

*Н.И. Тананаев^{1,2}, М.А. Тимофеев¹*¹ СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

e-mail: tanni@s-vfu.ru

e-mail: m.a.timofeev@s-vfu.ru

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РЕАНАЛИЗА GHCN-CAMS В РАСЧЕТАХ ВНУТРИГОДОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)

Аннотация. В данной работе выполнена оценка точности воспроизведения реанализом GHCN-CAMS внутригодового распределения температуры воздуха для исторического (1961-1990 гг.) и актуального (1991-2020 гг.) климатических периодов, в масштабе климатических норм сезонов и отдельных месяцев. Использованы данные по 86 метеостанциям на территории РС (Я), по которым имелись климатические ряды в обоих временных периодах. Проведено сравнение климатических норм метеостанций с данными реанализа GHCN-CAMS в соответствующих пикселях, а также их изменение между периодами. В качестве метрик схожести рассчитаны корень среднеквадратичной ошибки, коэффициент корреляции Пирсона и коэффициент конкордации Лина. Показано, что определённые для метеостанций и рассчитанные в модели реанализа GHCN-CAMS климатические нормы тесно связаны линейно, с коэффициентом корреляции больше 0.9; наибольшая точность отмечена для весенних месяцев. В то же время изменение климатических норм месяцев и сезонов между периодами реанализ воспроизводит значительно хуже, лучше остальных – для осени и зимы. Обобщены сведения о среднесезонной температуре воздуха на территории РС (Я) по данным реанализа GHCN-CAMS. В целом, модель GHCN-CAMS допустимо использовать для приложений, где требуется внутригодовое распределение температуры воздуха.

Ключевые слова: климат Арктики, Республика Саха (Якутия), климатический реанализ, GHCN-CAMS, среднемесячная температура воздуха, среднесезонная температура воздуха, региональный климат, материалы метеонаблюдений

*N.I. Tananaev^{1,2}, M.A. Timofeyev¹*¹ M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia² Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

e-mail: tanni@s-vfu.ru

e-mail: m.a.timofeev@s-vfu.ru

ESTIMATION OF THE ACCURACY OF GHCN-CAMS REANALYSIS IN CALCULATIONS OF THE INTRA-ANNUAL DISTRIBUTION OF AIR TEMPERATURE IN THE TERRITORY OF THE SAKHA REPUBLIC (YAKUTIA)

Abstract. The accuracy of GHCN-CAMS reanalysis reproduction of the intra-annual air temperature distribution was assessed for the historical (1961-1990) and current (1991-2020) climatic periods, on the scale of climatic norms of seasons and individual months. Data on 86 meteorological stations on the territory of the Sakha Republic (Yakutia), for which climatic series in both time periods were available, were used. The climatic norms of meteorological stations for both periods, as well as their change between periods, were compared with the GHCN-CAMS reanalysis data in corresponding pixels. The root mean square error, Pearson correlation coefficient, and Lin's concordance coefficient were calculated as similarity metrics. Climatic norms for meteorological stations and calculated in the GHCN-CAMS reanalysis model are closely related linearly, with a correlation coefficient above 0.9, and the highest accuracy is observed for spring months. At the same time, the quality of reanalysis reconstruction of change in climatic norms for months and seasons between periods is significantly lower; the best

reanalysis accuracy is for fall and winter, and significantly lower for summer. In general, the GHCN-CAMS model can be used for calculation and forecasting applications that require intra-annual air temperature distribution.

Keywords: Arctic climate, Sakha Republic (Yakutia), climate reanalysis, GHCN-CAMS, mean monthly air temperature, mean seasonal air temperature, regional climate, meteorological observations

Введение

Климатический реанализ позволяет создавать сплошные растровые покрытия значений климатических характеристик, ассимилируя данные метеостанций с поправками на рельеф [1], или дополнительно применяя методы краткосрочного прогноза погоды [2]. Использование данных реанализа позволяет более точно рассчитывать и картировать климатические характеристики, количественно оценивать их современные и прогнозные изменения [3], а также моделировать климатообусловленные процессы, например, избыточную смертность, обусловленную волнами жары [4]. Точность разных моделей реанализа может отличаться в зависимости от плотности и репрезентативности наблюдательной сети, точности топографических поправок, используемых методов ассимиляции данных наблюдений, моделей прогноза погоды.

В Арктическом регионе, как показывают ранее выполненные исследования, среднесезонные аномалии температуры воздуха в XX в. реалистично воспроизводит семейство реанализов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды, ERA20C и CERA20C, отличия между которыми сводятся к набору ассимилируемых данных и учёту взаимодействия атмосферы и океана [5]. Во все сезоны года, кроме осени, модель CERA20C показывает наилучшее соответствие данным массива GISTEMP. Другие модели этого семейства, ERA-Interim и ERA5, также демонстрируют хорошую согласованность, с ошибками в пределах 0.5°C , с данными береговых метеостанций Арктического побережья России [6]. Сходные результаты получены для севера Скандинавии (период с 1979 по 2013 г.), где ERA-Interim и MERRA имели наиболее высокую корреляцию с данными наблюдений, при этом занижая среднегодовую температуру воздуха на $0.18\text{--}0.22^{\circ}\text{C}$ [7]. Использование более детального арктического реанализа CARRA позволила повысить согласованность со станционными наблюдениями [8], однако его пространственное покрытие ограничено Гренландией (CARRA-West), севером Скандинавии, Кольского полуострова и западного сектора Северного Ледовитого океана (CARRA-East). Проводилось сравнение реанализов с данными метеостанций и для территории Республики Саха (Якутия) [9]. Приземные среднегодовые, сезонные и месячные температуры воздуха по пяти метеостанциям региона сопоставлялись с данными реанализов NCEP/NCAR и ERA-Interim за период 1979–2012 гг., и вновь модель семейства ERA показала наибольшую точность.

