

**МЕТЕОРОЛОГИЯ / METEOROLOGY**

УДК: 551.51

**ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА  
НА ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА****В.А. ЛОБАНОВ<sup>1</sup>, А.И. ВДОВЕНКО<sup>2\*</sup>, Ш.Х. ХАБИБУЛЛАЕВ<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет,<sup>2</sup> Центр гидрометеорологической службы Республики Узбекистан, alena-meteo@mail.ru

**Аннотация.** *Осуществлено моделирование временных рядов температур воздуха и осадков по 66 метеорологическим станциям Республики Узбекистан с 1966 г. по настоящее время. Выявлено, что наибольшее проявление изменения климата сказывается на температуре июля и наблюдался ее ступенчатый рост с 1973 г. На метеостанциях вблизи Аральского моря имело место второе увеличение средней температуры в 2007 г., связанное с опустыниванием территории. Повышение температуры января незначительно и наблюдается на нескольких отдельных станциях, также как и практически не наблюдается проявление современных изменений климата в рядах осадков из-за их высокой естественной изменчивости.*

**Ключевые слова:** *изменение климата, многолетние ряды наблюдений, осадки, температура, модели нестационарного среднего, линейный тренд, модель ступенчатых изменений, показатели нестационарности, пространственные закономерности.*

**Введение.** Проблема современного изменения климата является одной из главных проблем человечества, поскольку климатические условия затрагивают все сферы экономики и жизнедеятельности. Несмотря на рост глобальной температуры, проявление современного изменения климата в разных регионах планеты и в разных климатических характеристиках выражается по-разному. Систематизацией и анализом исследований и мониторинга характеристик отдельных составляющих климатической системы (атмосферы, гидросферы, литосферы, криосферы, биосферы) занимается Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) с 1988 г. Результаты деятельности этой организации в рамках трех рабочих групп представлены в оценочных докладах по изменению климата, адаптации и уязвимости регионов и отраслей экономики к этим изменениям и разработке мероприятий по смягчению последствий климатических изменений. Все последние результаты по установленным изменениям климата приведены в 5-ом оценочном докладе МГЭИК [IPCC, 2013], а в настоящее время идет подготовка 6-го доклада. Аналогичные обобщения исследований по оценке изменений климата на региональном уровне представлены в таких же оценочных докладах отдельных стран [Первый ..., 2008; Третье ..., 2016].

Для оценки современных изменений климатических характеристик по данным наблюдений применяются статистические методы и модели временных рядов и обычно в виде трендов или монотонных зависимостей от времени [Первый ..., 2008; IPCC, 2013]. Вместе с тем, эти изменения могут быть не только монотонными, но, например, и ступенчатыми. Наиболее наглядный ход изменчивости климата представляется динамикой производства энтропии – объективным показателем изменчивости климата [Арушанов, 2021]. Также часто не оценивается статистическая значимость и устойчивость

