, ОПК возникает в локациях, где в пределах узкого скользящего окна, т. е. примерно в радиусе от 30 до 150 км (в зависимости от разрешения модели), наблюдается синхронное разнонаправленное изменение увлажненности: более влажные пиксели (относительно среднего в скользящем окне) становятся сухими, а более сухие – влажными. Такая тенденция характерна для западной и северо-западной Якутии, а также нижнего течения р. Индигирка, причем отмечается в данных не только модельных (см. рис. 1, б, д), но и интерполяционных реанализов (см. рис. 1, а, з).

Причина изменений, приводящих к появлению ОПК в данных о годовой сумме осадков, неясна, и относительно нее можно только выдвигать предположения. Поскольку область возникновения ОПК одинакова в моделях обоих типов, допустимо предположить, что основная причина не относится к особенностям моделей и связана с объективными факторами, например изменением характера атмосферной циркуляции и частоты прохождения циклонов, однако этот вопрос требует дополнительных исследований. Западная и северо-западная Якутия – регион интенсивного промышленного освоения, в том числе связанного с необходимостью обеспечения безопасности гидротехнических сооружений, и такие исследования могут иметь значимый прикладной аспект.

Модельные реанализы значительно завышают величины годовой суммы осадков на территории РС(Я), что было ранее показано в работе [7] относительно более ранних версий этих же реанализов. Реанализ ERA5-Land, по литературным данным, на территории высокогорной Азии завышает годовую сумму осадков от 30 до 270 % [32]. Глобальный анализ ошибок ERA5-Land также указывает на завышение слоя осадков этим реанализом, в особенности в летний период во внутритропической области, тогда как зимние осадки внутритропической зоны воспроизводятся более точно [33]. Аналогичные результаты для отдельных регионов мира также получены для реанализа JRA55 [34]. В качестве причин такого завышения можно предположить особенности разрешения модельными реанализами теплообмена на поверхности почвы и конвективных потоков тепла и влаги и, как следствие, завышение суммы конвективных осадков, что также отмеча-

лось в литературе [35, 36]. Континентальные условия Северной Евразии в летний период предполагают значимую роль дневной конвекции в местной циркуляции, с которой, действительно, может быть частично связано завышение летних осадков в модельных реанализах.

Необходимо снова отметить важный момент: точность измерения количества осадков, в особенности осадков зимнего периода, остается в настоящее время приблизительной и сильно зависит от положения станции, типа осадкомера. Существуют методики расчета поправок осадкомеров, отличающиеся от принятых в используемом наборе данных [6]; учет таких поправок приводит к увеличению годовой суммы осадков на 25–40 % на метеостанциях к северу от Полярного круга и в пределах 10–20 % к югу от него, в основном вследствие роста слоя зимних осадков. С учетом таких поправок точность реанализов относительно данных наблюдений заметно изменится, и, возможно, преимущество получат модельные реанализы. Остается констатировать, что на настоящий момент для территории РФ не существует единого источника данных об осадках: ни точечного (данные метеостанций), ни сеточного (реанализа).

На территории Республики Саха (Якутия) оптимальной моделью реанализа, на основании изложенных выше результатов, следует считать модель CRU TS 4.05 и, в меньшей степени, ее старшие версии, CRU TS 4.06 и 4.07. Выбор сделан на основании более высокой точности этого реанализа относительно изменения годовой суммы осадков между климатическими периодами.

Годовая сумма осадков на территории РС(Я) и ее изменение. По данным оптимального реанализа CRU TS 4.05 построены схемы распределения годовой суммы осадков на территории РС(Я) в актуальный период (1991–2020), отражающие современное состояние климатической системы (рис. 2, а), а также изменение годовой суммы осадков между климатическими периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг. (рис. 2, б).

Среднегодовая сумма осадков на территории РС(Я) в 1991–2020 гг. составляет, по данным реанализа, 293 ± 92 мм; в 1961–1990 гг. она была равна 285 ± 81 мм; между двумя климатическими периодами, следовательно, годовая сумма осадков в РС(Я) выросла на 8 ± 18 мм. Наибольшая сумма осадков, более 550–650 мм/год, отмечается в Южной Якутии, в пределах Алданского нагорья, а также в Верхоянском массиве: от 350