В отношении среднегодовой температуры воздуха ранее было показано, что для территории Якутии оптимальной по точности можно считать модель реанализа GHCN-CAMS [3], её предпочтительно использовать для описания современного климата и его исторической динамики. Тем не менее, решение многих задач предполагает использование климатических норм среднемесячных и среднесезонных температур воздуха. Так, в работе [10] предлагается методика прогноза площадей пожаров на территории Якутии, основанная на среднемесячных температурах воздуха (СМТВ). В связи с этим основная цель данной работы – оценка точности воспроизведения внутригодового распределения температуры воздуха моделью реанализа GHCN-CAMS.

Материалы и методы

В работе использованы данные модели реанализа GHCN-CAMS, объединяющего крупные массивы данных Глобальной сети исторической климатологии (Global Historical Climatology Network, GHCN) и Системы мониторинга климатических аномалий (Climate Anomaly Monitoring System, CAMS). GHCN-CAMS – набор данных, включающий значения среднемесячной температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью суши за период с 1948 по 2023 г. на регулярной сетке разрешением $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ [1]. Массив данных GHCN-CAMS в формате NetCDF получен

с сайта Лаборатории физических наук Национального управления океанических и атмосферных исследований (Боулдер, Калифорния, США), по адресу: <https://psl.noaa.gov>. Объединенный массив включает данные по 82 метеостанциям на территории РС (Я), в том числе на настоящий момент не действующим. По аналогии с ранее выполненной работой [3], точность модели оценивалась для исторического (1961-1990 гг.) и актуального (1991-2020 гг.) климатических периодов, а также для изменения средних температур между этими периодами.

Данные наблюдений получены для 86 метеостанций, расположенных на территории Республики Саха (Якутия), из различных источников: с официального сайта Росгидромета, раздел «Климатические нормы» [11]; из базы данных ВНИИГМИ-МЦД, доступной в системе АИСОРИ [12]; из находящейся в открытом доступе базы данных «Погода и климат» [13]. В работе использованы ряды данных без длительных пропусков в период с 1960 по 2020 гг.

Данные реанализа GHCN-CAMS обрабатывались в среде RStudio IDE [14], интегрированной среде разработки для языка программирования R [15], с помощью набора авторских скриптов, разработанных в Лаборатории по изучению климата и экосистем северных регионов ИЕН СВФУ. Скрипты позволяют конвертировать данные формата NetCDF в табличный формат, осреднять значения температуры воздуха по требуемым временным интервалам, при необходимости пересчитывать в регулярную сетку, и растеризовать полученный результат в формат GeoTIFF. В обработке использованы пакеты **‘dplyr’**, **‘tidync’**, **‘ncmeta’** и **‘raster’**. В результате для каждого сезона и месяца года построены по три растровых набора данных, содержащих сведения о средней температуре за периоды 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг., а также о разнице ΔT , °C, между этими периодами.

Данные метеостанций с известными координатами были преобразованы в точечный shp-файл, затем в ГИС-оболочке QGIS 3.22 [16], используя инструмент-плагин Point Sampling Tool версии 0.5.3, с растровых полей реанализа снимались значения среднемесячной и среднесезонной температуры воздуха за требуемый интервал времени в каждой точке, соответствующей метеостанции, и экспортировались в текстовый файл для дальнейшего анализа. Среднесезонные температуры рассчитывались для стандартных климатических сезонов: зима (DJF, декабрь-январь-февраль), весна (MAM, март-апрель-май), лето (JJA, июнь-июль-август), осень (SON, сентябрь-октябрь-ноябрь), для расчёта среднезимних температур использовались данные за декабрь года, предшествующего расчетному.

Оценка точности реанализов проводилась с использованием следующих метрик: (1) *RMSE*, корень среднеквадратичной ошибки; (2) *r*, коэффициент линейной корреляции Пирсона; (3) *CCC*, коэффициент конкордации Лина. В расчете использовались функции, входящие в библиотеки **‘Metrics’** [17], **‘stats’** [15], **‘DescTools’** [18]. Коэффициент линейной корреляции (Пирсона) характеризует линейность регрессионной связи двух характеристик, безотносительно её угла наклона. Степень разброса точек относительно биссектрисы определяет коэффициент конкордации Лина, а абсолютный разброс относительно линии регрессии – корень среднеквадратической ошибки, *RMSE*.

Результаты и обсуждение

Источники данных наблюдений. На территории РС (Я) в настоящее время в структуре Якутского УГМС Росгидромета действует 99 метеостанций, однако не по всем из них данные о приземной температуре воздуха находятся в открытом доступе. Климатические нормы СМТВ за периоды 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг. опубликованы на сайте Росгидромета [11] и в научно-прикладном справочнике «Климат России» ВНИИГМИ-МЦД [19]. В пределах РС (Я) действуют 42 метеостанции, для которых климатические нормы доступны для обоих периодов.

Помимо этого, сравнительно полные данные о СМТВ доступны в массиве данных «Температура воздуха (месячные данные)» ВНИИГМИ-МЦД [12], в котором содержатся данные за весь период наблюдений по 46 метеостанциям на территории РС (Я); в базах данных GHCN версии 4.0.1 [20] (88 метеостанций); в онлайн-базе «Погода и климат» [13]. Период наблюдений на этих метеостан-

циях необязательно закрывает весь интервал с 1960 по 2020 гг., и не всегда совпадает в разных источниках данных. Как видим, единого открытого полного и достоверного источника данных о наблюдаемых значениях СМТВ на территории региона не существует.

Подробный сравнительный анализ перечисленных источников данных не входит в задачи работы и может стать в будущем задачей отдельного исследования. Для целей данной работы важно, чтобы использованные нами массивы были достоверны и сопоставимы между собой в первом приближении. Выборочное сравнение данных показало, что для метеостанций, входящих в сеть международного обмена, значительных расхождений между источниками данных нет, за исключением массива GHCN, в котором значения СМТВ могут отличаться от других источников от $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$. Пропуски существуют во всех источниках, кроме онлайн-базы «Погода и климат», где они в основном заполнены значениями из базы GHCN, либо из иных источников.