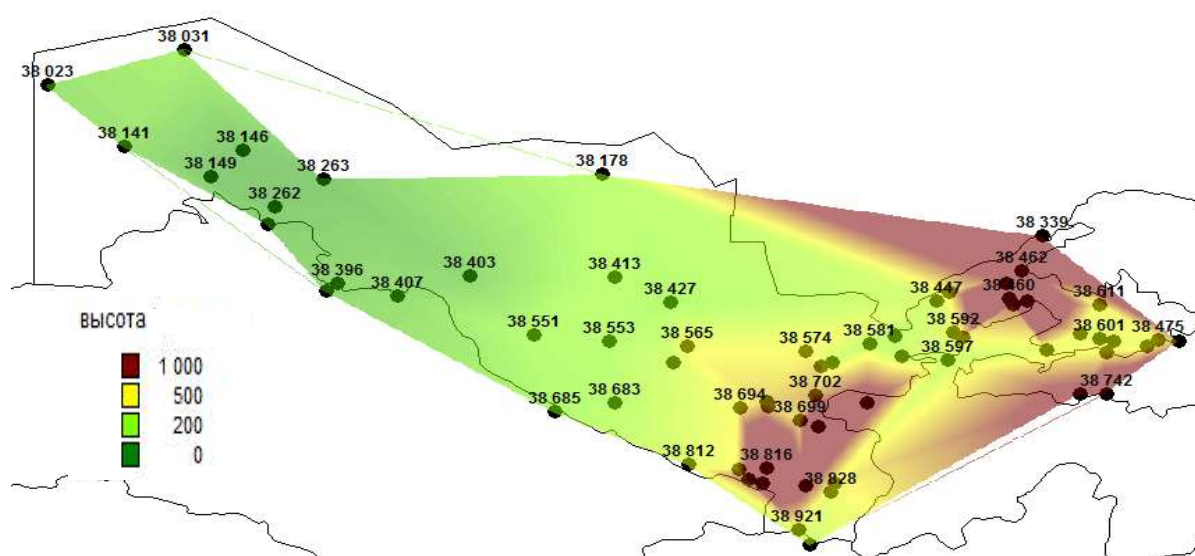
---

\* Ответственный автор: alena-meteo@mail.ru, тел.: +998 90 3262969

полученных трендов во времени, что крайне важно, при большой естественной изменчивости отдельных климатических характеристик, особенно осадков. Данная статья посвящена проблемам эффективной оценки проявления современного изменения климата в многолетних рядах температур воздуха и осадков на территории Республики Узбекистан.

**Исходная информация и оценка ее качества.** Информация по многолетним рядам среднемесячных температур воздуха и осадков на территории Республики Узбекистан была получена в Центре гидрометеорологической службы Республики Узбекистан (Узгидромет) и с сайта Вашингтонского климатического центра [Метеорологические ..., 2017]. Всего на рассматриваемой территории было выбрано 66 метеостанций начальным годом наблюдений с 1966 г. Выбор начального года наблюдений обусловлен тем, что с этого момента работают большинство из 66 метеостанций и в данной работе поставлена цель исследовать проявление современного изменения климата.

На рис. 1 показано расположение выбранных 66 метеостанций и приведен пятизначный код ВМО для каждой метеостанции. Градациями цвета выделены 4 высотные зоны в интервалах: от 0 до 199 м – низменности, от 200 до 499 м – равнинная зона, от 500 до 999 м – предгорная и от 1000 м – горная и высокогорная.



**Рис. 1. Схема расположения метеостанций и высотные зоны Республики Узбекистан в метрах над уровнем моря**

**Fig. 1. Map of the location of meteorological stations and altitude zones of the Republic of Uzbekistan in meters above sea level**

Из анализа рис. 1 следует, что рассматриваемая территория и ее отдельные высотные зоны представлены наблюдениями достаточно равномерно и плотность сети высокая, что создает возможности для надежных пространственных обобщений полученных результатов. Большинство рядов наблюдений имели одинаковый продолжительный период в 51 год за исключением 14 пунктов, в которых период наблюдений варьировал от 16 (метеостанция 38031 Актумсук) до 46 лет (метеостанция 38695 Дагбит). Поэтому было необходимо привести все эти непродолжительные ряды наблюдений к одинаковому многолетнему периоду на основе регрессионных зависимостей с более продолжительными рядами на метеостанциях-аналогах в

соответствии с методикой, изложенной в работах [Лобанов и др., 2005; Рекомендации ..., 1979; Свод ..., 2004].

Однако, прежде всего, была выполнена оценка однородности эмпирических распределений температур воздуха и осадков на возможные резко отклоняющиеся экстремумы по статистическим критериям Диксона и Смирнова-Граббса [Закс, 1976; Лобанов и др., 2011; Свод ..., 2004]. В результате проверки однородности эмпирических распределений температур воздуха и осадков для января и июля получено, что гипотеза однородности температур воздуха отклоняется только для 1 метеостанции (38617 Кургантепа) для июля, что составляет 0,08% из всех 264 случаев. Для сумм осадков за месяц случаев отклонения гипотезы однородности уже 32, что составляет 12% от общего их числа. Из них в январе неоднородность имеет место всего для 1 метеостанции (38702 Ляльмикор), а в июле – для 17 станций. Установлено, что причина неоднородного экстремума температур – погрешности наблюдений, для осадков – недостаточная продолжительность рядов и пропуски наблюдений.

При восстановлении пропусков и удлинении рядов на основе уравнений связи с аналогами (от 1 до 3-х аналогов) в соответствии с методикой минимальный совместимый период наблюдений задавался в 10 лет, максимальное количество аналогов было равно 3, минимальное допустимое значение коэффициента корреляции задавалось 0,85 и среднее отношение коэффициента уравнения регрессии к его случайной среднеквадратической ошибке задавалось 2,0 [Метеорологические ..., 2016; Свод ..., 2004]. В результате средний период наблюдений для 14 пунктов, которые имели непродолжительные ряды и пропуски наблюдений, увеличился с 40 до 50 лет для температуры воздуха и с 40 до 45 лет для осадков. Повторный анализ однородности для восстановленных рядов показал, что неоднородных экстремумов осталось всего 3 в рядах осадков на метеостанциях Андижан (38475), Аякагитма (38553) и Куль (38708).

