

Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 722—745.
Hydrometeorology and Ecology. 2022;(69):722—745.

В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

Научная статья
УДК [551.524:551.583](6-191.2)
doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-722-745

Современные климатические изменения температуры воздуха в Центральной Африке

Магбини Токпа Мами, Владимир Алексеевич Лобанов

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,
Россия, mtmamy2013@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются многолетние ряды среднемесячных температур воздуха на 65 метеостанциях Центральной Африки для оценки влияния климатических изменений на динамику средних многолетних значений. В связи с пространственно-временной неоднородностью наблюдений, разработана методика, основанная на последовательном переходе от более надежной к менее надежной информации, на оценке устойчивости показателей нестационарности, на выделении районов однородных по динамике изменений климата и на количественной оценке произошедших изменений. Получены количественные оценки роста температур воздуха в различные сезоны года, которые достигают 2,2—2,4 °С в южных горных и восточных районах во все сезоны и дополнительно в летний муссон в прибрежных районах и в весенний межмуссонный период на севере. В центральной части территории рост средних температур не превышает 0,5—0,6 °С.

Ключевые слова: среднемесячная температура, изменение климата, Центральная Африка, моделирование многолетних рядов, оценки роста температуры.

Для цитирования: Мами М. Т., Лобанов В. А. Современные климатические изменения температуры воздуха в Центральной Африке // Гидрометеорология и экология. 2022. № 69. С. 722—745. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-722-745.

DISCUSSION

Original article

Modern climate changes in the air temperature in Central Africa

Magbini Tokpa Mami, Vladimir A. Lobanov

Russian State Hydrometeorological University, Russia, mtmamy2013@gmail.com

Summary. The article considers long-term time series of average monthly air temperatures at 65 meteorological stations in Central Africa to assess the impact of climate change on the dynamics of average long-term values. This study made it possible to fill in the gaps and eliminate the ambiguity of the results on assessing the impact of modern climate warming in this part of the planet. Due to the spatial-temporal

heterogeneity of observations, a technique has been developed to assess the effectiveness of non-stationary average models when passing from more reliable to less reliable information, as well as to assess the stability of the model parameters and spatial-temporal regularities of the average dynamics. It has been found that changes in the average temperature took place in the second half of the 20th century from the mid-1970s to the early 2000s, with the stepwise mean change model being more efficient than the trend model. It has been established that in all seasons of the year in the southern mountainous and eastern regions of the territory there was the greatest rise in temperatures up to 2.0—2.2 °C, which is 1.7—2.1 of the standard deviation (SD). In the summer monsoon, moist and warm air masses from the Atlantic with increasing SST add the western coastal strip to the area of significant temperature rise up to 1.5—1.7 °C. Another area of significant temperature rise up to 2.2—2.4 °C in the north took place during the hottest spring inter-monsoon period and is apparently associated with the southward advance of the Sahara. In the central part of the territory, where there are tropical forests, the temperature rise in most of the seasons (with the exception of spring) is small and does not exceed 0.5—0.6 °C, which is less than the standard deviation.

Keywords: mean monthly temperature, climate change, Central Africa, simulation of long-term series, estimates of temperature rise

For citation: Mami Magbini Tokpa, Lobanov V. A. Modern climate changes in the air temperature in Central Africa. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(69):722—745. doi: 10.33933/2713-3001-2022-69-722-745. (In Russ.).

Введение

Изменение климата — одна из основных проблем, с которыми сталкивается человечество в XXI веке [1, 2]. Его воздействие сегодня проявляется во всех секторах государственной и частной деятельности [3]. МГЭИК (Межправительственная группа экспертов по изменению климата) в 5-ом оценочном докладе утверждает, что глобальное потепление однозначно характеризуется повышением средней температуры атмосферы и океанов [4]. Причем температура воздуха в разных широтах повышается по-разному, и наибольшее повышение температуры наблюдалось в умеренных широтах и на юге Сибири [5]. На основании физико-математических моделей климата при современном потеплении следует ожидать наибольшего прироста температуры в высоких широтах и наименьшего в низких или экваториальных, к которым относится рассматриваемая в данной работе территория Центральной Африки. Вместе с тем в докладах МГЭИК рост температур в экваториальных районах Африки имеет большую неопределенность и составляет от 0,2 до 2 °C, что в основном обусловлено низкой надежностью данных наблюдений [6—10].

Согласно средним сценариям, представленным в 5-ом докладе МГЭИК и подтвержденным различными другими климатическими исследованиями, в этом столетии большие территории Африки потеплеют более чем на 2 °C выше доиндустриального уровня [11, 12]. Ожидается, что повышение температуры в регионах Африки, включая Центральную Африку, будет даже выше, чем повышение среднемировой температуры (на 1,5 и 2 °C), а волны жары будут более частыми и продолжительными. Ожидается, что экстремальные значения температуры в этом регионе будут выше, чем в среднем по планете, причем наиболее интенсивное потепление будет наблюдаться в Сахеле [13—17]. В ряде работ установлено, что деревья в бассейне реки Конго в Центральной Африке теряют свою способность поглощать углекислый газ, что может привести к дополнительному росту температуры [18, 19].

В связи с большой неопределенностью полученных результатов по региону Центральной Африки целью настоящей работы является всесторонняя оценка как качества данных наблюдений, так и оценок изменения температуры в этом регионе статистическими методами и моделями.

Климат Центральной Африки

Центральная Африка — один из пяти регионов этого континента, расположена в основном в бассейне реки Конго. Согласно определению ООН, Центральная Африка включает в себя: Камерун, Центральноафриканскую Республику, Чад, Демократическую Республику Конго (ДРК), Экваториальную Гвинею, Габон, Республику Конго, Сан-Томе и Принсипи. В данной работе рассматривается территория между $13,8^{\circ}$ с.ш. и $14,4^{\circ}$ ю.ш. и между $6,7^{\circ}$ и $33,8^{\circ}$ в.д. (рис. 1). Эта часть африканской межтропической зоны, пересекаемая экватором и граничащая

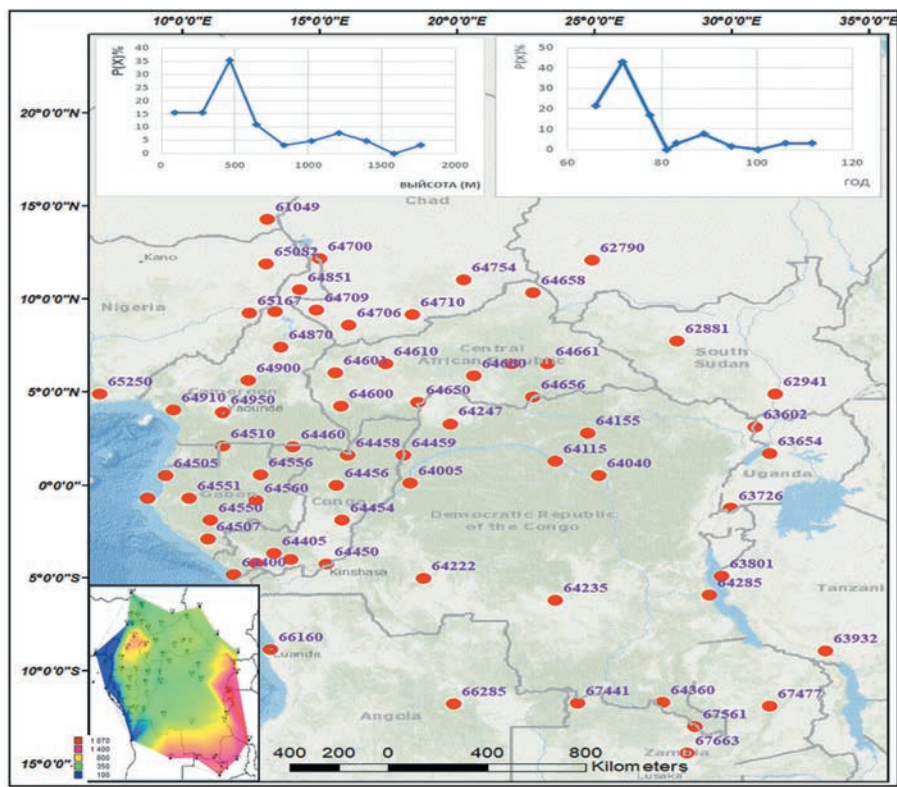


Рис. 1. Схема расположения метеостанций и врезки с распределениями станций по продолжительности рядов наблюдений, по высоте и карта высот.

Fig. 1. The map-scheme of weather stations and with small diagrams the distribution of stations by the duration of the series of observations, by height and a map of altitude of station.

с Атлантическим океаном на западе, имеет жаркий и влажный тропический климат, характеризующийся регулярной и высокой температурой в течение всего года (около $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$ в среднем за год) в сочетании с большим количеством осадков ($> 1500\text{ мм/год}$) [20].

Благодаря своему географическому положению, Центральная Африка отличается разнообразием климатов, которые можно в соответствии с классификацией В. П. Кёппена разделить на: жаркий и влажный экваториальный климат, с температурой от 22 до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ с годовым количеством осадков около $1500\text{—}1800\text{ мм}$, и тропический суданский, судано-сахельский и сахельский климат [21]. Некоторые регионы со значительной высотой над уровнем моря также подвержены горному климату, особенно вдоль рифта Альберта (к востоку от ДРК) или вдоль Камерунской вулканической линии.