Данные метеостанций, не входящих в сеть международного обмена, содержатся в базах GHCN и «Погода и климат», последняя – более полная, но ссылки на источники данных в ней отсутствуют, и эти источники не относятся к открытым. Пропуски в данных, имеющиеся в базе GHCN, в базе «Погода и климат», в основном заполнены, хотя источник данных и использованные методы восстановления данных также неизвестны. В работе [21] для создания региональной базы данных по температуре воздуха и атмосферным осадкам для территории РС (Я) использован проприетарный набор данных программного комплекса «Гидрорасчёты» для определения расчетных гидрологических характеристик [22]. Возможно, онлайн-база «Погода и климат» основана на этом или аналогичном наборе данных, пропуски в котором заполнены некоторым недокументированным образом. Тем не менее, этот источник данных используется в климатических исследованиях, в том числе, например, в Российском государственном гидрометеорологическом университете [23], и он принят как основной в данной работе.

Среднемесячная температура воздуха. Метрики точности реанализа GHCN-CAMS рассчитаны по данным 86 метеостанций на территории РС (Я) для двух периодов, 1961-1990 гг. и 1991-2020 гг., также сделана оценка точности воспроизведения реанализом GHCN-CAMS изменений СМТВ между этими периодами (табл. 1). Полученные результаты свидетельствуют о том, что реанализ GHCN-CAMS с высокой точностью воспроизводит годовой ход температуры воздуха в месячном осреднении, за исключением двух месяцев года: мая и июля.

Таблица 1 – Метрики точности реанализа GHCN-CAMS относительно данных наблюдений на метеостанциях

Месяц	1961-1990			1991-2020			Изменение		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Январь	2.38	0.900	0.886	2.11	0.913	0.910	1.36	0.452	0.334
Февраль	1.97	0.903	0.891	1.84	0.938	0.933	1.15	0.668	0.625
Март	1.74	0.930	0.926	1.56	0.944	0.943	1.01	0.327	0.286
Апрель	1.45	0.955	0.954	1.35	0.961	0.959	0.67	0.312	0.288
Май	1.25	0.959	0.956	1.14	0.966	0.961	0.65	0.062	0.056
Июнь	1.31	0.930	0.926	1.26	0.946	0.935	0.62	0.278	0.254
Июль	1.30	0.925	0.921	1.25	0.933	0.925	0.65	0.043	0.042
Август	1.22	0.906	0.902	1.11	0.912	0.910	0.46	0.391	0.387
Сентябрь	1.09	0.861	0.856	0.98	0.883	0.868	0.41	0.500	0.484
Октябрь	1.15	0.933	0.931	1.02	0.943	0.940	0.59	0.495	0.469
Ноябрь	1.81	0.934	0.922	1.52	0.944	0.939	1.12	0.557	0.421
Декабрь	2.10	0.921	0.908	2.07	0.918	0.913	1.38	0.394	0.262
Среднее	1.56	0.921	0.915	1.43	0.933	0.928	0.84	0.373	0.326

Примечание: 1 – корень среднеквадратичной ошибки, 2 – линейная корреляция Пирсона, 3 – коэффициент конкордации Лина

Из данных табл. 1 видно, что наиболее достоверно реанализ GHCN-CAMS воспроизводит СМТВ теплого периода года, в месяцы с апреля по октябрь, для которых отмечена наименьшая ошибка модели, а также максимальные значения коэффициента конкордации. Наименьшая ошибка реанализа ($RMSE$) отмечена для сентября, наибольшая – для декабря и января. Наилучшая корреляция между данными наблюдений и реанализа – в мае (средние значения) или феврале (изменение между периодами). В большинстве случаев значения коэффициента корреляции значимы на уровне значимости $\alpha = 0.05$ при $df = 84$, критическом значении $r = 0.175$. Следует учитывать, что коэффициент корреляции Пирсона исчерпывающе характеризует линейную связь между переменными, распределенными нормально и не имеющими выбросов, что в нашем случае не так.

Как и в случае со среднегодовыми температурами [3], реанализ GHCN-CAMS значительно лучше воспроизводит сами среднемесячные температуры, чем их изменение между периодами (см. табл. 1). При высоких коэффициентах корреляции и конкордации для обоих периодов, превышающих 0.9, для изменения между периодами эти значения не выше 0.7 (в большинстве случаев меньше), а в мае и июле – близки к 0. Такое возможно, когда в рядах реанализа для обоих периодов существует некоторая систематическая ошибка, смещающая их в некотором направлении, необязательно случайном, относительно наблюдений вдоль биссектрисы таким образом, что линейность связи сохраняется. Кроме того, в данных метеостанций, очевидно, количество возможных значений $\Delta T_{\text{набл}}$ ограничено, так как $\Delta T_{\text{набл}}$ изменяется в сравнительно узких пределах вокруг среднего значения, что не проявляется в данных реанализа; можно ожидать, что нулевая корреляция между ними возникает вследствие различий эмпирических функций распределения ΔT в наблюдениях и реанализе.

Действительно, например, для июля среднее значение $\Delta T_{\text{набл}} = 1.03 \pm 0.48^\circ\text{C}$, медиана равна 1°C , мода равна 1.3°C , что предполагает асимметричное распределение. Для данных реанализа соответствующие величины равны $\Delta T_{\text{реан}} = 0.92 \pm 0.45^\circ\text{C}$, 0.85°C и 0.8°C , что предполагает близость к нормальному распределению, смещённому влево относительно распределения $\Delta T_{\text{набл}}$. Убедиться, что два распределения существенно различны, позволяет сравнение коэффициентов эксцесса: он равен 4.87 для данных наблюдений, и -0.26 для данных реанализа. Такой эксцесс создаётся значительным количеством станций, по которым $\Delta T_{\text{набл}}$ значительно отклоняется от среднего, и исключить их из анализа не представляется возможным.