Таким образом, в дальнейшем исследовании применялись однородные и непрерывные ряды наблюдений практически одинаковой продолжительности, что обуславливает потенциальную возможность для надежного моделирования и сопоставлении результатов по территории.

**Теоретические положения и методика исследования.** В качестве метода исследования применялось статистическое моделирование временных рядов и их аппроксимация моделями стационарного и нестационарного среднего с оценкой их статистической значимости и устойчивости во времени. При этом предварительная оценка стационарности дисперсий для двух последовательных частей временных рядов по критерию Фишера [Дрейпер, Смит, 1973; Закс, 1976; Лобанов и др., 2011] показала, что дисперсии практически стационарны и отдельные случаи нестационарности обусловлены влиянием резко отклоняющихся неоднородных экстремумов.

Методика статистического моделирования временных рядов, примененная в данной статье, апробирована и получила широкое применение во многих предыдущих работах [Лобанов, Анисимов, 2003; Лобанов, Шадурский, 2010; Лобанов, Шадурский, 2013; Лобанов, Тошаклова, 2013; Лобанов, Кириллина, 2019; Шукри и др., 2018] и основана на оценке изменения среднего значения во времени. При этом, принимается, что процессы климатической изменчивости межгодового и десятилетнего масштабов [Лобанов, 2020] являются случайными во времени, а все изменения, обусловленными процессами более продолжительных масштабов (антропогенное потепление климата, естественные колебания столетнего, тысячелетнего и других масштабов) проявляются в изменении среднего значения:

$$Y(t) = Y_{cp}(t) + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где  $Y(t)$  – изменение климатической характеристики  $Y$  во времени  $t$ ,  $Y_{cp}(t)$  – неслучайная составляющая или функция изменения среднего значения во времени,  $\varepsilon_i$  – случайная составляющая.

На уровне рассмотрения таких простых моделей типа (1) проявление изменений климата в многолетних временных рядах может быть двух основных видов:

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

Эти два вида климатических изменений отражают разные физические механизмы, действующие в климатической системе Земли [Монин, Шишков, 2000]. Трендовые или циклические изменения имеют место 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.

Эффективность модели (1) проверяется по отношению к базовой стационарной модели, в которой среднее не изменяется во времени. Критерием оценки эффективности одной модели по отношению к другой в регрессионном анализе служит значимое отличие дисперсий или стандартов остатков [Дрейпер, Смит, 1973; Закс, 1976; Лобанов, 2020]. Для стационарной модели стандартом остатков является СКО (среднее квадратическое отклонение) исходного ряда  $\sigma_y$ . Для любой другой нестационарной модели СКО или стандарт остатков ( $\sigma_\varepsilon$ ) вычисляется по формулам. Для большинства моделей – это известная формула:

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

где  $\sigma_y$  – стандартное отклонение исходного ряда (модель стационарного среднего);  $\sigma_\varepsilon$  – стандартное отклонение остатков относительно модели линейного тренда;  $R$  – коэффициент корреляции уравнения линейного тренда.

Для модели ступенчатых изменений стандартным отклонением остатков является средневзвешенное СКО, определенное по СКО стационарных подвыборок. Для двух стационарных отрезков ряда и одного ступенчатого перехода стандарт остатков вычисляется по формуле:

$$\sigma_{стун} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{стун}$  – стандартное отклонение остатков относительно модели ступенчатых изменений;  $\sigma_1, \sigma_2$  – стандартные отклонения отрезков временного ряда, на которые разбивается ряд наблюдений по дате ступенчатых изменений;  $n_1, n_2$  – число случаев стационарных частей ряда наблюдений в годах.

Год перехода от одних стационарных условий к другим обычно неизвестен, хотя его и можно задать из анализа хронологического графика. Однако, чтобы исключить субъективизм, можно предложить определение этого года итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда:

$$\sigma_1^2(n_1-1)+\sigma_2^2(n_2-1)=\min, \quad (4)$$

где  $n_1, n_2$  – число случаев, включенных в выборочную совокупность каждой из двух частей временного ряда.

При этом следует задать минимальный число случаев 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.