Экваториальный и тропический климат северного полушария характеризуется очень сухим и солнечным основным сезоном (с декабря по февраль), тогда как климат южного полушария, особенно в направлении Атлантического побережья, характеризуется облачным сухим сезоном с очень высокой атмосферной влажностью (с июня по август). Эти климатические различия по обе стороны от климатической петли, разделяющей климаты северного и южного полушарий, оказывают влияние на растительность и имеют значение, которое до сих пор слишком часто упускается из виду в условиях будущего изменения климата [22].

На рис. 2 показаны пространственные распределения многолетних среднемесячных значений температуры воздуха в характерные месяцы четырех сезонов года, полученные по данным метеостанций на рассматриваемой территории за весь период инструментальных наблюдений, который в 80% случаев составлял $1950\text{—}2021$ гг. Анализ пространственных изменений температуры в течение года показывает следующие основные ситуации ее динамики. В январе во всем регионе наблюдаются относительно низкие температуры (максимум до $25\text{—}27\text{ }^{\circ}\text{C}$ около Гвинейского залива) с их наименьшими значениями на северо-востоке и в горной юго-восточной части ($20\text{—}22\text{ }^{\circ}\text{C}$) территории по сравнению с центром. Такая ситуация обусловлена влиянием зимней фазы Африканского муссона, в котором прохладный и сухой воздух Северной Африки смещается на юг вслед за движением внутритропической зоны конвергенции (ВЗК). Затем за счет роста входящей радиации вся территория прогревается, достигая максимальных значений температур в марте-апреле, особенно в северной части (до $32\text{—}33\text{ }^{\circ}\text{C}$). К лету начинается вторая фаза африканского муссона со смещением ВЗК в Северное полушарие и перемещение вслед за ней влажного атлантического воздуха. Наличие облачности и несколько более прохладного воздуха с океана приводит в общему уменьшению температур, что особенно заметно в западной и юго-западной частях территории около Гвинейского залива, где температуры становятся такими же, как в горной юго-восточной части ($20\text{—}22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Осенью в межмуссонный период наблюдается естественный радиационный нагрев территории с максимальными температурами в северной части ближе к Сахели (до $27\text{—}28\text{ }^{\circ}\text{C}$) и минимальными в горных районах ($21\text{—}22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Изменения температур по территории составляют от $7\text{—}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ зимой до $12\text{—}13\text{ }^{\circ}\text{C}$ в апреле.

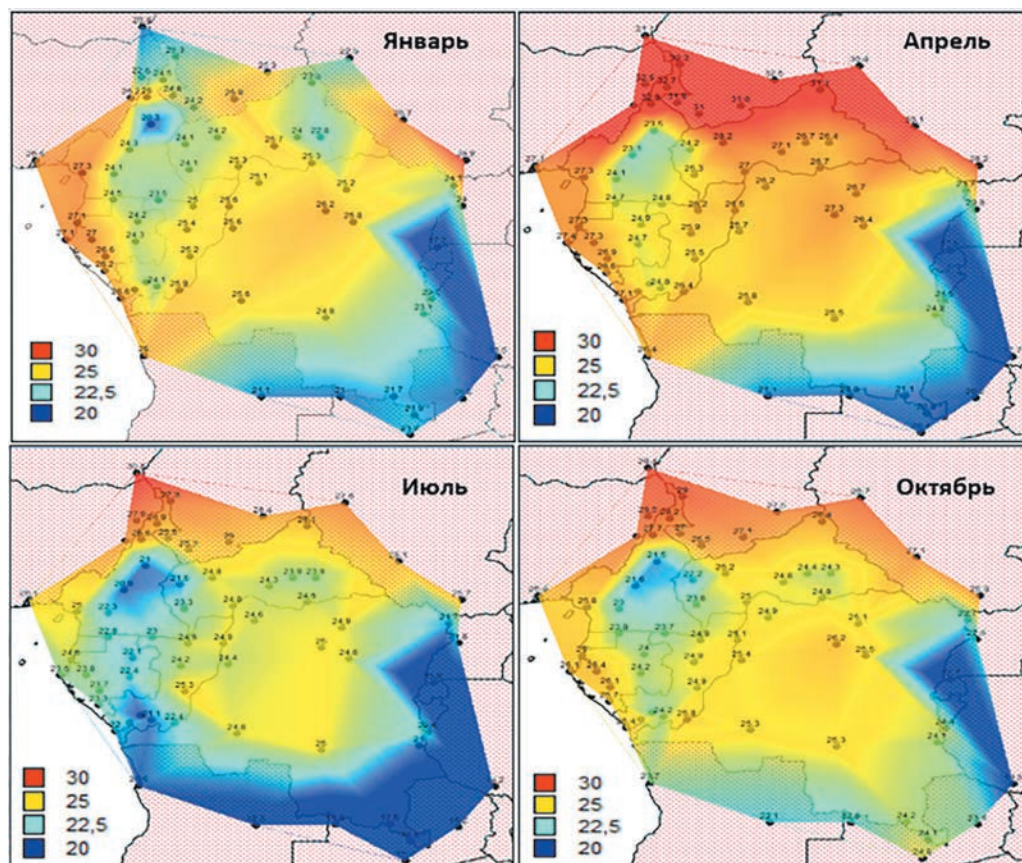


Рис. 2. Пространственные распределения средних многолетних температур в средние месяцы сезонов года.

Fig. 2. Spatial distribution of average temperatures in the middle months of the seasons.

В целом, следует отметить, что в течение года зима, весна и лето холоднее в горных районах и на морском побережье, а весна и лето теплее на севере, чем в других частях региона. Естественная изменчивость (среднее квадратическое отклонение — СКО) на всей территории менее $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, за исключением севера территории (зимой и весной) и юга (летом и осенью), где СКО несколько больше $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Исходные данные и оценка их качества

Данные, используемые для исследования, представляют собой многолетние ряды среднемесячной температуры воздуха с начала наблюдений по 2021 г. включительно на 65 метеостанциях, полученные из архивов с сайта метеорологического института Королевства Нидерланды и с сайта «Погода и климат» [23, 24].

Расположение станций с указанием 5-значного кода ВМО показано на рис. 1, на котором в качестве врезок даны также распределения станций по продолжительности наблюдений и по высоте. Как следует из распределения рядов, их продолжительность варьирует от 27 до 113 лет, в среднем составляя 61 год, а высоты метеостанций варьируют от 100 до 1800 м. В целом, распределение станций по территории недостаточно равномерно, и особенно мало пунктов наблюдений в Демократической Республике Конго (9 пунктов), площадь которой составляет практически половину от всей рассматриваемой территории Центральной Африки. На получение более полной информации по отдельным странам Африки влияет также отсутствие доступа к ней, как отмечается, например, в работе [25].

Для формализованной оценки однородности и качества данных были применены статистические критерии Диксона и Смирнова—Граббса для оценки однородности экстремумов эмпирических распределений и статистические критерии Фишера и Стьюдента для оценки стационарности дисперсий и средних значений двух одинаковых частей временного ряда [26—28]. Помимо 65 метеостанций на территории Центральной Африки также была дополнительно оценена однородность рядов температур в 22 ближайших пунктах за ее пределами, имеющих продолжительные ряды наблюдений, которые могут быть привлечены в качестве аналогов при приведении к многолетнему периоду. В результате полученные статистически значимые неоднородные экстремумы при уровне значимости 5 % были исключены из рядов наблюдений. Результаты оценки стационарности на тех же 87 станциях по критериям Фишера и Стьюдента показали, что процент выявленных случаев нестационарности составляет 22,5 %, что свидетельствует о том, что даже при такой предварительной оценке имеются изменения параметров временных рядов. Установлено также, что наиболее неоднородная и некачественная информация существует в Республике Конго, где большая площадь и всего 9 пунктов наблюдений.

В результате пункты наблюдений по качеству информации и продолжительности были разделены на две группы: 30 пунктов с продолжительными и непрерывными рядами наблюдений и остальные пункты, в которых ряды наблюдений непродолжительные, имеются ненадежные и неоднородные данные и пропуски наблюдений. Метеостанции с наиболее продолжительными рядами расположены в основном в восточной и северо-восточной частях исследуемой территории, т. е. в Республике Конго, Габоне, Экваториальной Гвинее, Камеруне и в юго-восточной части Центральноафриканской Республики. По остальной территории (север и запад Центральноафриканской Республики и вся территория Демократической Республики Конго) данных крайне не хватает, или ряды наблюдений не продолжительны и содержат ненадежную информацию.