При корреляционном анализе данных получается, что возможная линейность связи $\Delta T_{\text{набл}}$ и $\Delta T_{\text{реан}}$ нарушается в области моды распределения $\Delta T_{\text{набл}}$ и справа от неё, где реанализ значимо занижает значения ΔT . Формируется облако точек, для которого коэффициенты корреляции/конкордации близки к 0. Среди основных причин отметим, что для данных наблюдений в оба периода коэффициент эксцесса всегда больше, а коэффициент асимметрии – меньше, чем для данных реанализа; распределение последних более сглажено и имеет выраженную положительную асимметрию.

Также на примере данных об СМТВ за июль легко показать, что ошибка реанализа относительно ΔT не является независимой величиной. Анализ показывает, что она положительно связана с $\Delta T_{\text{реан}}$ ($r = 0.66$) и отрицательно – с $\Delta T_{\text{набл}}$ ($r = -0.71$). Малые наблюдаемые изменения переоцениваются, а большие – недооцениваются; соответственно, большие значения $\Delta T_{\text{реан}}$ с большой вероятностью завышены, а небольшие – занижены. Можно показать также, что эта ошибка реанализа значимо отрицательно связана с ошибкой реанализа относительно СМТВ в исторический период ($r = -0.26$): конкретно, если реанализ завышает значение СМТВ в этот период, то $\Delta T_{\text{реан}}$ с большой вероятностью окажется заниженным.

Практическим следствием данных выкладок будем считать тот факт, что пространственные обобщения, касающиеся изменения СМТВ между историческим и актуальным периодами для двух месяцев (май, июль) и основанные на данных реанализа, для большей части территории РС (Я) будут оценками снизу.

В сравнении между собой двух периодов, отметим, что реанализ точнее для периода 1991-2020 гг. (табл. 1); этому периоду соответствует меньшее значение RMSE и большее значение r . Можно лишь предположить, что это связано с изменением во времени количества метеостанций, данные с которых ассимилируются моделью, и изменением точности реанализа вследствие этого.

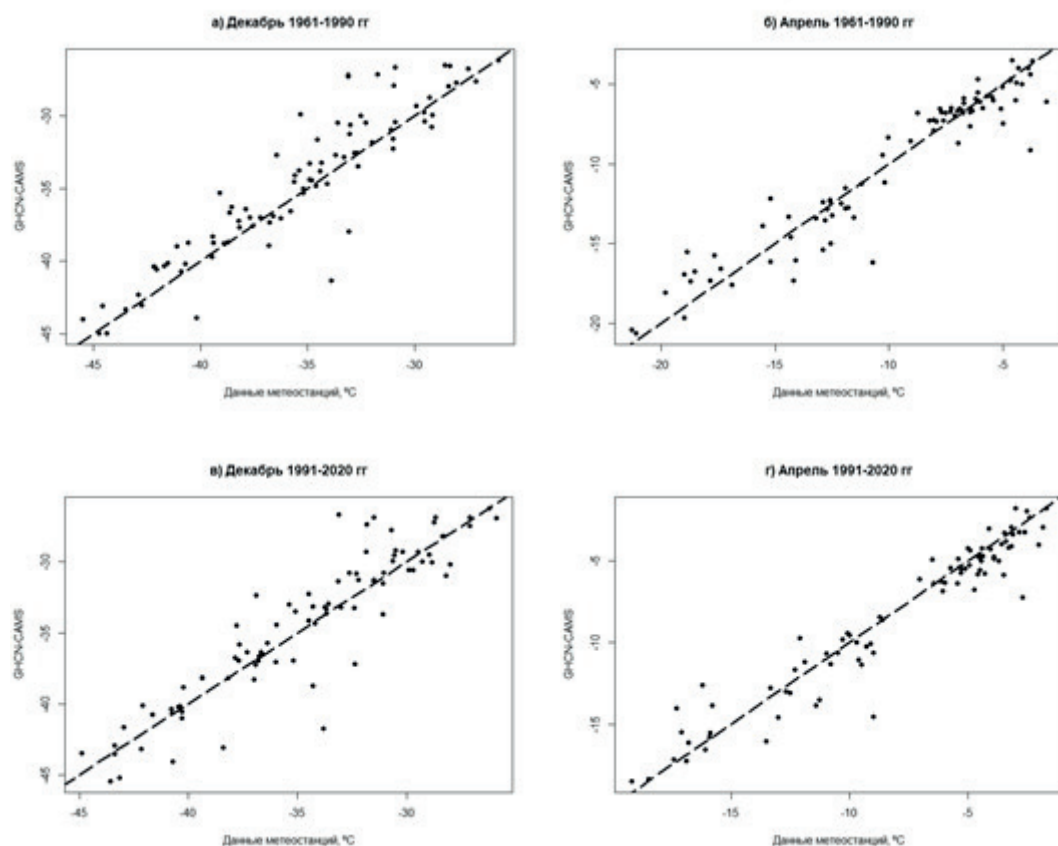


Рис. 1. Сопоставление климатических норм с метеостанций с реанализом GHNC-CAMS, пунктиром нанесена линия конкордации (биссектриса), а, б – декабрь и апрель 1961-1990 гг., в, г. – декабрь, и апрель 1991-2020 гг.

Fig. 1 Comparison of climatic norms from weather stations with GHNC-CAMS reanalysis, dotted line of concordance (bisector), a, б – December and April 1961-1990, в, г – December and April 1991-2020

В декабре для обоих периодов наблюдается довольно широкий разброс точек (рис. 1а, в), тогда как в апреле точки сгруппированы ближе к биссектрисе (рис. 1б, г). Это объясняется большей согласованностью климатических норм температуры воздуха в тёплые периоды с данными реанализа GHNC-CAMS по сравнению с зимним сезоном.

Среднесезонные температуры воздуха. Реанализ GHNC-CAMS с хорошей точностью воспроизводит среднемесячные температуры воздуха, следовательно, предполагается, что и в сезонном разрешении данные этого реанализа будут достаточно точными, хотя весной и летом оценка изменения температуры между периодами также, как ожидается, может иметь низкую точность (см. табл. 1).