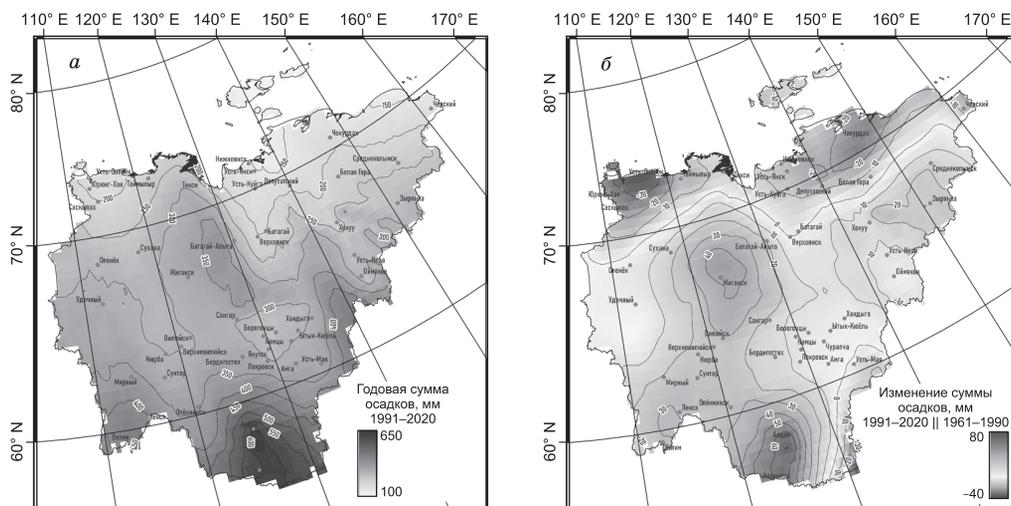


Рис. 2. Данные реанализа CRU TS 4.05 для территории РС(Я): *a* – годовая сумма осадков за период 1991–2020 гг.; *б* – изменение годовой суммы осадков между периодами 1991–2020 и 1961–1990 гг.

Fig. 2. CRU TS 4.05 reanalysis data for the Republic of Sakha (Yakutia): *a*) total precipitation distribution for the period 1991–2020; *b*) total precipitation change between the periods 1991–2020 and 1961–1990

до 400 мм/год – в субмеридиональной части (хребет Орулган) и от 400 до 450 мм – на хребте Сетте-Дабан и в западной части хребта Сунтар-Хаята. Наименьшее количество осадков, менее 200 мм/год, выпадает вдоль побережья Северного Ледовитого океана, на Приморских низменностях и в нижних течениях рек Анабар и Оленёк. В этих же районах отмечается уменьшение годовой суммы осадков, от 20 до 30 мм/год, что сходится с опубликованными тенденциями, установленными по данным наблюдений: уменьшение годовой суммы осадков на 2,4 % в Восточно-Сибирском секторе Арктики, и на 14,3 % – в Чукотском секторе [37]. Увеличение годовой суммы осадков отмечается на Алданском нагорье – от 60 до 80 мм/год, в Юго-Западной Якутии и далее к северу до широты Полярного круга – от 20 до 40 мм/год и на верхней Колыме в восточных отрогах Момского хребта – до 20 мм/год. На территории Лено-Алданского междуречья изменение количества осадков за последние статистически не значимо; вкупе с увеличением среднегодовой температуры воздуха это увеличивает засушливость территории, приводит к уменьшению влажности почвы, угнетению растительности и деградации верхних горизонтов криолитозоны.

Заключение

В данной работе выполнена оценка точности интерполяционных и модельных реанализов го-

довой суммы осадков для территории РС(Я). Преимущество первых – более высокая точность относительно данных наблюдений, наиболее значимый недостаток – недостаточная физическая обоснованность механизма интерполяции. Этот недостаток не присущ модельным реанализам, однако в пунктах метеостанций они недостаточно точно воспроизводят как средние для периодов поля годовых осадков, так и их изменение между периодами. Оптимальная модель реанализа по годовой сумме осадков для территории РС(Я) – CRU TS 4; с помощью этой модели средняя для региона годовая сумма осадков оценивается в 293 мм (1991–2020), среднее изменение – в +8 мм между 1991–2020 и 1961–1990 гг. Различия в точности между ее версиями CRU TS 4.05 и 4.06 незначительны, а между версиями 4.06 и 4.07 – отсутствуют. Данные этого реанализа могут быть использованы в качестве «базового климата» для региональных сценарных климатических прогнозов для территории РС(Я) с использованием климатических моделей CMIP6, а также для любых других расчетов, опирающихся на значения сумм осадков (ландшафтное моделирование, оценки пожарной опасности, и т. д.).