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, так как это следует из определения критерия эффективности рассматриваемой модели (линейной и ступенчатой). Чем больше разность между стандартами остатков стационарной и нестационарной модели, тем нестационарная модель эффективнее стационарной. В качестве меры отличия можно рассмотреть относительные отклонения в %, рассчитываемые по формулам:

$$\Delta_{тр} = \left( \frac{\sigma_y - \sigma_\varepsilon}{\sigma_y} \right) 100 \%, \quad (5)$$

$$\Delta_{ступ} = \left( \frac{\sigma_y - \sigma_{ступ}}{\sigma_y} \right) 100 \%, \quad (6)$$

где  $\Delta_{тр}, \Delta_{ступ}$  – относительные отличия (в %) модели тренда и модели ступенчатых изменений от модели стационарной выборки.

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:

$$F_{тр} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_\varepsilon^2}. \quad (7)$$

В числителе всегда будет дисперсия исходного ряда наблюдений, так как она является наибольшей или, по крайней мере, равна остаточной дисперсии конкурирующей модели. В случае если расчетное значение статистики Фишера оказывается больше критического, то дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие и соответствующая модель (тренда или ступенчатых изменений) статистически эффективнее, чем модель стационарной выборки.

На основе критических значений статистики Фишера можно определить и критическое значение  $\Delta_{кр}\%$ , которое получается при подстановке (7) в (5):

$$\Delta_{кр} = \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{F^*}} \right) * 100 \%, \quad (8)$$

где  $F^*$  – критическое значение статистики критерия Фишера при уровне значимости  $\alpha$  и степенях свободы  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , где  $\nu_1=n_1-1$  и  $\nu_2=n_2-1$ , а  $n_1, n_2$  – числа случаев выборок.

Принимая, что  $\alpha=5\%$ , 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 [Дрейпер, Смит, 1973; Лобанов и др., 2011] получим  $F^*=1,53$  и из (8)  $\Delta_{кр}=19,4\%$ . 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. выбранная  $\Delta=10\%$  соответствует предельному критическому при очень большой продолжительности ряда.

**Основные результаты.** По приведенной методике была осуществлена аппроксимация временных рядов температур воздуха и осадков июня и января по всем 66 метеостанциям на территории Республики Узбекистан. Для оценки устойчивости показателей эффективности нестационарных моделей линейного тренда ( $\Delta_{мп}$ , %), модели ступенчатых изменений ( $\Delta_{смун}$ , %) и коэффициента корреляции со временем ( $R$ ) временные ряды аппроксимировались с 1966 г., 1970 г. и 1980 г. В качестве примера в табл. 1 приведены показатели эффективности только для тех временных рядов, в которых  $\Delta_{мп}$  и  $\Delta_{смун}>10\%$  и статистически значимые  $R$  хотя бы в одном из вариантов моделирования (выделено ярким). В табл. 1 «Год» обозначает, разные годы начала периода наблюдений, а «Т<sub>ст</sub>» – год ступенчатых изменений, полученный при разном начале ряда наблюдений.

Как следует из результатов табл. 1, из 66 рядов модель линейного тренда эффективна в 16 случаях, а коэффициенты корреляции уравнения тренда со временем статистически значимы для 30 метеостанций. Модель ступенчатых изменений эффективна в 21 случае, если также рассматривать ряды за весь период с 1966 г. В среднем для всех рядов  $\Delta_{мп}=6,4\%$ , а  $\Delta_{смун}=8,0\%$ , т.е. модель ступенчатых изменений эффективнее, чем линейного тренда. Анализ устойчивости  $\Delta_{мп}$ ,  $\Delta_{смун}$  и  $R$  показывает, что эти величины обычно уменьшаются с уменьшением длины ряда и даже становятся неэффективными при начале наблюдений с 1980 г. Это видимо связано с тем, что большинство изменений относятся к первой части временного ряда, а во второй они уже отсутствуют. В тоже время есть отдельные случаи, когда показатели нестационарности увеличиваются при смещении начала года наблюдений к 1980 г. Для них видимо, характерен рост температуры во вторую часть ряда.

Анализ лет ступенчатых изменений (Т<sub>ст</sub>) при эффективных показателях  $\Delta_{мп}$ ,  $\Delta_{смун}$  и  $R$  свидетельствует, что они группируются около двух дат: 1976 г. и 2005-2007 гг. Из-за того, что начало наблюдений для всех рядов было в 1966 г., то самый ранний год ступенчатых изменений, который мог быть определен по методике при минимальном задании первой половины ряда в 10 лет, был как раз 1976 г. Поэтому для корректировки этой даты были рассмотрены ряды с 1966 г. и установлено, что годом ступенчатых изменений является 1973 г. В общем случае были выявлены 2 типа нестационарных моделей:

- со ступенчатым ростом температуры только в 1973 году и;
- с двумя ступенчатыми ростоми температуры: первый в 1973 году, второй в 2005-2007 гг.