Таблица 2 – Метрики точности реанализа GHCN-CAMS для сезонов

Период	Параметр	Зима	Весна	Лето	Осень
1961-1990 гг.	r	0.911	0.952	0.925	0.929
	CCC	0.898	0.951	0.921	0.924
	$RMSE$	2.103	1.326	1.232	1.127
1991-2020 гг.	r	0.924	0.959	0.935	0.939
	CCC	0.919	0.958	0.928	0.931
	$RMSE$	1.969	1.219	1.172	1.017
Изменение	r	0.328	0.123	0.020	0.597
	CCC	0.223	0.107	0.019	0.525
	$RMSE$	1.219	0.665	0.492	0.562

Коэффициенты корреляции среднесезонной температуры воздуха значительно выше критических значений (табл. 2), что свидетельствует об их статистической значимости. Наименьшие значения $r = 0.91$ и $CCC = 0.9$ отмечаем в зимний сезон 1961-1990 гг. Для всех сезонов, наблюдается превышение коэффициента корреляции и конкордации для современного периода над значениями для базового периода. Для обоих периодов реанализ GHCN-CAMS лучше всего описывает распределение температур весеннего сезона, а изменение температур между периодами – в осенний сезон. Корень среднеквадратичной ошибки (RMSE) незначительно отличается между периодами, однако заметно различается между сезонами: в зимний сезон ошибка реанализа почти в два раза больше, чем в другие сезоны, из которых точнее всего реанализ воспроизводит среднюю температуру осени (сентябрь-октябрь-ноябрь).

Наибольшее различие между сезонными средними по данным наблюдений и реанализа E , °C, отмечается в зимний сезон (Табл. 3), для которого отмечаются и сравнительно низкие коэффициенты корреляции и конкордации. Для каждой конкретной метеостанции причины таких различий между наблюдениями и реанализом могут отличаться. Примечательно, что для станций, у которых E близко к максимальным, данные брались из онлайн-базы «Погода и климат». Это ещё раз приводит к вопросу о полноте и достоверности источников информации. Но всё же примерно в половине метеостанций значение E менее 1°C, поэтому в целом реанализ GHCN-CAMS хорошо описывает сезонные температуры воздуха.

Таблица 3 – Максимальные разности между реанализом GHCN-CAMS и сезонными средними метеостанций E , °C

Сезоны	1961-1990 гг.	1991-2020 гг.
Зима	Томмот +5.4	Томмот +5.6
	Восточная –7.7	Восточная –7.7
Весна	Джалинда +1.8	Колымская +3.2
	Усть-Нера –4.8	Усть-Нера –4.8
Лето	Тикси +2.2	Колымская +1.7
	Усть-Нера –5.0	Усть-Нера –4.6
Осень	Тяня +2.2	Тяня +2.7
	Восточная –3.4	Усть-Нера –3.8

Просматривая табличные данные массива GHCN, ассимилированные моделью реанализа, легко убедиться в том, что в этом массиве приведены неполные данные по некоторым метеостанциям, с пропусками в отдельные месяцы или продолжительные периоды. Соответственно, реанализ GHCN-CAMS учитывает эти неполные данные, что может приводить к ошибкам. Предполагаем, что неполнота ассимилированных в модели реанализа рядов объясняет высокие значения E в большинстве случаев.

Среднесезонная температура воздуха увеличивается на всей территории РС (Я) и во все сезоны года (рис. 2), исключая область от истоков р. Томпо до верховьев р. Индигирка, где, как предполагается реанализом, среднезимняя температура воздуха остается неизменной либо снижается на 0.1-0.2°C. Данные метеостанций частично подтверждают существование такой области (м/с Изма, м/с Оймякон), частично не согласуются с картиной реанализа (м/с Усть-Мома, м/с Усть-Нера). Современная температура зимы по м/с Усть-Мома в данных реанализа, -40.3°C, хорошо согласуется с наблюдаемой, -40.1°C. Следовательно, можно говорить о систематическом завышении зимних температур воздуха исторического периода (1961-1990 гг.) реанализом GHCN-CAMS в этом районе – на восточном склоне массива Черского, в пределах Момо-Селенныхской впадины и Момского хребта. Неясно, каково происхождение такой недооценки; предполагаем, что она связана с особенностями введения топографической поправки в данном регионе в зимний период, когда в долинах действуют мощные температурные инверсии, но это остаётся лишь предположением.