Список литературы / References

1. Alessa L., Kliskey A., Lammers R., et al. The Arctic Water Resources Vulnerability Index: An integrated assessment tool for community resilience and vulnerability with respect to freshwater. *Environmental Manage-*

ment. 2008;42:523–541. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9152-0>

2. Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю. Устранение неоднородности временных рядов осадков, вызванной заменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова. *Метеорология и гидрология*. 2008;(8):87–102.

Bogdanova E.G. Elimination of heterogeneity of precipitation time series caused by replacing the Niefer-protected rain gauge with the Tretiakov gauge. *Meteorology and Hydrology*. 2008;(8):87–102. (In Russ.)

3. Rasmussen R., Baker B., Kochendorfer J., et al. How well we are measuring snow? The NOAA/FAA/NCAR Precipitation Test Bed. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012;93:811–829. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00052.1>

4. Струзер Л.Р., Брызгин Н.Н. Методика вычисления поправок к измеренным величинам атмосферных осадков в полярных районах. *Труды ГГО им. А.И. Воейкова*. 1971;260:61–76.

Struzer L.R., Bryazgin N.N. Methodology for calculating corrections to measured precipitation values in polar regions. *Proceedings of the A.I. Voeikov State Geophysical Observatory*. 1971;260:61–76. (In Russ.)

5. Goodison B.E. Accuracy of the Canadian snow gage measurements. *Journal of Applied Meteorology*. 1978;17:1542–1548.

6. Богданова Э.Г., Голубев В.С., Ильин Б.М. и др. Новая модель корректировки измеренных осадков и ее применение в полярных районах. *Метеорология и гидрология*. 2002;(10):68–93.

Bogdanova E.G., Golubev V.S., Ilyin B.M., et al. A new model for correcting measured precipitation and its application in polar regions. *Meteorology and Hydrology*. 2002;(10):68–93. (In Russ.)

7. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами. *Метеорология и гидрология*. 2009;(10):79–89.

Zhiltsova Ye.L., Anisimov O.A. On the accuracy of reproduction of temperature and precipitation on the territory of Russia by global climate archives. *Meteorology and Hydrology*. 2009;(10):79–89. (In Russ.)

8. Гройсман П.Я., Богданова Э.Г., Алексеев В.А. и др. Влияние погрешности в измерениях снегопадов на суммы атмосферных осадков и их тренды по Северной Евразии. *Лед и снег*. 2014;54(2):29–43. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-29-43>

Groisman P.Ya., Bogdanova E.G., Alekseev V.A., et al. Influence of error in snowfall measurements on precipitation totals and their trends over Northern Eurasia. *Snow and Ice*. 2014;54(2):29–43. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-29-43>.

9. Кокорев В.А., Шерстюков А.Б. О метеорологических данных для изучения современных и будущих изменений климата на территории России. *Арктика. XXI век. Естественные науки*. 2015(2);5–23.

Kokorev V.A., Sherstyukov A.B. On meteorological data for studying current and future climate changes on the territory of Russia. *Arktika. XXI century. Natural Sciences*. 2015(2);5–23. (In Russ.)

10. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (Катцов В.М., ред.). СПб.: Научно-технологические технологии; 2022. 676 с.

Third assessment report on climate change and its consequences over the territory of the Russian Federation (Kattsov V.M., ed.). Saint-Petersburg: Naukoemkie tehnologii; 2022. 676 p.

11. Kidd C., Huffman G., Maggioni V., et al. The global satellite precipitation constellation: current status and future requirements. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2021;102:E1844–E1861. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-00299.1>

12. Harris I., Osborn T.J., Jones P., et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*. 2020;7:109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

13. Месячные суммы осадков с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов (месячные данные). 2021. Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (дата обращения: 17.10.2023).

Monthly totals of precipitation with elimination of systematic errors of precipitation gauges (monthly data). 2021. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/select.xhtml> (accessed: 17.10.2023).

14. Ильин Б.М., Булыгина О.Н., Богданова Э.Г. Описание массива месячных сумм осадков, с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов. 2021. Режим доступа: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov#описание-массива-данных> (дата обращения: 12.10.2023).

Ilyin B.M., Bulygina O.N., Bogdanova E.G. Description of the dataset of monthly precipitation totals, with elimination of systematic errors of precipitation gauges. 2021. Available at: <http://meteo.ru/data/506-mesyachnye-summy-osadkov-s-ustraneniem-sistematicheskikh-pogreshnostej-osadkomernykh-priborov#описание-массива-данных> (accessed: 12.10.2023).

15. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч. 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеоиздат; 1985. 301 с.

Guidance for hydrometeorological stations and gauges. Issue 3, Part 1. Meteorological observations at stations. Leningrad: Hidrometeoizdat; 1985. 301 p.