Для приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду и восстановления пропусков наблюдений применена методика, основанная на построении регрессионных зависимостей за совместный период между короткими рядами наблюдений и более продолжительными в пунктах-аналогах [29, 30]. При этом минимальный совместный период наблюдений был установлен в 10 лет, минимальное количество аналогов в уравнении 3, минимально допустимое значение

коэффициента корреляции $R = 0,85$ для уравнений связи между непродолжительным рядом наблюдений и продолжительными рядами в пунктах-аналогах, среднее отношение коэффициента уравнения регрессии к его средней квадратической ошибке 2,0, что соответствует 95%-ному доверительному интервалу. Полученные результаты представлены в табл. 1, где n — среднее по всем станциям число лет наблюдений, N — среднее число лет после восстановления пропусков и увеличения продолжительности рядов, σ_{ε} — средняя квадратическая погрешность восстановленных значений в °С, R — среднее значение коэффициента корреляции уравнений, полученных для восстановления, и m — среднее число пунктов-аналогов, использованных для восстановления.

Таблица 1

Результаты восстановления пропусков и увеличения продолжительности рядов среднемесячных температур на метеостанциях Центральной Африки

The results of restoring gaps and increasing the duration of the time series of monthly temperatures at meteorological stations in Central Africa

Месяц	n	N	σ_{ε}	R	m
1	51	87	0,2	0,94	24
2	51	87	0,3	0,95	25
3	52	84	0,2	0,92	22
4	51	83	0,2	0,93	21
5	51	82	0,2	0,92	23
6	51	84	0,2	0,92	24
7	52	85	0,2	0,93	22
8	52	83	0,2	0,91	23
9	51	83	0,2	0,94	24
10	52	80	0,2	0,93	21
11	51	84	0,2	0,93	24
12	52	86	0,2	0,94	23

Результаты, представленные в табл. 1, свидетельствуют, что показатели приведения к многолетнему периоду достаточно хорошие: количество восстановленных лет в среднем варьирует от 28 в октябре до 36 в январе и феврале, средняя стандартная погрешность восстановленных данных небольшая и составляет всего 0,2—0,3 °С, среднее значение коэффициента корреляции высокое — от 0,91 в августе до 0,95 в феврале. В результате средняя продолжительность многолетних рядов температур была доведена до 86—87 лет для зимних месяцев и до 80—85 лет в другие месяцы. Вместе с тем качество восстановления в отдельные годы и на отдельных метеостанциях было не столь высоким, что составляло всего 5 % от общего числа восстановленных данных, как показал повторный анализ однородности и стационарности. Как правило, эта ситуация происходила, когда период наблюдений на станциях был менее 15—20 лет, что характерно для метеостанций на территории Демократической Республики Конго. В итоге некачественные восстановленные данные были исключены.

Методика исследований

Статистическая модель временного ряда

Многолетние колебания климатических характеристик представляют собой композицию или сумму процессов разных временных масштабов. Существует несколько классификаций масштабов изменений климатических характеристик. Наиболее развернутая и детальная — классификация А. С. Монины, где приведены процессы от мелкомасштабных колебаний с периодами секунды — минуты до изменений геологических эпох с периодами десятки и сотни миллионы лет. И недавняя классификация проекта CLIVAR, где на интервале инструментальных наблюдений рассматриваются обобщенные процессы внутригодовой изменчивости, а на межгодовой оси — процессы межгодовой и десятилетней изменчивости и столетних изменений [31].

Для временного интервала инструментальных наблюдений в 100—150 лет число процессов может быть уменьшено до трех — это процессы межгодового, десятилетнего масштабов и часть цикла процесса столетнего масштаба. Вклад этих процессов от тысячелетнего масштаба колебаний и выше будет крайне незначителен:

$$Y_i = Y_{1i} + Y_{2i} + Y_{3i}, \quad (1)$$

где Y_{1i} , Y_{2i} , Y_{3i} — процессы межгодового, десятилетнего и столетнего масштабов.

Существующая модель такого временного ряда, как правило, представляет его в виде следующих составляющих:

$$Y_i = f(t) + \sin(t) \pm \varepsilon_i, \quad (2)$$

где $f(t)$ — регулярная составляющая, которая обусловлена частью процесса столетнего масштаба Y_{3i} ; $\sin(t)$ — гармоническая функция, обусловленная колебаниями процесса десятилетнего масштаба Y_{2i} ; $\pm \varepsilon_i$ — случайная составляющая, обусловленная процессом межгодового масштаба Y_{1i} , обычно связанным с «быстрыми» колебаниями атмосферы.

Если принять, что циклические колебания десятилетнего масштабов также носят случайный характер, то уравнение можно упростить:

$$Y_i = f(t) \pm \varepsilon''_i, \quad (2)$$

где $\pm \varepsilon''_i$ — обобщенная случайная составляющая, обусловленная процессами межгодового и десятилетнего масштабов.

На уровне рассмотрения простых моделей типа (2) проявление изменений климата в многолетних временных рядах может быть в двух вариантах:

- монотонные изменения в виде тренда,
- ступенчатые изменения, характеризующие переходы от одного стационарного состояния к другому.

Эти два вида климатических изменений отражают разные физические механизмы, действующие в климатической системе Земли. Трендовые изменения имеются в слабо инерционной или равновесной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений или триггерный механизм характеризует неравновесную систему, которая может компенсировать внешние воздействия и сопротивляться им до тех пор, пока эти воздействия

не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, обычно также квазистационарный, уровень [32, 33]. Фактически этот переход от одних стационарных условий к другим может происходить не за один год, а за несколько лет, и он также представлен в виде тренда между двумя стационарными состояниями.

Эффективность модели (2) проверяется по отношению к базовой стационарной модели, в которой среднее не изменяется во времени.

Оценка эффективности модели

Чтобы оценить, какая модель из трех (стационарная, линейного тренда или ступенчатых изменений) эффективна, необходимо выбрать показатель качества модели. Такими эффективными показателями являются коэффициент детерминации R^2 и обратная ему величина дисперсии (σ_ε^2) или стандартного отклонения (σ_ε) остатков, которые связаны между собой следующим уравнением:

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_y \sqrt{1 - R^2}, \quad (3)$$

где σ_y — стандартное отклонение ряда наблюдений; σ_ε — стандартное отклонение остатков относительно модели временного ряда.

При аппроксимации временных рядов климатических характеристик во времени не следует ожидать высоких значений R^2 , и поэтому сложно оценить по этому показателю насколько статистически отличаются R^2 одной и другой модели. В качестве показателя эффективности лучше выбрать дисперсию остатков σ_ε^2 , и для оценки статистического отличия этих дисперсий при разных моделях вполне применим известный критерий Фишера.

В качестве базовой или «нулевой» модели следует принять модель стационарной выборки, которая характеризуется неизменностью во времени основных параметров ряда (среднего значения и среднего квадратического отклонения), что выражается условиями:

$$Y_{cp}(t) = \text{const}, \sigma_y(t) = \text{const}. \quad (4)$$

Для стационарной модели стандартное отклонение остатков равно естественной изменчивости — среднему квадратическому отклонению ряда (СКО), т. е. $\sigma_\varepsilon = \sigma_y$, потому что стационарная модель является стохастической и не имеет никакой связанности со временем. Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков определяется по (3), а для модели ступенчатых изменений — как СКО от двух стационарных средних:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}}, \quad (5)$$

где n_1, n_2 — продолжительности первой и второй стационарных частей ряда.

Год перехода от одного стационарного среднего к другому (T_{ct}) в модели ступенчатых изменений определяется итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$\sigma_1^2(n_1 - 1) + \sigma_2^2(n_2 - 1) = \min. \quad (6)$$

При этом следует задать минимальный объем первой части ряда, например, $n_1 = 10$, при котором $n_2 = n - n_1$, и затем последовательно увеличивать n_1 до $m = n - 10$, при котором $n_2 = 10$, т. е. $n_1 = 11, 12, \dots, m$. Иначе эту процедуру можно назвать методом расширяющегося окна [34, 35].

Очевидно, что стандарт остатков модели стационарного среднего должен быть наибольшим или, по крайней мере, равен стандарту остатков нестационарных моделей, если они практически ничего не объясняют. Чем больше разность между стандартами остатков стационарной и нестационарной модели, тем нестационарная модель эффективнее стационарной. В качестве меры отличия можно рассмотреть относительные отклонения Δ в %, рассчитываемые по формуле:

$$\Delta = \frac{(\sigma_Y - \sigma_\varepsilon)}{\sigma_Y} 100 \% \quad (7)$$

В первом приближении можно принять, что любая нестационарная модель будет эффективнее модели стационарной выборки, если $\Delta \geq 10$ %, т. е. отличие между моделями гарантированно превышает погрешность процесса или погрешность рассматриваемой характеристики.

Для оценки статистически значимого отличия остаточных дисперсий стационарной и нестационарной модели можно применить критерий Фишера:

$$F_{TP} = \frac{\sigma_Y^2}{\sigma_\varepsilon^2} \quad (8)$$

На основе критических значений статистик Фишера можно определить и критическое значение $\Delta_{кр}$ %, которое получается при подстановке (8) в (7):

$$\Delta_{кр} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{F^*}} \right) 100 \% \quad (9)$$

где F^* — критическое значение статистики критерия Фишера при уровне значимости α и степенях свободы v_1 и v_2 , где $v_1 = n_1 - 1$ и $v_2 = n_2 - 1$, а n_1, n_2 — объемы выборок.