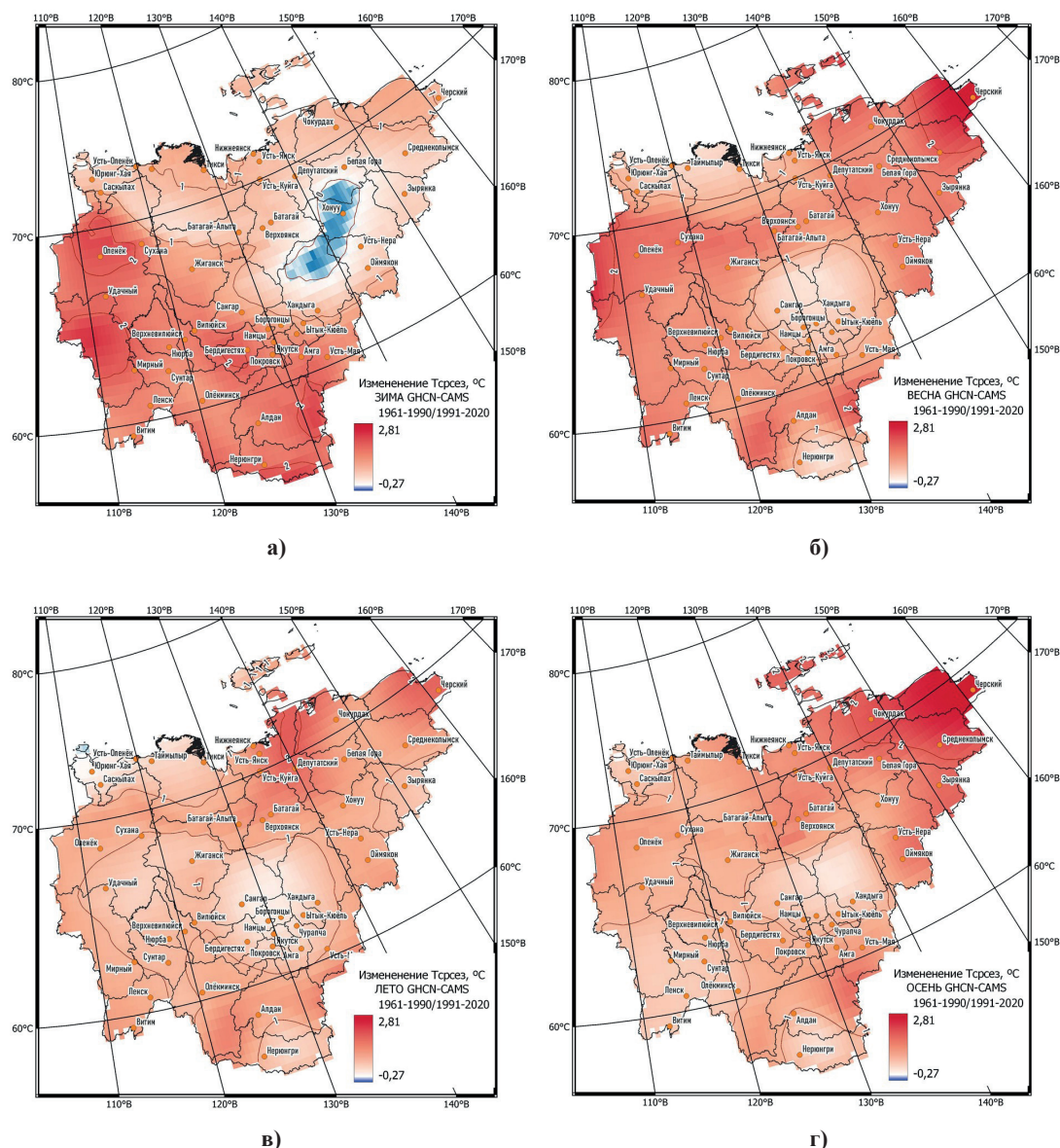


Рис. 2. Изменение климатической нормы сезонной температуры по данным GHCN-CAMS, а – зима, б – весна, в – лето, г – осень

Fig. 2 Change in the climatic norm of seasonal temperature according to GHCN-CAMS data, а – winter, б – spring, в – summer, г – autumn

В зимний период наибольшее потепление отмечается к западу и югу от Верхоянского хребта, в остальные сезоны оно приурочено к северо-восточным районам и весной – также на западе Якутии, в Оленёкском и Мирнинском районах (рис. 2). Как и в среднегодовых данных [3], для всех сезонов, кроме зимнего, отмечается область замедленного потепления с центром в районе узла слияния рр. Лена и Алдан, в виде окружности радиусом около 200 км. Данные наблюдений на м/с Сеген-Кюель, Батамай и Верхоянский Перевоз, расположенных в центре этой области, подтверждают её существование, особенно выраженное в летне-осенний период, месяцы с июля по сентябрь, когда рост СМТВ между периодами не превышает $0.5-0.7^{\circ}\text{C}$.

Среднезимняя (декабрь-январь-февраль) температура воздуха на территории РС (Я) за современный климатический период (1991-2020 гг.) составляет $-34.2 \pm 4.3^{\circ}\text{C}$. Между историческим (1961-1990 гг.) и современным климатическим периодом среднезимняя температура воздуха на территории РС (Я) увеличилась на $+1.2 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$. Средневесенняя (март-апрель-май) температура воздуха на территории РС (Я) за современный климатический период составляет $-10.9 \pm 4.0^{\circ}\text{C}$. Между историческим и современным климатическим периодом средневесенняя температура воздуха на территории РС (Я) увеличилась на $+1.4 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$. Среднелетняя (июнь-июль-август) температура воздуха на территории РС (Я) за современный климатический период составляет $+11.9 \pm 3.1^{\circ}\text{C}$. Между историческим и современным климатическим периодом среднелетняя температура воздуха на территории РС (Я) увеличилась на $+1.1 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$. Среднеосенняя (сентябрь-октябрь-ноябрь) температура воздуха на территории РС (Я) за современный климатический период составляет $-11.2 \pm 2.8^{\circ}\text{C}$. Между историческим и современным климатическим периодом средне-весенняя температура воздуха на территории РС (Я) увеличилась на $+1.3 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Заключение

Проблема согласованности данных станционных наблюдений и реанализа заключается в том, что они относятся к разным климатическим реальностям. Данные наблюдений – точечные, и отражают локальные условия в точке наблюдений, особенности микроклимата. Данные реанализа – площадные, осреднены на площадь пикселя, десятки квадратных километров, и должны сглаживать разнообразие местных условий, потому идеальное согласие между двумя наборами данных невозможно. Изложенные результаты показывают, что реанализ GHCN-CAMS, успешно воспроизводящий распределение среднегодовых температур воздуха на территории РС (Я), также эффективен для описания полей среднемесячных и среднесезонной температуры воздуха и их изменений между климатическими периодами, хотя в некоторых случаях (весна, лето) он представляет скорее оценку снизу. Данные реанализа позволили оценить изменение среднесезонной температуры воздуха на территории РС (Я) между климатическими периодами, которое составило от $+1.2$ до $+1.4^{\circ}\text{C}$. Модель реанализа GHCN-CAMS может использоваться в различных расчётных и прогнозных приложениях, в которых необходимы данные о среднегодовой температуре воздуха и её внутригодовом распределении.