На рис. 2 показаны примеры двух таких видов нестационарности. Интересно отметить, что метеостанции 2-го типа нестационарности с двумя подъемами средних температур Актумсук (38031) и Муйнак (38146) находятся вблизи Аральского моря, которое в настоящий момент высыхает. Поэтому для этих станций и имеет место вторая ступень роста температур, которая связана с опустыниванием и переходом Аральского моря на новый уровень высыхания.

Для температур января модель ступенчатых изменений эффективна только в 6 случаях при максимальном значении  $\Delta_{\text{сгн}}=14\%$ , а модель линейного тренда неэффективна во всех случаях. Для многолетних рядов осадков, как июля, так и января эффективных нестационарных моделей не установлено и можно сделать вывод, что в виду большой естественной климатической изменчивости, имеющей случайный характер, современные изменения климата в осадках пока не проявляются.

Таблица 1

**Показатели эффективности нестационарных моделей для многолетних рядов температуры июля**

Table 1

**Indexes of efficiency of non-stationary models for long-term time series of July temperature**

Код	Год	$\Delta_{\text{тр}},\%$	$\Delta_{\text{сг}},\%$	$T_{\text{сг}}$	$R_{\text{тр}}$
38023	1966/75/80	5,6/0/0,2	8,5/3,4/4	1977/1985/2005	<b>0,33/0,01/0,06</b>
38031	1966/75/80	<b>23,4/10,5/8,1</b>	<b>18,9/13,6/12,6</b>	1979/2005/2005	<b>0,64/0,45/0,4</b>
38141	1966/75/80	6,6/0,2/0,3	9,3/3,1/3,7	1978/2005/2005	<b>0,36/0,06/0,08</b>
38146	1966/75/80	<b>24,7/11,2/8,7</b>	<b>19,7/14,4/13,3</b>	1979/2005/2005	<b>0,66/0,46/0,41</b>
38262	1966/75/80	<b>10/0,6/0,2</b>	<b>15,4/2,5/2,3</b>	1978/2005/2005	<b>0,44/0,11/0,07</b>
38263	1966/75/80	7,6/0,1/0	<b>12,9/1,5/1,3</b>	1979/2005/2005	<b>0,38/0,05/0</b>
38264	1966/75/80	6,1/0/0	<b>10,5/2,6/1,8</b>	1976/1985/2005	<b>0,34/-0,01/0,02</b>
38396	1966/75/80	0,3/9,5/4,7	3,8/ <b>22,7/9,4</b>	1985/1985/1990	<b>-0,08/-0,43/-0,3</b>
38399	1966/75/80	<b>20,9/4,8/3</b>	<b>24,6/5,7/4,3</b>	1978/1995/1995	<b>0,61/0,31/0,24</b>
38447	1966/75/80	<b>22,1/12,2/9</b>	<b>19,1/12/10,6</b>	1983/2005/2005	<b>0,63/0,48/0,42</b>
38457	1966/75/80	6/0,5/1,1	5,9/4,2/4,8	1976/2005/2005	<b>0,34/0,1/0,15</b>