Принимая, что уровень значимости $\alpha = 5\%$, а временной ряд один и тот же, т. е. $n_1 = n_2 = n$, и для средней продолжительности ряда, равной $n = 61$ год, из таблиц критических значений получим $F^* = 1,53$, а из (9) $\Delta_{кр} = 19,4$ %. Если же продолжительность ряда равна $n = 31$ год, то $F^* = 1,84$ и $\Delta_{кр} = 26,5$ %, если $n = 120$, то $F^* = 1,35$ и $\Delta_{кр} = 13,8$ %, и т.д. Можно также найти, что $\Delta_{кр} = 10$ % соответствует $F^* = 1,235$ и n примерно равно 500, т. е. выбранное $\Delta = 10$ % соответствует предельному критическому при очень большой продолжительности ряда.

Оценка устойчивости модели

Установленный год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{ст}$) применим не только для модели ступенчатых изменений, но и модели тренда, для которой он характеризует изменение скорости тренда или его направления. Фактически этот год позволяет проверить устойчивость вида и параметров модели

во времени. Условие стационарности или нестационарности каждой части ряда до и после $T_{ст}$ можно проверить с помощью оценки статистической значимости коэффициента корреляции климатической характеристики со временем. При этом возможны следующие варианты:

— коэффициенты корреляции со временем для каждой части ряда (R_1 и R_2) статистически незначимы, и это означает, что временному ряду соответствует модель ступенчатых переходов от одного стационарного режима к другому;

— коэффициенты корреляции со временем для каждой части ряда (R_1 и R_2) статистически значимы, и это означает, что выявленный год $T_{ст}$ является годом перехода от одной скорости тренда к другой;

— один из коэффициентов корреляции со временем статистически значим, а другой не значим, и это означает, в одной части ряда тренд имеет место, а в другой нет.

Поэтому установленный год $T_{ст}$ позволяет оценить устойчивость параметров модели временного ряда. При этом нулевая гипотеза об одинаковости типа модели для двух частей временного ряда также может отклоняться, и одна часть ряда может больше соответствовать стационарной модели, а вторая — модели тренда.

Алгоритм реализации методики

Алгоритм данного исследования включает следующие основные пункты.

1. На основе данных 30 пунктов наблюдений, выбранных в качестве наиболее продолжительных с достоверной информацией, осуществляется аппроксимация временных рядов моделями нестационарного среднего и рассчитываются показатели эффективности этих моделей (r — коэффициент корреляции со временем, $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$ — отличия от модели стационарной выборки моделей линейного тренда и ступенчатых изменений соответственно) и год перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{ст}$).

2. Оценивается устойчивость показателей эффективности моделей нестационарного среднего (r , $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$) и $T_{ст}$ во времени путем задания разных лет начала наблюдений (1900, 1920, 1940, 1960, 1980, 2000 гг.) и определяется год наиболее вероятного перехода от одних стационарных или квазистационарных условий к другим ($T_{стр}$).

3. Устанавливаются предварительные пространственно-временные закономерности показателей нестационарных моделей по результатам моделирования данных 30 метеостанций с наиболее надежной и достоверной информацией.

4. Осуществляется моделирование временных рядов на остальных метеостанциях, и новые результаты дополняют и уточняют полученные ранее пространственно-временные закономерности.

5. Выделяются однородные районы с одинаковым видом изменений средних значений во времени и годом этих изменений ($T_{стр}$), при этом статистическое отличие средних значений двух частей временного ряда ($x_{ср1}$, $x_{ср2}$) оценивается по критерию Стьюдента [28].

6. В полученных однородных районах оценивается вид модели до и после $T_{ст}$ на основе оценки коэффициентов корреляции со временем для каждой части временного ряда (r_1 и r_2).

7. Рассчитывается разность между средними значениями ($\Delta x_{cp} = x_{cp2} - x_{cp1}$) и сопоставляется со средним квадратическим отклонением всего ряда (σ_y), которое характеризует естественную климатическую изменчивость.

8. Устанавливаются пространственные закономерности Δx_{cp} в °С и в долях σ_y .

Результаты и их обсуждение

Полученные закономерности на основе продолжительных рядов

Прежде всего, было проведено моделирование и выполнена оценка устойчивости параметров моделей для 30 наиболее продолжительных рядов с надежными данными наблюдений. Результаты в виде средних значений параметров эффективности нестационарных моделей r , $\Delta_{тр}$, $\Delta_{ст}$, а также $T_{ст}$ приведены в табл. 2 для двух частей продолжительных временных рядов: с начала наблюдений до 1960 г. и с 1961 по 2021 г.

Таблица 2

Результаты оценки устойчивости параметров моделей
для 30 наиболее продолжительных рядов

Results of estimation of stability of model parameters for 30 longest series

Месяцы	$\Delta_{тр}$		$\Delta_{ст}$		r		$T_{ст}$	
	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960	До 1960	После 1960
1	7,0	10,0	1,1	13,2	0,06	0,29	1948	1994
2	8,8	10,9	0,8	14,3	0,13	0,35	1946	1995
3	9,9	11,0	1,5	15,1	0,08	0,39	1948	1995
4	8,9	10,6	1,1	14,7	0,13	0,33	1947	1988
5	7,2	10,3	1,3	15,9	0,09	0,33	1947	1987
6	9,2	11,9	0,1	15,7	0,24	0,40	1946	1991
7	7,0	16,6	0,5	20,4	0,18	0,48	1948	1992
8	6,2	13,9	1,0	18,2	0,08	0,41	1946	1991
9	5,7	12,4	0,3	18,0	0,03	0,35	1945	1991
10	7,2	11,0	0,2	17,6	0,04	0,31	1941	1988
11	9,1	13,0	1,1	18,1	0,02	0,38	1945	1994
12	7,8	10,0	1,0	15,2	0,10	0,30	1948	1992

Из данных табл. 2 следует, что показатели нестационарности $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$ за период наблюдений до 1960 г. для температуры всех месяцев менее 10 %, а коэффициенты корреляции со временем r статистически незначимы. Поэтому период до 1960 г. можно считать стационарным. Вся нестационарность в рядах температур имеет место после 1960 г., т. е. в последний период времени со второй половины XX века. Показатели нестационарности $\Delta_{тр}$ и $\Delta_{ст}$ в среднем для температур всех месяцев года

$> 10\%$ с максимальными значениями $18\text{—}20\%$ в июле—сентябре. При этом во всех случаях $\Delta_{\text{ст}} > \Delta_{\text{тр}}$ (в среднем после 1960 г. $\Delta_{\text{тр}} = 11,8\%$, $\Delta_{\text{ст}} = 16,4\%$), что свидетельствует о большей эффективности нестационарной модели ступенчатых изменений среднего, чем модели линейного тренда при аппроксимации временных рядов. В среднем, год таких ступенчатых переходов от одних стационарных условий к другим относится к концу 1980-х — началу 1990-х. Коэффициенты корреляции r температуры воздуха со временем для всех месяцев статистически незначимы.

Пространственно-временные закономерности показателей нестационарных моделей

По наиболее продолжительным рядам наблюдений было установлено, что все изменения имеют место во второй половине XX века и, в среднем, в конце 1980-х — начале 1990-х. Поэтому для моделирования в остальных пунктах рассматривались ряды наблюдений только с 1960 г. В результате были рассчитаны параметры эффективности нестационарных моделей r , $\Delta_{\text{тр}}$, $\Delta_{\text{ст}}$ и годы перехода от одного квазистационарного режима к другому $T_{\text{ст}}$ для всех пунктов наблюдений и для всех среднемесячных температур года. На рис. 3 приведены пространственные распределения коэффициентов корреляции r среднемесячных температур со временем для всех месяцев года, которые позволяют оценить эволюцию областей нестационарных моделей. При продолжительности рядов в 61 года (1961—2021 гг.) статистически значимые r начинаются с $r = 0,32$, и поэтому вторая и третья градации r на рис. 3 будут представлять области моделей нестационарного среднего.

Анализ динамики таких областей нестационарных моделей в течение года позволяет сделать следующие выводы. В период зимнего муссона области нестационарных моделей имеют место по границам территории, занимая примерно 50% от ее общей площади с максимумом нестационарности в феврале на востоке. В межмуссонный жаркий весенний период область нестационарных моделей несколько увеличивается и смещается в восточную часть территории, занимая в апреле половину всей площади от северо-востока до юго-востока. В период летнего муссона, когда влажные теплые воздушные массы поступают с Атлантики, территория нестационарных моделей, особенно в июле и августе, покрывает уже до $2/3$ всей рассматриваемой площади и охватывает также и западные прибрежные районы. Отсюда можно предположить, что рост температуры в прибрежных западных частях связан с повышением температуры в прилегающей акватории Атлантики. Области стационарных моделей локализованы в основном в центральной и северных частях территории. В осенний межмуссонный период область нестационарных моделей постепенно уменьшается и смещается с запада на восток, составляя в октябре всего 36% от всей площади. В целом же, в течение всего года нестационарные модели имеют место в восточной и юго-восточной частях территории и, как правило, в горных районах. Стационарные же модели в течение всего года наблюдаются во внутренних областях экваториальных лесов. Поэтому потепление на всей территории неоднородно, и площадь, занятая нестационарными моделями, варьирует от $1/3$ в октябре до $2/3$ в июле и августе.