Литература

1. Fan, Y. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948–present / Y. Fan, H. van den Dool // Journal of Geophysical Research. – 2008. – V. 113. – D01103. DOI: 10.1029/2007JD008470.
2. Hersbach, H. ERA5 reanalysis is in production / H. Hersbach, D. Dee // ECMWF Newsletter. – 2016. – No. 147. URL : <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production> (дата обращения : 02.11.2023). – Электронные данные : электронные.
3. Тананаев, Н. И. Подбор оптимальной модели климатического реанализа по среднегодовой температуре воздуха для территории Республики Саха (Якутия) / Н. И. Тананаев // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле. – 2023. – № 2(30). – С. 88-101.

4. Mistry, M. N. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality / M. N. Mistry, R. Schneider, P. Masselot, D. Royé [et al.] // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – 5178. DOI : 10.1038/s41598-022-09049-4.
5. Бокучава, Д. Д. Анализ аномалий приземной температуры воздуха в Северном полушарии в течение XX века по данным наблюдений и реанализов / Д. Д. Бокучава, В. А. Семенов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2018. – Т. 1. – С. 28–51.
6. Демчев, Д. М. Верификация данных реанализов ERA-Interim и ERA5 о приповерхностной температуре воздуха в Арктике / Д. М. Демчев, М. Ю. Кулаков, А. П. Макштас [и др.] // *Метеорология и гидрология*. – 2020. – № 11. – С. 36–45
7. Marshall, G. J. The accuracy of climate variability and trends across Arctic Fennoscandia in four reanalyses / G. J. Marshall, S. Kivinen, K. Julhä, R. M. Vignols [et al.] // *International Journal of Climatology*. – 2018. – Vol. 38. – P. 3878–3895. DOI : 10.1002/joc.5541.
8. Køltzow, M. Value of the Copernicus Arctic Regional Reanalysis (CARRA) in representing near-surface temperature and wind speed in the north-east European Arctic / M. Køltzow, H. Schyberg, E. Støylen, X. Yang // *Polar Research*. – 2022. – Vol. 41. DOI : 10.33265/polar.v41.8002.
9. Васильев, М. С. Сравнение приземной температуры воздуха в Якутии по данным реанализа и наземных наблюдений / М. С. Васильев, С. В. Николашкин, Р. П. Каримов. – Текст : непосредственный // *Вестник СВФУ*. – 2014. – Т. 14. – № 5. – С. 82–88.
10. Лобанов, В. А. Отклик климатических индикаторов на современное потепление климата в Республике Саха (Якутия) / В. А. Лобанов, К. С. Кириллина // *Географический вестник*. № 4 (34). – 2017. – С. 112–122.
11. Гидрометцентр РФ. – URL : <https://meteoinfo.ru/climatecities>, свободный (дата обращения : 15.06.2023). – Электронные данные : электронные.
12. Температура воздуха (месячные данные) : база данных. ВНИИГМИ-МЦД, 2021. Данные в формате DAT. URL : <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (дата обращения : 15.06.2023). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Электронные данные : электронные.
13. Погода и климат. – URL : <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php>, свободный (дата обращения : 15.06.2023). – Электронные данные : электронные.
14. RStudio: Integrated Development for R, 2023.06.01 Build 524. 2023. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. – URL: <https://posit.co/products/open-source/rstudio>. – Электронная программа : электронная.
15. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – 2023. – URL : <https://www.R-project.org/> (дата обращения: 17.10.2023). – Электронная программа : электронная.
16. QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. – URL : <http://qgis.osgeo.org> (дата обращения: 12.05.2023). – Электронная программа : электронная.
17. Hamner, B. Metrics: Evaluation Metrics for Machine Learning / B. Hamner, M. Frasco // R package version 0.1.4. – 2018. – URL : <https://CRAN.R-project.org/package=Metrics> (дата обращения : 15.06.2023).
18. Signorell, A. DescTools: Tools for Descriptive Statistics / A. Signorell // R package version 0.99.49. – 2023. – URL : <https://CRAN.R-project.org/package=DescTools> (дата обращения : 15.06.2023).
19. Научно-прикладной справочник «Климат России» : база данных. ВНИИГМИ-МЦД, 2022. Данные в формате CSV. – URL : <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/faces/index1a.xhtml> (дата обращения : 05.11.2023). Режим доступа: для зарегистрир. пользователей. – Электронные данные : электронные.
20. Menne, M. The Global Historical Climatology Network Monthly Temperature Dataset, Version 4 / M. Menne, C. N. Williams, B. E. Gleason, J. J. Rennie [et al.]. – Текст : непосредственный // *Journal of Climate*. – 2018. – V. 31, Is. 24. – P. 9835–9854. – DOI : 10.1175/JCLI-D-18-0094.1.
21. Кириллина К. С. Разработка региональной климатической программы для Республики Саха (Якутия) / К. С. Кириллина. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. СПб., РГГМУ, 2017. – 118 с.

22. Программный комплекс “Гидорасчёты”. URL : <http://hydrotec.spb.ru/> (дата обращения : 05.11.2023).

23. Фибер Л. С. Современные изменения температуры воздуха на северо-западе европейской территории России / Л. С. Фибер // Выпускная квалификационная работа. СПб, РГГМУ, 2022. – 57 с. URL : http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_7679720e0e7e4c248aa616f50aa4d0b2.pdf (дата обращения : 03.11.2023).