38475	1966/75/80	9,1/0,9/3,2	9,4/3/4,3	1976/2003/2003	<b>0,42/0,14/0,25</b>
38567	1966/75/80	7,6/0,1/0,5	<b>11,8/1,8/2,4</b>	1976/2005/2005	<b>0,38/0,04/0,1</b>
38581	1966/75/80	7,1/5,3/6,7	7,6/6,7/7,2	1995/1995/1995	<b>0,37/0,32/0,36</b>
38583	1966/75/80	<b>22,8/13,2/10,3</b>	<b>17,5/14/12,5</b>	1983/2005/2005	<b>0,64/0,5/0,44</b>
38592	1966/75/80	9,1/2,2/1,9	8,8/4,7/4,4	1983/1995/1995	<b>0,42/0,21/0,2</b>
38597	1966/75/80	<b>17,4/7,3/5,8</b>	<b>15,7/8,9/8,2</b>	1983/2005/2005	<b>0,56/0,37/0,34</b>
38601	1966/75/80	0,1/4,7/1,1	3,1/ <b>14,8/4,2</b>	1976/1987/1990	0,04/ <b>-0,3/-0,15</b>
38605	1966/75/80	<b>20,8/9,2/11,3</b>	<b>15,3/11,5/11,7</b>	1976/2003/2003	<b>0,61/0,42/0,46</b>
38606	1966/75/80	7,2/0/1,2	<b>16,3/5,6/8,7</b>	1976/2001/2001	<b>0,37/-0,02/-0,15</b>
38611	1966/75/80	<b>15,5/6,2/11,3</b>	<b>11,6/11,9/13,9</b>	2005/2005/2005	<b>0,53/0,35/0,46</b>
38612	1966/75/80	<b>11,1/1,9/1,8</b>	<b>12,8/5,3/5,5</b>	1976/1994/1994	<b>0,46/0,19/0,19</b>
38614	1966/75/80	8,9/1,6/3,3	8,6/4,6/6,6	1976/1994/1994	<b>0,41/0,18/0,26</b>
38617	1966/75/80	5,5/3,3/7,9	5,5/4,3/7,2	1994/1994/1994	<b>0,33/0,25/0,39</b>
38618	1966/75/80	<b>13/2,9/7,1</b>	<b>11,5/5,5/6,9</b>	1976/2005/2005	<b>0,49/0,24/0,37</b>
38683	1966/75/80	<b>17,3/3,2/1,3</b>	<b>21,6/3,3/2,2</b>	1979/1995/2005	<b>0,56/0,25/0,16</b>
38685	1966/75/80	5,4/0,1/0	9,5/1,3/1,6	1983/1999/1999	<b>0,32/0,03/0,03</b>
38695	1966/75/80	8,3/0,4/0,9	<b>10,3/1,6/1,9</b>	1976/2005/2005	<b>0,4/0,09/0,13</b>
38696	1966/75/80	<b>18,8/5,9/6,3</b>	<b>16,6/10,5/10,3</b>	1976/2005/2005	<b>0,58/0,34/0,35</b>
38742	1966/75/80	0/2,8/0	2/ <b>10,8/0,7</b>	1976/1987/1990	0,03/ <b>-0,23/-0,01</b>
38749	1966/75/80	0,1/2,7/0	2/ <b>12,8/1,3</b>	1976/1986/2005	0,04/ <b>-0,23/0,03</b>
38812	1966/75/80	0/4,3/2,2	2,6/9/5,1	1976/1987/1998	0,03/ <b>-0,29/-0,21</b>
38819	1966/75/80	1,2/7,2/1,2	7/ <b>19,9/4,5</b>	1987/1986/1990	<b>-0,15/-0,37/-0,16</b>
38828	1966/75/80	<b>24,3/14,7/12,7</b>	<b>22,8/20,5/18,6</b>	1994/1994/1994	<b>0,65/0,52/0,49</b>
38829	1966/75/80	<b>18,9/5,5/7</b>	<b>17,8/9,6/9,9</b>	1976/2005/2005	<b>0,58/0,33/0,37</b>
38927	1966/75/80	<b>15,9/2,6/2,9</b>	<b>23,5/3,8/4,1</b>	1976/1994/1991	<b>0,54/0,23/0,24</b>