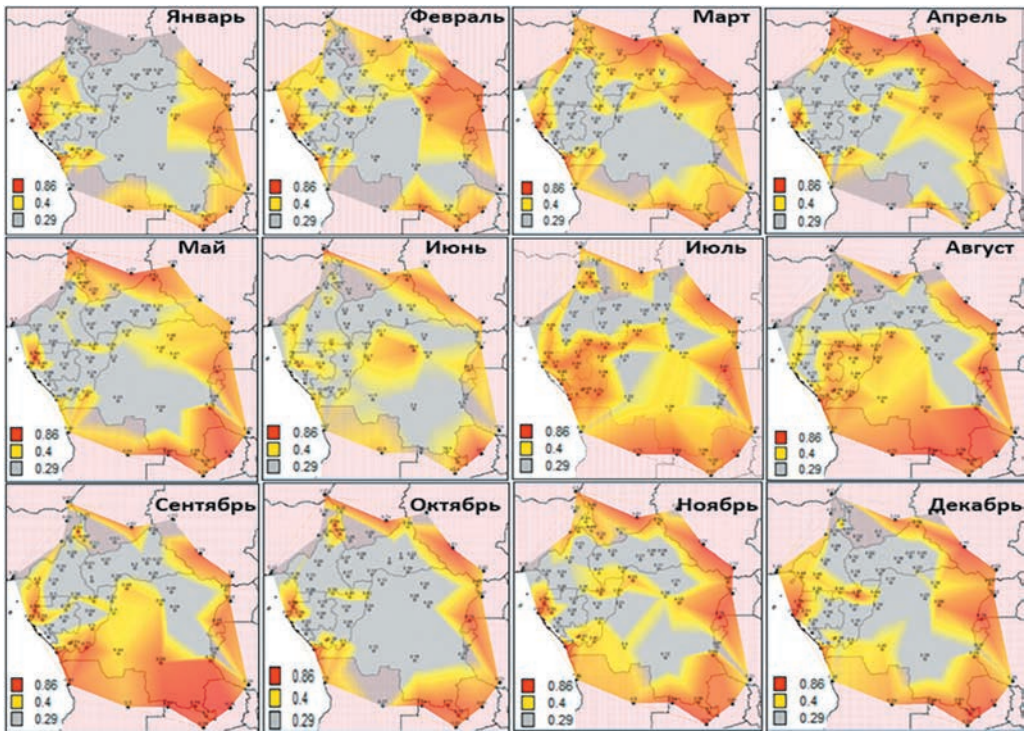


Рис. 3. Пространственные распределения коэффициентов корреляции (r) температуры воздуха со временем в течение года.

Fig. 3. Spatial distributions of correlation coefficients (r) of air temperature over time during the year.

Районирование территории по типу климатических изменений

Поскольку модель ступенчатых изменений средних значений температуры оказалась эффективнее, чем модель тренда, необходимо установить годы ступенчатого роста температур и дать количественную оценку изменений средних значений. Как следует из данных табл. 2, годы ступенчатых изменений могут варьировать в зависимости от месяца и по территории. В качестве примера на рис. 4 приведено пространственное распределение лет перехода от одних стационарных условий к другим ($T_{ст}$) для многолетних рядов температур июля как самого нестационарного месяца (рис. 3). Из рис. 4 видно, что эти годы изменяются в широких пределах: от середины 1970-х до начала 2000-х. Вместе с тем они группируются по территории и позволяют выделить районы однородные по типу изменений климата. Если сопоставить эти районы с областями нестационарности на рис. 3, то для достаточно высоких r в горных южных территориях год перехода относится к началу 2000-х, аналогичные существенные изменения на севере вблизи Сахели относятся к середине-концу 1990-х. Незначительная нестационарность

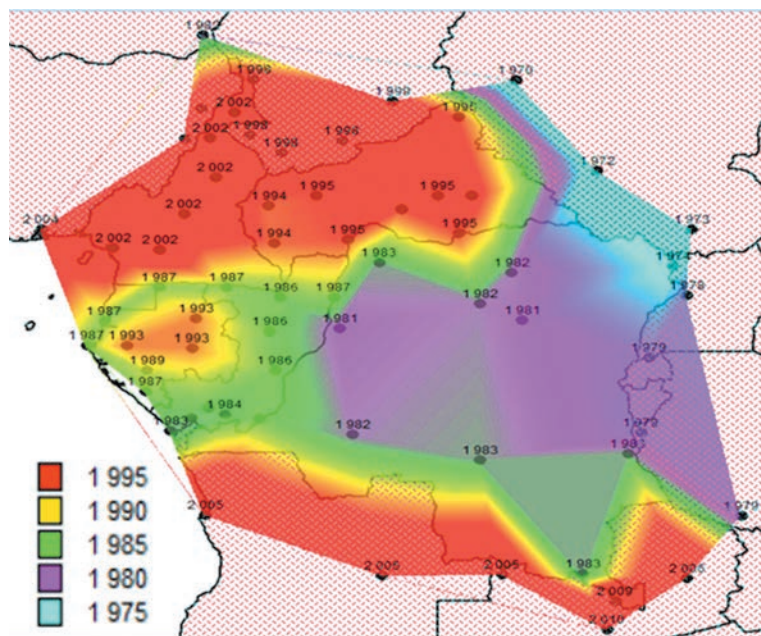


Рис. 4. Пространственное распределение лет перехода от одних стационарных условий к другим.

Fig. 4. Spatial distribution of years of transition from one stationary condition to another.

в центральных областях тропических лесов проявляется в конце 1970-х — начале 1980-х гг. Кроме того, установлено, что в одних случаях во многолетних рядах температур может быть один ступенчатый переход, а в других два.

В качестве дополнительных признаков районирования помимо $T_{ст}$ применялся также радиус корреляции, полученный на основе построенных пространственных корреляционных функций температур воздуха каждого месяца [28, 36]. В результате выделены 4 однородных района по динамике изменений среднего значения температуры воздуха, как показано на рис. 5. Так, в западном прибрежном районе № 1 имеет место одно ступенчатое повышение средней температуры в 2002 г. и среднее изменение $\Delta t_{ср} = 0,7 \text{ } ^\circ\text{C}$. В южном горном районе № 2 имеют место два ступенчатых роста температуры в 1984 г. и в 2002 г. и каждый подъем температур составил примерно $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. В районе №3, охватывающем центральную и восточную части территории, также имеют место два прироста средних температур в 1977 и 1997 гг. в сумме составившее $0,7 \text{ } ^\circ\text{C}$. В северном районе № 4 наблюдается только одно ступенчатое изменение среднего значения в 1996 г., составляющее $0,7 \text{ } ^\circ\text{C}$.

После разработки классификации следует оценить ее эффективность, например, путем расчета и сравнения коэффициентов корреляции между средним рядом в каждом районе и рядами наблюдений во всех метеостанциях рассматриваемой

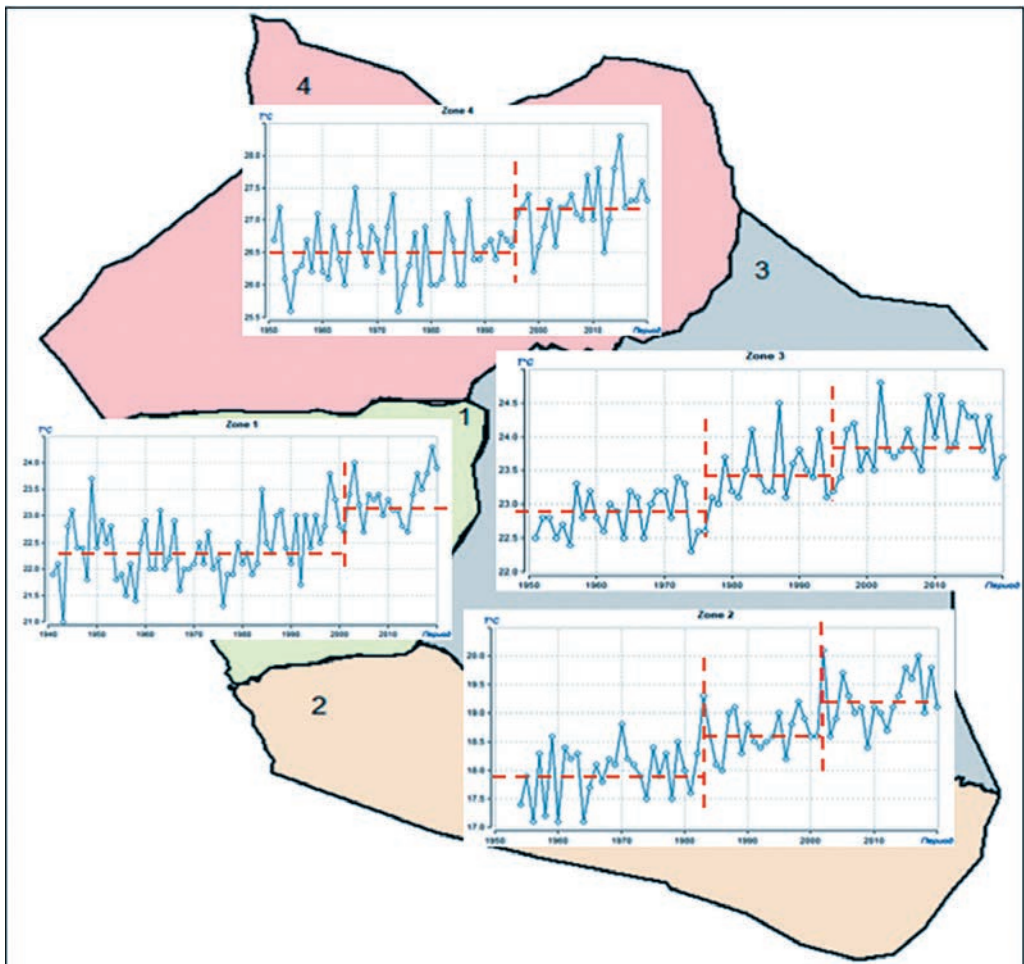


Рис. 5. Изменения средних температур воздуха в однородных районах.