References

1. Fan, Y. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948–present / Y. Fan, H. van den Dool // *Journal of Geophysical Research*. – 2008. – V. 113. – D01103. DOI: 10.1029/2007JD008470.
2. Hersbach, H. ERA5 reanalysis is in production / H. Hersbach, D. Dee // *ECMWF Newsletter*. – 2016. – No. 147. URL : <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production> (data obrashcheniya : 02.11.2023). – Ehlektronnye dannye : ehlektronnye.
3. Tananaev, N. I. Podbor optimal'noi modeli klimaticheskogo reanaliza po srednegodovoi temperature vozdukha dlya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) / N. I. Tananaev // *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Seriya: Nauki o Zemle*. – 2023. – № 2(30). – S. 88-101.
4. Mistry, M. N. Comparison of weather station and climate reanalysis data for modelling temperature-related mortality / M. N. Mistry, R. Schneider, P. Masselot, D. Royé [et al.] // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12. – 5178. DOI : 10.1038/s41598-022-09049-4.
5. Bokuchava, D. D. Analiz anomalii prizemnoi temperatury vozdukha v Severnom polusharii v techenie KHKH veka po dannym nablyudenii i reanalizov / D. D. Bokuchava, V. A. Semenov // *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. – 2018. – T. 1. – S. 28-51.
6. Verifikatsiya dannykh reanalizov ERA-Interim i ERA5 o pripoverkhnostnoi temperature vozdukha v Arktike / D. M. Demchev, M. YU. Kulakov, A. P. Makshtas [i dr.] // *Meteorologiya i gidrologiya*. – 2020. – № 11. – S. 36-45
7. Marshall, G. J. The accuracy of climate variability and trends across Arctic Fennoscandia in four reanalyses / G. J. Marshall, S. Kivinen, K. Julhä, R. M. Vignols [et al.] // *International Journal of Climatology*. – 2018. – Vol. 38. – P. 3878–3895. DOI : 10.1002/joc.5541.
8. Køltzow, M. Value of the Copernicus Arctic Regional Reanalysis (CARRA) in representing near-surface temperature and wind speed in the north-east European Arctic / M. Køltzow, H. Schyberg, E. Støylen, X. Yang // *Polar Research*. – 2022. – Vol. 41. DOI : 10.33265/polar.v41.8002.
9. Vasil'ev, M. S. Sravnenie prizemnoi temperatury vozdukha v Yakutii po dannym reanaliza i nazemnykh nablyudenii / M. S. Vasil'ev, S. V. Nikolashkin, R. R. Karimov. – Tekst : neposredstvennyi // *Vestnik SVFU*. – 2014. – T. 14. – № 5. – S. 82–88.
10. Lobanov, V. A. Otklik klimaticheskikh indikatorov na sovremennoe poteplenie klimata v Respublike Sakha (Yakutiya) / V. A. Lobanov, K. S. Kirillina // *Geograficheskii vestnik*. № 4 (34). – 2017. – S. 112-122.
11. Gidromettsentr RF. – URL : <https://meteoinfo.ru/climatecities>, svobodnyi (data obrashcheniya : 15.06.2023). – Ehlektronnye dannye : ehlektronnye.
12. Temperatura vozdukha (mesyachnye dannye) : baza dannykh. VNIIGMI-MTSD, 2021. Dannye v formate DAT. URL : <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (data obrashcheniya : 15.06.2023). Rezhim dostupa: dlya zaregistrir. pol'zovatelei. – Ehlektronnye dannye : ehlektronnye.
13. Pogoda i klimat. – URL : <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php>, svobodnyi (data obrashcheniya : 15.06.2023). – Ehlektronnye dannye : ehlektronnye.
14. RStudio: Integrated Development for R, 2023.06.01 Build 524. 2023. RStudio, Inc., Boston, MA, USA. – URL: <https://posit.co/products/open-source/rstudio>. – Ehlektronnaya programma : ehlektronnaya.
15. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – 2023. – URL : <https://www.R-project.org/> (data obrashcheniya : 17.10.2023). – Ehlektronnaya programma : ehlektronnaya.

16. QGIS Development Team, 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. – URL : <http://qgis.osgeo.org> (data obrashcheniya: 12.05.2023). – Ehlektronnaya programma : ehlektronnaya.
17. Hamner, B. Metrics: Evaluation Metrics for Machine Learning / B. Hamner, M. Frasco // R package version 0.1.4. – 2018. – URL : <https://CRAN.R-project.org/package=Metrics> (data obrashcheniya : 15.06.2023).
18. Signorell, A. DescTools: Tools for Descriptive Statistics / A. Signorell // R package version 0.99.49. – 2023. – URL : <https://CRAN.R-project.org/package=DescTools> (data obrashcheniya : 15.06.2023).
19. Nauchno-prikladnoi spravochnik «Klimat RossiI» : baza dannykh. VNIIGMI-MTSD, 2022. Dannye v formate CSV. – URL : <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn/faces/index1a.xhtml> (data obrashcheniya : 05.11.2023). Rezhim dostupa: dlya zaregistrir. pol'zovatelei. – Ehlektronnaye dannye : ehlektronnaye.
20. Menne, M. The Global Historical Climatology Network Monthly Temperature Dataset, Version 4 / M. Menne, C. N. Williams, B. E. Gleason, J. J. Rennie [et al.]. – Tekst : neposredstvennyi // Journal of Climate. – 2018. – V. 31, Is. 24. – P. 9835–9854. – DOI : 10.1175/JCLI-D-18-0094.1.
21. Kirillina K. S. Razrabotka regional'noi klimaticheskoi programmy dlya Respubliki Sakha (Yakutiya) / K. S. Kirillina. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geograficheskikh nauk. SPb., RGGMU, 2017. – 118 s.
22. Programmnyi kompleks «Gidroraschety». URL : <http://hydrotec.spb.ru/> (data obrashcheniya : 05.11.2023).
23. Fiber L. S. Sovremennye izmeneniya temperatury vozdukha na severo-zapade evropeiskoi territorii Rossii / L. S. Fiber // Vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota. SPb, RGGMU, 2022. – 57 s. URL : http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_7679720e0e7e4c248aa616f50aa4d0b2.pdf (data obrashcheniya : 03.11.2023).

Сведения об авторах

ТАНАНАЕВ Никита Иванович – к.г.н., зав. лабораторией по изучению климата и экосистем северных регионов Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова, в.н.с. Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

e-mail: tanni@s-vfu.ru

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

ТИМОФЕЕВ Максим Аркадьевич – магистрант, инженер-исследователь, лаборатория по изучению климата и экосистем северных регионов Института естественных наук СВФУ им. М.К. Аммосова

e-mail: m.a.timofeev@s-vfu.ru

TIMOFEEV Maxim Arkadyevich – Master's student, research engineer, Climate and Northern Regions Ecosystems Research Lab, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: m.a.timofeev@s-vfu.ru