Для выявления областей на территории Республики Узбекистан, в которых имеют место эффективные нестационарные модели, были построены карты показателей нестационарности и коэффициентов корреляции со временем, примеры которых для температур июля приведены на рис. 3.

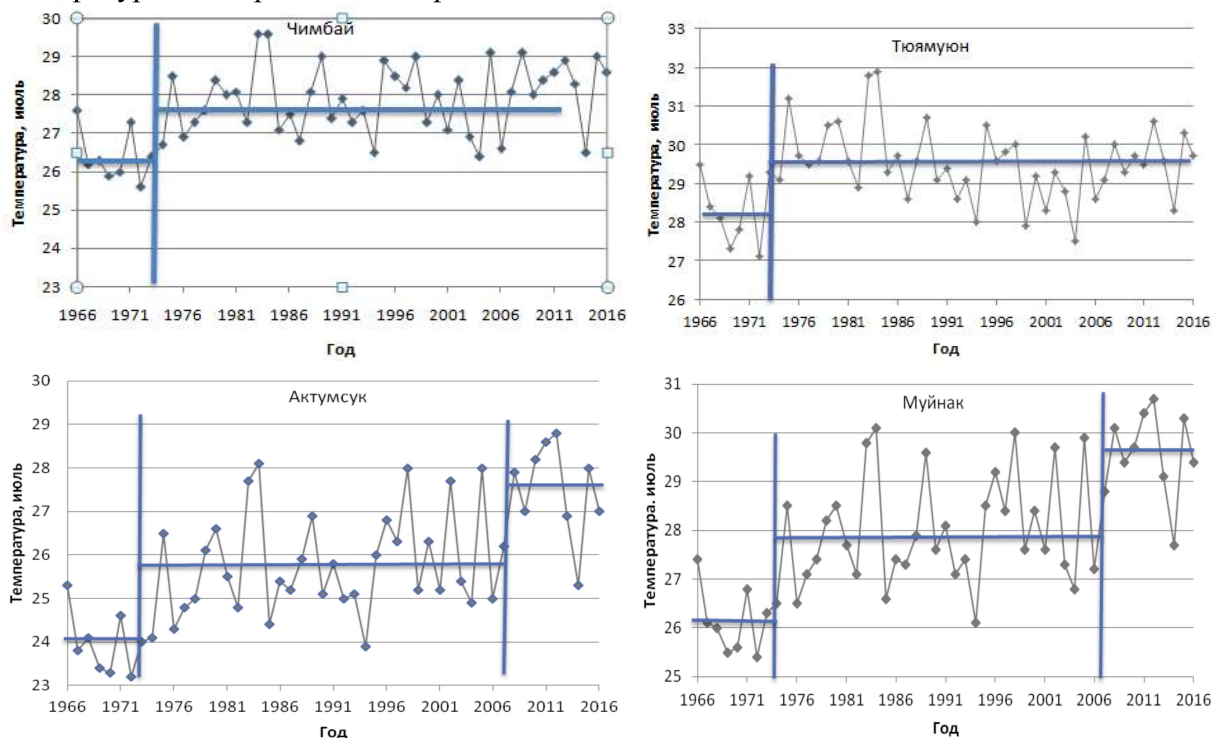


Рис. 2. Два вида нестационарности в многолетних рядах температур июля: 1-й тип – один подъем температуры в 1973 г., 2-ой тип – два роста температур в 1973 и 2007 гг.

Fig. 2. Two types of non-stationarity in long-term time series of July temperatures: 1st – one rise in temperature in 1973, 2nd type – two increases in temperature in 1973 and 2007.

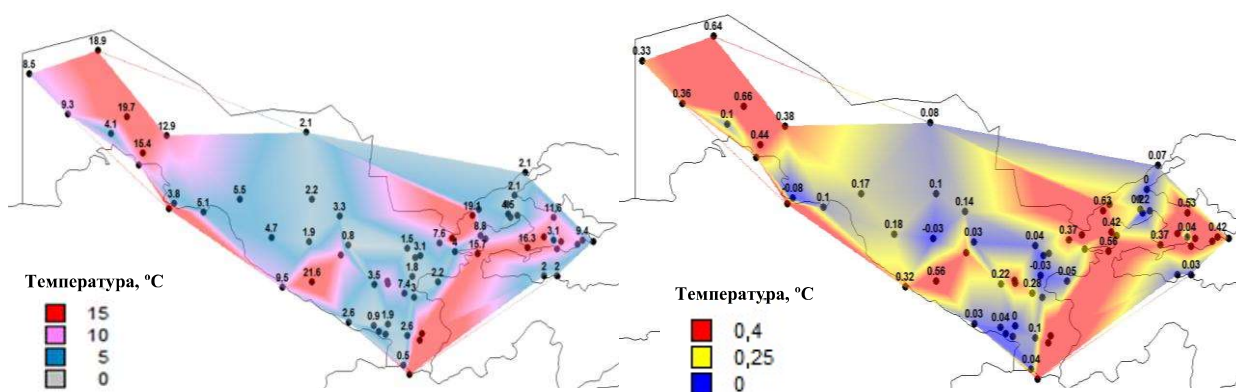


Рис. 3. Пространственные распределения температур  $\Delta_{tr}$  в % (слева) и  $R_{tr}$  (справа) на территории Республики Узбекистан

Fig. 3. Spatial distributions temperatures of  $\Delta_{tr}$  in % (left) and  $R_{tr}$  (right) on the territory of the Republic of Uzbekistan