Fig. 5. Changes in average air temperatures in homogeneous areas.

территории [37]. В табл. 3 приведены средние значения коэффициентов парной корреляции R_{cp} для средних рядов каждого района с многолетними рядами внутри данного района и с многолетними рядами за его пределами. Прочерк в табл. 3 означает, что в данный конкретный месяц в этом районе преобладала модель стационарного среднего.

Как следует из данных табл. 3, R_{cp} с рядами наблюдений на станциях внутри однородного района обычно больше 0,8, а с рядами за пределами района меньше 0,6—0,5. Так, в среднем за все месяцы в 1-ом районе $R_{cp} = 0,84$ с рядами внутри района и $R_{cp} = 0,40$ с рядами за его пределами.

Таблица 3

Средние коэффициенты корреляции между средними рядами в районе и многолетними рядами на метеостанциях внутри и за пределами каждого района

Mean correlation coefficients between average time series in the area and long-term series at weather stations inside and outside each homogeneous region

Месяц	Номера районов							
	1		2		3		4	
	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами	внутри района	за пределами
1	–	–	–	–	–	–	0,82	0,36
2	–	–	–	–	–	–	0,83	0,42
3	–	–	–	–	–	–	0,81	0,39
4	–	–	–	–	0,79	0,43	0,83	0,45
5	–	–	0,92	0,40	0,80	0,47	0,86	0,36
6	0,90	0,41	0,87	0,50	0,82	0,39	–	–
7	0,89	0,43	0,90	0,44	0,76	0,44	0,77	0,52
8	0,81	0,44	0,86	0,51	0,85	0,40	–	–
9	–	–	0,83	0,60	0,85	0,44	0,90	0,40
10	–	–	0,80	0,47	–	–	0,79	0,38
11	–	–	0,87	0,41	0,88	0,45	0,83	0,40
12	–	–	–	–	–	–	0,84	0,39

Количественная оценка роста температур

Количественная оценка роста температур основывается на виде модели за каждый период до и после установленного года ступенчатых изменений $T_{ст}$. Если для каждой части временного ряда имеет место модель стационарного среднего, то количественная оценка роста температур определяется как разность средних двух частей временного ряда: $\Delta t_{cp} = t_{cp2} - t_{cp1}$, где t_{cp1} , t_{cp2} — средние температуры первой и второй частей ряда. Если же моделью каждой части временного ряда являются тренды, то для каждого тренда определяется разность расчетных температур в последний и первый год рассматриваемого отрезка временного ряда.

Для оценки стационарности каждой из двух частей временного ряда были рассчитаны коэффициенты корреляции r со временем, которые оказались в подавляющем большинстве случаев статистически незначимы. Поэтому как для средних рядов в однородных районах, так и для каждого ряда температур на метеостанциях были определены Δt_{cp} . Для средних рядов в однородных районах было установлено, что Δt_{cp} изменяется на 0,7 °С зимой, на 1,2 — весной, от 0,8 до 1,0 — летом и от 0,8 до 1,2 — осенью. Однако, существенны эти изменения или нет можно оценить только, если сравнить их с естественной климатической изменчивостью, которая количественно выражается средним квадратическим отклонением (СКО) всего многолетнего ряда. В том случае, если изменения среднего значения превышают СКО, можно считать, что они существенны. В соответствии с правилом трех сигм для нормального закона распределения, двухкратное превышение

СКО соответствует достоверности принятия вывода о статистической значимости полученных изменений с вероятностью 95 %. Если полученные изменения средних значений в районах за разные сезоны года представить в долях СКО, то они будут равны 0,6 зимой, 0,9—1,1 весной, 1,0—1,3 летом и 1,1—1,4 осенью. Таким образом, изменения средних многолетних температур летом и осенью более существенны, чем весной и, тем более, зимой по отношению к их естественной климатической изменчивости.

Конечно, наибольший интерес представляют полученные пространственные изменения как самих Δt_{cp} на станциях, так и по отношению с СКО. Примеры таких пространственных изменений средних многолетних температур приведены на рис. 6 для температур средних месяцев всех сезонов года, а по отношению к СКО — на рис. 7.

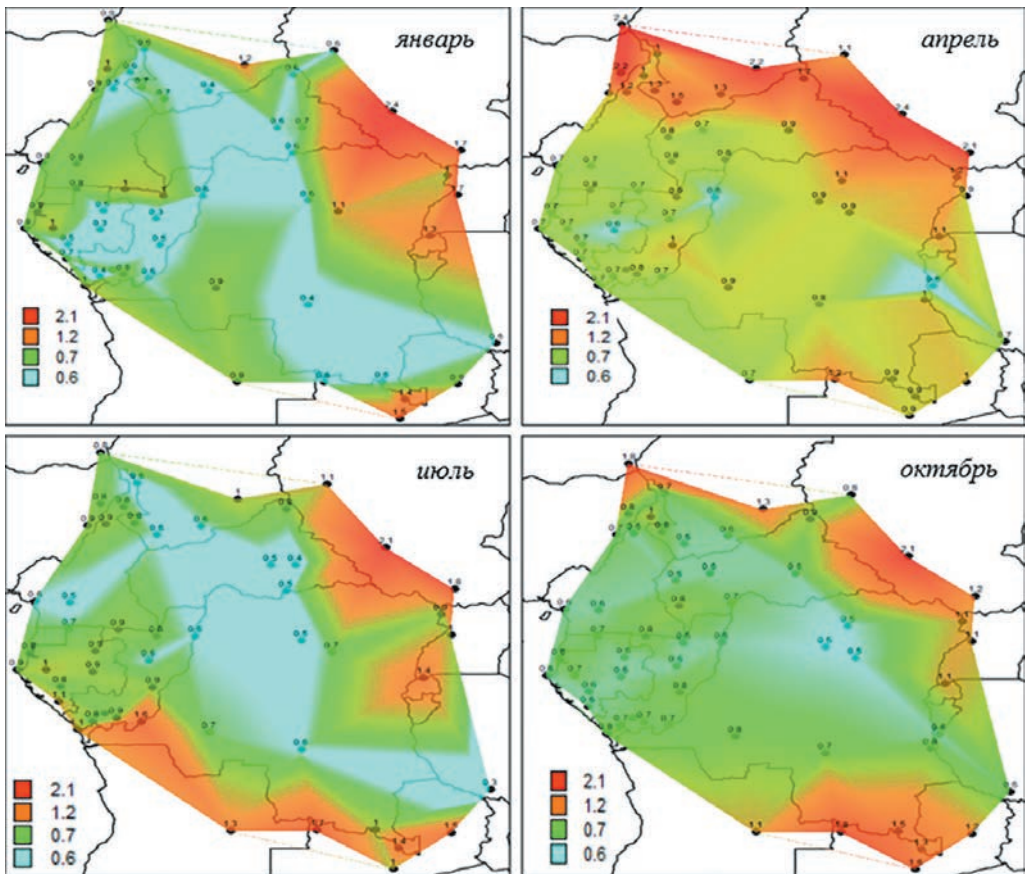


Рис. 6. Пространственные распределения роста средних многолетних температур в средние месяцы сезонов года.

Fig. 6. Spatial distributions of the growth of average long-term temperatures in the middle months of the seasons of the year.