16. CRU TS v. 4.05. 2021. Available at: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.05/cruts.2103051243.v4.05/pre/ (accessed: 10.10.2023).

17. CRU TS v. 4.06. 2022. Available at: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.06/cruts.2205201912.v4.06/pre/ (accessed: 10.10.2023).

18. CRU TS v. 4.07. 2023. Available at: https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.07/cru.ts.2304141047.v4.07/pre/ (accessed: 10.10.2023).
19. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agusti-Panareda A., et al. 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>
20. Rustemeier E., Hänsel S., Finger P., et al. GPCP Climatology Version 2022 at 0.25°: Monthly land-surface precipitation climatology for every month and the total year from rain-gauges built on GTS-based and historical data. 2022. https://doi.org/10.5676/DWD_GPCP/CLIM_M_V2022_025.
21. Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., et al. 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(1):71–99. <https://doi.org/10.5194/essd-5-71-2013>.
22. NCEP-NCAR Reanalysis 1. 2023. Available at: <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51we/reanalysis-1/6hr/rotating/> (accessed: 12.12.2023).
23. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., et al. 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:TNYP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYP>2.0.CO;2)
24. NOAA's Precipitation Reconstruction over Land (PREC/L). 2023. Available at: <https://downloads.psl.noaa.gov/Datasets/precl/0.5deg/precip.mon.mean.0.5x0.5.nc> (accessed: 14.12.2003).
25. Chen M., Xie P., Jankowiak J.E., et al. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations. *Journal of Hydrometeorology*. 2002;(3): 249–266. DOI: 10.1175/1525-7541(2002)003<0249:GLPAYM>2.0.CO;2.
26. JRA-55: Japanese 55-year Reanalysis. 2023. Available at: <https://doi.org/10.5065/D60G3H5B> (accessed: 13.12.2023).
27. Kobayashi S., Ota Y., Harada Y., et al. The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. 2015;93(1):5–48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>.
28. RStudio: Integrated Development for R, v.2023.09.01 Build 494. 2023. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. Available at: <https://posit.co/products/open-source/rstudio/> (accessed: 17.10.2023).
29. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2023. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed: 17.10.2023).
30. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. 2023. Available at: <http://qgis.osgeo.org> (accessed: 12.12.2023).
31. 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):88–101. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.30.2.008>
- Tananaev N.I. Selection of the best-performing climate reanalysis model for the Sakha (Yakutia) Republic, based on mean annual air temperature. *Vestnik of North-Eastern Federal University Series «Earth Sciences»*. 2023;(2):88–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.30.2.008>
32. Sun H., Su F., Yao T., et al. General overestimation of ERA5 precipitation in flow simulations for High Mountain Asia basins. *Environmental Research Communications*. 2021;3(12):121003. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac40f0>
33. Lavers D.A., Simmons A., Vamborg F., et al. An evaluation of ERA5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2022;148(748):3152–3165. <https://doi.org/10.1002/qj.4351>
34. Xu X., Frey S.K., Boluwade A., et al. Evaluation of variability among different precipitation products in the Northern Great Plains. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2019;24:100608. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100608>
35. Serra Y.L., Rutledge S.A., Chudler K., et al. Rainfall and convection in ERA5 and MERRA-2 over the Northern Equatorial Western Pacific during PISTON. *Journal of Climate*. 2023;36(3):845–863. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0203.1>
36. Hassler B., Lauer A. Comparison of reanalysis and observational precipitation datasets including ERA5 and WFDE5. *Atmosphere*. 2021;12:1462. <https://doi.org/10.3390/atmos12111462>
37. Палеоклимат полярных областей Земли в голоцене. Большианов Д.Ю., Веркулич С.Р. (ред.). СПб.: ААНИИ, 2018. 204 с.
- Paleoclimate of the Earth polar regions in the Holocene*. Bolshyanov D.Yu., Verkulich S.R. (eds.). Saint-Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute; 2018. 204 p.

Об авторе

ТАНАНАЕВ Никита Иванович, кандидат географических наук, заведующий лабораторией, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>, ResearcherID: J-3471-2012, Scopus Author ID: 12782200000, SPIN: 1859-8831, e-mail: tanni@s-vfu.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

About the author

TANANAEV, Nikita Ivanovich, Cand. Sci. (Geogr.), Laboratory Head, Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation; Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2997-0169>, ResearcherID: J-3471-2012, Scopus Author ID: 12782200000, SPIN: 1859-8831, e-mail: tanni@s-vfu.ru

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 05.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 10.02.2025

Принята к публикации / Accepted 20.02.2025