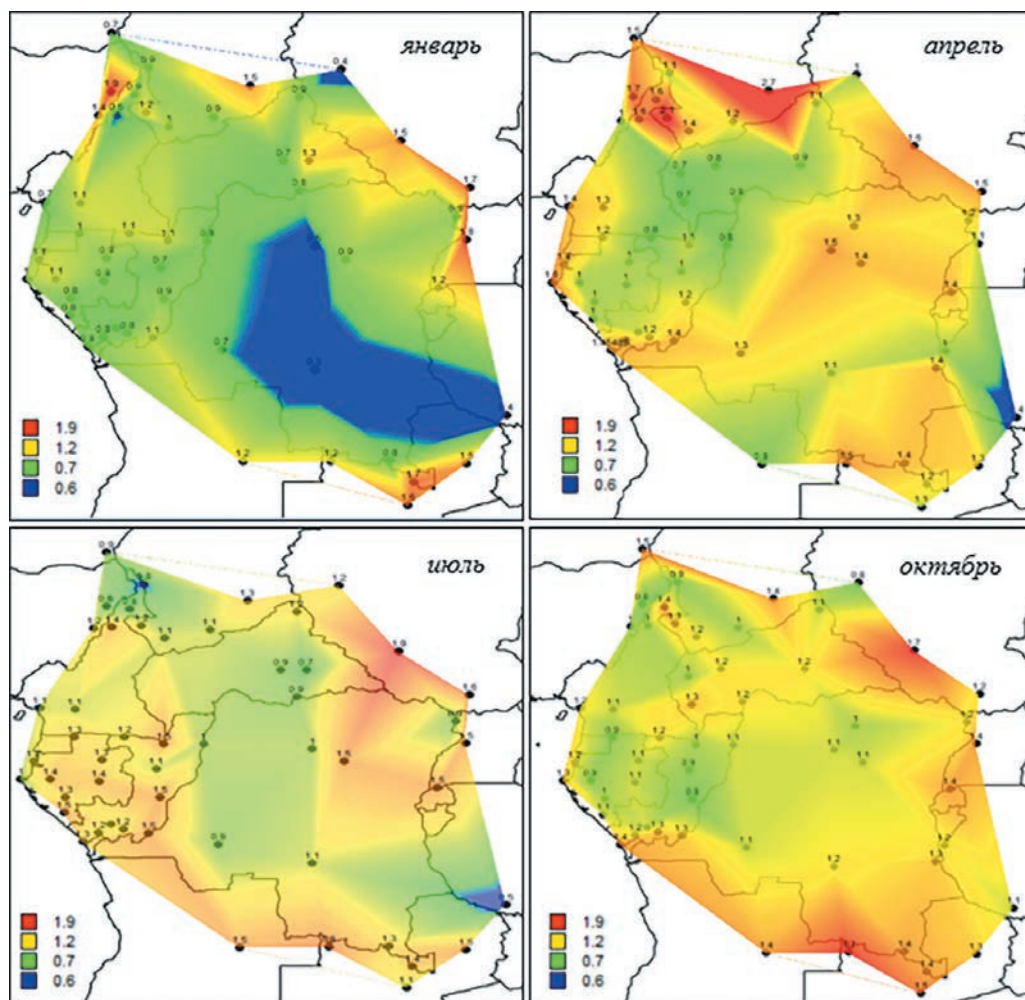


Рис. 7. Пространственные распределения роста средних многолетних температур в средние месяцы сезонов года в долях СКО.

Fig. 7. Spatial distributions of the growth of average long-term temperatures in the middle months of the seasons of the year in fractions of standard deviations.

Из пространственных распределений Δt_{cp} следует, что в период зимнего муссона (январь) наибольший прирост температур в 1—2 °С имелся на востоке рассматриваемой территории и на юге в горах, наименьшее увеличение температур на 0,5 °С наблюдалось в центральной части, а на севере и в западной прибрежной областях увеличение температуры было 0,6—1,2 °С. В межмуссонный весенний период (апрель) наибольший прирост средних многолетних температур до 2,2—2,4 °С наблюдался на севере и связан с ростом опустынивания и расширением

Сахары и смещением Сахели на юг. На всей остальной территории прирост температур примерно одинаковый и составил от 0,6 до 0,9 °С с несколько большими значениями до 1,2 °С в южной горной части. В период летнего муссона (июль) наибольший рост температур до 1,8—2,2 °С наблюдается на востоке, и еще одна полоса существенного роста температур до 1,0—1,6 °С имеется в южной горной части и в западной прибрежной. В центральной же части тропических лесов прирост составил не более 0,5—0,6 °С. В осенний межмуссонный период (октябрь) наибольшее повышение средней температуры наблюдалось от 1,1 до 2,1 °С на северо-востоке и в южных горных районах. В центральной части повышение также было небольшое — до 0,5—0,6 °С.

Таким образом, во все сезоны годы выделяются две части территории с высоким ростом температур (южные горные и восточные районы) и центральная область тропических лесов, где рост температуры практически всегда (за исключением весеннего жаркого сезона) небольшой. В летний муссон к области высокого прироста температур добавляется также прибрежная территория за счет воздушных масс с центральной Атлантики, где температура поверхности океана (ТПО) увеличивается. А в жаркий весенний межмуссонный период добавляется северная часть, где уже ощущается влияние движущейся с севера Сахары.

Если рассматривать Δt_{cp} по отношению к СКО (рис. 7), то наибольшее превышение СКО от 1,1 до 1,7—2,1 имеется в межмуссонные периоды (весной и осенью) и охватывает до 90 % территории с максимумами также на севере и в горной южной области. В январе в период зимнего муссона многолетняя изменчивость большая, и отношение $\Delta t_{\text{cp}}/\text{СКО}$ достигает максимум 1,7—1,8, причем для половины территории $\Delta t_{\text{cp}}/\text{СКО} < 1$, а в центральной области $< 0,5—0,6$. В июле, в период летнего муссона отношение $\Delta t_{\text{cp}}/\text{СКО}$ примерно одинаково для всей территории и в среднем составляет 1,2—1,3.

Выводы

Выполненное исследование климатических изменений температуры воздуха в Центральной Африке позволило восполнить пробелы и исключить неоднозначность результатов по оценке влияния современного потепления климата в этой части планеты. В частности, получены следующие выводы.

1. Данные наблюдений крайне неоднородны во времени и по пространству, и самые ненадежные наблюдения имеются на территории Демократической Республики Конго, которая занимает почти половину Центральной Африки.

2. Разработана и применена методика оценки климатических изменений температур воздуха в Центральной Африке, основанная на последовательном переходе от более надежной к менее надежной информации, на оценке устойчивости показателей нестационарности, на выделении районов однородных по динамике изменений климата и на количественной оценке произошедших изменений в зависимости от вида модели изменения среднего значения.

3. Установлено, что изменения среднего значения происходили во второй половине XX века в период от середины 1970-х до начала 2000-х, и модель ступенчатых изменений среднего значения более эффективна, чем модель тренда.

4. На территории Центральной Африки выделено 4 района однородных по динамике изменений среднего значения, причем в двух из них ступенчатый подъем температур происходил 2 раза: первый в конце 1970-х — начале 1980-х и второй в конце 1990-х — начале 2000-х, а в остальных двух 1 раз: в середине 1990-х или в начале 2000-х.

5. Во все сезоны года в южных горных и восточных районах территории был наибольший подъем температур до 2,0—2,2 °С, СКО, что составляет 1,7—2,1 СКО. В летний муссон к области высокого роста температур до 1,5—1,7 °С добавляется также прибрежная западная полоса за счет влажных и теплых воздушных масс с Атлантики, где ТПО растет. Еще одна область высокого роста температур на севере до 2,2—2,4 °С имела в наиболее жаркий весенний межмуссонный период и, видимо, связана с продвижением Сахары на юг. В центральной части территории, где тропические леса, прирост температуры практически во все сезоны (за исключением весеннего) небольшой и не превышает 0,5—0,6 °С, что меньше СКО.

Список источников

1. Amraoul L. Caractérisation du tournant climatique des années 1970 en Afrique du Nord-Ouest // Publication IAHS. 2010. Vol. 340. P. 513—520.
2. Vissin E. W. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Thèse de Doctorat. Hydro climatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie // CNRS—UMR 5210, version 1 — 11 Feb. 2010. 285 p.
3. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press. 3949 p.
4. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY // USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
5. Второй оценочный доклад РосГидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Москва: ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2018. 1400 с.
6. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof J. P. Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat // Secrétariat du GIEC. 2008. Genève. 236 p.
7. Acero F. G., Gracia J. A., Gallego M. C. Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula. // Journal of Climate. 2011. Vol. 24, № 4. P. 1089—1105.
8. Homar V., Ramis C., Romero R., Alonso S. Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain) // Climatic Change. 2010. Vol. 98. P. 199—211.
9. Amraoui L. Évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Mauritanie et leur proche océan entre 1950 et 2008) // Thèse de l'Université Jean Moulin — Lyon III. 2011. 43 p.
10. Camberlin P. L'Afrique Centrale dans le contexte de la variabilité climatique tropicale interannuelle et intra saisonnière // HAL Id: hal-00320705. 14 Dec 2010. P. 25—39.
11. Kruger A. C., Shongwe S. Temperature trends in South Africa: 1960—2003 // International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2004. Vol. 24(15). P. 1929—1945.
12. WMO: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://public.wmo.int/en/events/meetings/state-of-climate-africa-2019>. Дата обращения: 17.11.2022.
13. Diedhiou A., Bichet A, Wartenburger R., Seneviratne S.I., David P. Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5 °C and 2 °C global warming // Nature. 2018. № 529. P. 477—483.
14. Hulme M., Doherty R., Ngaro T., New, M., Lister D. African climate change: 1900—2100 // Climate research. 2001. Vol. 17(2). P. 145—168.

15. Aguilar E., Aziz Barry A., Brunet M., Ekang L., Fernandes A., Massoukina M., Zhang X. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955—2006 // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009. 114(D2).
16. Seneviratne S. I., Donat M. G., Pitman A. J., Knutti R., Wilby R. L. Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets // *Nature*. 2016. № 540. P. 564—588.
17. IPCC: [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter09.pdf. Дата обращения: 17.11.2022.
18. Pokam W., Longandjo G.-N., Moufouma-Okia T., et al. Consequences of 1.5 °C and 2 °C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13, № 5. P. 55—81.
19. Grossman D. The Congo rainforest is losing ability to absorb carbon dioxide. That's bad for climate change. 2020. 49 p.
20. Gond V., Doumenge C. Prospective 2040 des écosystèmes forestiers d'Afrique centrale // *Rapport technique final août*. 2013. 103 p.
21. Koppen W. *Die Klimate der Erde*. Berlin. 1931.
22. Tsalefac M., Hiol Hiol F., Mahé G., Laraque A., Sonwa D. J., Scholte P., Doumenge C. Climat de l'Afrique centrale: passé, présent et futur. 2015. P. 37—38.
23. Knmi: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone>. Дата обращения: 17.11.2022.
24. Pogodaiklimat: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pogodsiklimat.ru>. Дата обращения: 17.11.2022.
25. Coulibaly H. WG2AR6_FD_Ch09_Final (ipcc.ch) (section 9.5.1.1). 2019.
26. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
27. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 78 с.
28. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
29. Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 64 с.
30. Лобанов В. А., Лемешко Н. А., Жильцова Е. Л., Горлова С. А., Ренева С. А. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 2. С. 5—14.
31. Лобанов В. А., Шадурский А. Е. Выделение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. СПб.: РГГМУ, 2013. 123 с.
32. Лобанов В. А., Тошачкова Г. Г. Особенности и причины современных климатических изменений в России // *Географический вестник. Пермский университет*. 2016. № 3(38). С. 79—89.
33. Лобанов В. А., Кириллина К. С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография. СПб.: РГГМУ, 2019. 157 с.
34. Шукри О. А. А., Лобанов В. А., Хамид М. С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография. СПб.: РГГМУ, 2018. 190 с.
35. Лобанов В. А., Наурызбаева Ж. К. Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с.
36. Лобанов В. А. Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата. Кн. 2. СПб.: РГГМУ, 2018. 377 с.
37. Лобанов В. А. Учебное пособие по региональной климатологии. СПб.: РГГМУ, 2020. 170 с.

References

1. Amraoul L. Caractérisation du tournant climatique des années 1970 en Afrique du Nord-Ouest. Publication IAHS. 2010;(340):513—520.
2. Vissin E. W. Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger, Thèse de Doctorat. Hydro climatologie. Université de Bourgne Centre de Recherches de Climatologie. CNRS—UMR 5210, version 1 — 11 Feb. 2010: 285 p.

3. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: 3949 p.
4. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
5. *Vtoroy otsenochnyy doklad RosGidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii = The second assessment report of RosHydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation.* Moscow: GU VNIIGMI-WDC, 2018: 1400 p. (In Russ.).
6. Bates B. C., Kundzewicz Z. W., Wu S., Palutikof J. P. Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Secrétariat du GIEC. Genève, 2008: 236 p.
7. Acero F. G., Gracia J. A., Gallego M. C. Peaks-over-threshold study of trends in extreme rainfall over the Iberian Peninsula. *Journal of Climate*. 2011;24(4):1089—1105.
8. Homar V., Ramis C., Romero R, Alonso S. Recent trends in temperature and precipitation over the Balearic Islands (Spain). *Climatic Change*. 2010;(98):199—211.
9. Amraoui L. Évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Mauritanie et leur proche océan entre 1950 et 2008). Thèse de l'Université Jean Moulin — Lyon III. 2011: 43 p.
10. Camberlin P. L'Afrique Centrale dans le contexte de la variabilité climatique tropicale interannuelle et intra saisonnière. HAL Id: hal-00320705. 14 Dec 2010: 25—39.
11. Kruger A. C., Shongwe S. Temperature trends in South Africa: 1960—2003. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004; 24(15):1929—1945.
12. WMO. Available at: <https://public.wmo.int/en/events/meetings/state-of-climate-africa-2019> (accessed 17.11.2022).
13. Diedhiou A., Bichet A, Wartenburger R., Seneviratne S.I., David P. Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5°C and 2°C global warming. *Nature*. 2018;(529):477—483.
14. Hulme M., Doherty R., Ngara T., New, M., Lister D. African climate change: 1900—2100. *Climate research*. 2001;17(2):145—168.
15. Aguilar E., Aziz Barry A., Brunet M., Ekang L., Fernandes A., Massoukina M., Zhang X. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955—2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2009:114(D2).
16. Seneviratne S. I., Donat M. G., Pitman A. J., Knutti R., Wilby R. L. Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets. *Nature*. 2016;(540):564—588.
17. IPCC. Available at: https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter09.pdf (accessed 17.11.2022).
18. Pokam W., Longandjo G-N., Moufouma-Okia T., et al. Consequences of 1.5°C and 2°C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. *Environmental Research Letters*. 2018;13(5):55—81.
19. Grossman D. The Congo rainforest is losing ability to absorb carbon dioxide. That's bad for climate change. 2020: 49 p.
20. Gond V., Doumenge C. Prospective 2040 des écosystèmes forestiers d'Afrique centrale Rapport technique final août. 2013: 103 p.
21. Köppen W. *Die Klimate der Erde*. Berlin. 1931: 118 p.
22. Tsalefac M., Hiol Hiol F., Mahé G., Laraque A., Sonwa D. J., Scholte P., Doumenge C. Climat de l'Afrique centrale: passé, présent et futur. 2015:37—38.
23. Knmi. Available at: <http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone> (accessed 17.11.2022).
24. Pogodaiklimat. Available at: <http://www.pogodsiklimat.ru> (accessed 17.11.2022).
25. Coulibaly H. WG2AR6_FD_Ch09_Final (ipcc.ch) (section 9.5.1.1). 2019.
26. Zaks L. *Statisticheskoye otsenivaniye = Statistical estimation*. M.: Statistics. 1976: 598 p. (In Russ.).
27. *Rekomendatsii po statisticheskim metodam analiza odnorodnosti prostranstvenno-vremennykh kolebaniy rechnogo stoka = Recommendations on Statistical Methods for Analyzing the Homogeneity of Spatio-Temporal Fluctuations in River Flow*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984: 78 p. (In Russ.).

28. Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoy informacii = Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information*. SPb.: RSHU, 2008: 408 p. (In Russ.).
29. *Rekomendatsii po privedeniyu ryadov rechnogo stoka i ikh parametrov k mnogoletnemu periodu = Recommendations for bringing river runoff series and their parameters to a multi-year period*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979: 64 p. (In Russ.).
30. Lobanov V. A., Lemeshko N. A., Zhiltsova E. L., Gorlova S. A., Reneva S. A. Reconstruction of long-term series of air temperature in the European territory of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2005;(2):5—14. (In Russ.).
31. Lobanov V. A., Shadurskiy A. Ye. *Vydeleniye zon klimaticheskogo riska na territorii Rossii pri sovremennom izmenenii klimata. Monografiya = Identification of climatic risk zones on the territory of Russia under current climate change. Monograph*. St. Petersburg: RSHU, 2013: 123 p. (In Russ.).
32. Lobanov V. A., Toshchakova G. G. Features and causes of modern climate change in Russia. *Geograficheskiy vestnik. Permskii universitet = Geographic Bulletin. Perm University*. 2016;3(38):79—89. (In Russ.).
33. Lobanov V. A., Kirilina K. S. *Sovremennye i budushie izmeneniya klimata Respubliki Sakha (Yakutiya). Monografiya = Current and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia). Monograph*. St. Petersburg: RSHU, 2019: 157 p. (In Russ.).
34. Shukri O. A. A., Lobanov V. A., Khamid M. S. *Sovremennyyi i budushiy klimat Araviyskogo poluoostrova. Monografiya = The current and future climate of the Arabian Peninsula. Monograph*. St. Petersburg: RSHU, 2018: 190 p. (In Russ.).
35. Lobanov V. A., Naurozbayeva Zh. K. *Vliyaniye izmeneniya klimata na ledovyy rezhim Severnogo Kaspiya = Influence of climate change on the ice regime of the Northern Caspian*. St. Petersburg: RSHU, 2021: 140 p. (In Russ.).
36. Lobanov V. A. *Lektsii po klimatologii. Chast' 2. Dinamika klimata. Kn.2 = Lectures on climatology. Part 2. Climate dynamics. Book 2*. St. Petersburg: RSHU, 2018: 377 p. (In Russ.).
37. Lobanov V. A. *Uchebnoye posobiye po regional'noy klimatologii = Textbook on regional climatology*. St. Petersburg: RSHU, 2020: 170 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Магбини Токпа Мами, аспирант РГГМУ, (8) 952 360 12 79, mtmamy2013@gmail.com.

Владимир Алексеевич Лобанов, д-р техн. наук, ст. научный сотрудник, проф. кафедры МКОА РГГМУ, (8) 905 259 56 41, lobanov@EL6309.spb.edu.

Information about authors

Magbini Tokpa Mami, post-graduate student of the Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Vladimir A. Lobanov, Dr. of Sci. (Tech.), Senior Scientist, Professor of the Department of Meteorology, Climatology and Air Protection, Russian State Hydrometeorological University (RSHU).

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 05.05.2022

Принята к публикации после доработки 22.09.2022

The article was received on 05.05.2022

The article was accepted after revision on 22.09.2022