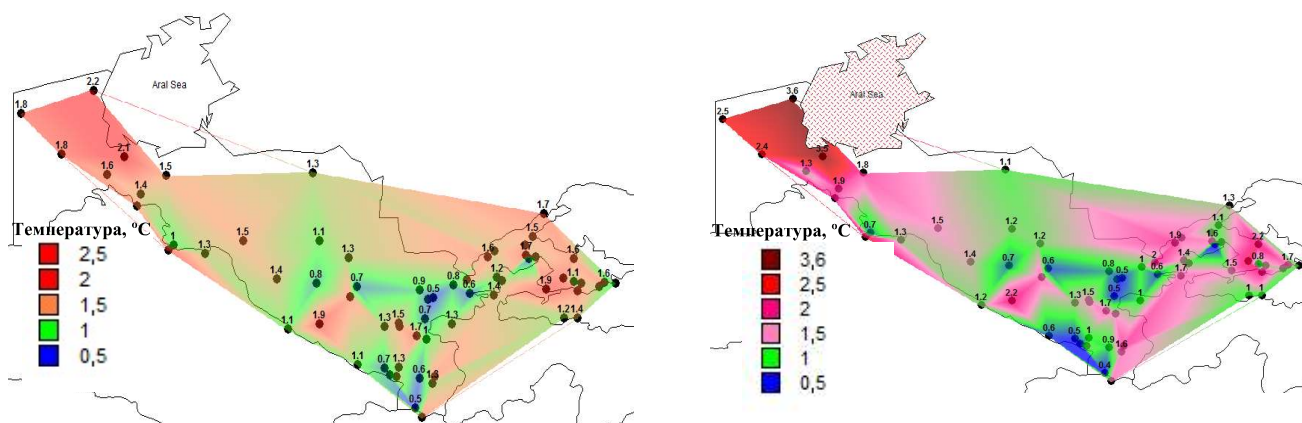
Из сопоставления карт рис. 3 следует общий вывод, что на них представлены практически одни и те же области нестационарности, которые включают себя 3 региона:

- северо-западная область в Каракалпакии, находящаяся под влиянием высыхания Аральского моря и опустынивания близлежащей территории;
- южная область вдоль границы с Киргизией и Таджикистаном и отдельный изолированный район, примыкающий к ней;
- изолированная область на границе с Туркменистаном.

Для температуры воздуха января область нестационарности с небольшими  $\Delta_{стун}$  представлена на юге Узбекистана в виде отдельных локальных образований.

Для количественной оценки изменений были рассчитаны разности норм температур за разные последовательные квазиоднородные периоды. На рис. 4 слева показаны разности двух норм температур, рассчитанных за период после и до 1973 года.

Как следует из пространственного распределения, области наибольшего роста температур (более  $1,0^{\circ}$ - $1,5^{\circ}\text{C}$ ) практически полностью соответствуют областям эффективных нестационарных моделей (рис. 3). Причем наибольший прирост температур имеет место в районе Аральского моря и на юге – юго-востоке Узбекистана. В северо-западной части Каракалпакии, в низовьях Амударьи и южном побережье Аральского моря прирост норм температур наибольший: на станции Актумсук (38031) он составляет  $2,2^{\circ}$ , а на станции Муйнак (38146) –  $2,1^{\circ}$  видимо за счет высыхания Аральского моря. Еще одна область большого роста норм температур (от  $1,5^{\circ}$  до  $2,0^{\circ}\text{C}$ ) – это южная часть Ферганской долины. На остальной территории Узбекистана прирост норм температур составляет в основном около  $1,5^{\circ}$ . Только в центральной части республики и на юго-западе прирост норм менее  $1,0^{\circ}$ .



**Рис. 4. Разности норм температур июля в  $^{\circ}\text{C}$  за два стационарных периода после и до 1973 года (слева) и разности после и до 2007 г., отдельно для Каракалпакии (справа)**

**Fig. 4. Differences in July temperature norms in  $^{\circ}\text{C}$  for two stationary periods before and after 1973 (left) and the differences after and before 2007 for Karakalpakia region only (right)**

Если же учесть, что на станциях Каракалпакии наблюдается изменение норм не только в 1973 г., но и еще и в 2007 г., то можно найти разницу норм после и до 2007 г., которая будет еще больше для этих станций. Тогда рост норм температур в районе Аральского моря будет еще больше, как показано на рис. 4 (справа), и составляет:  $+3,6^{\circ}$  на станции Актумсук (38031) и  $+3,5^{\circ}$  на станции Муйнак (38146). На остальных станциях Каракалпакии рост норм также стал несколько больше и составляет в среднем  $+2,0^{\circ}\text{C}$ . В основном по всей территории республики за весь период наблюдений с 1966 г. температура поднялась на  $+1,0^{\circ}$  –  $+1,5^{\circ}$ .

В юго-восточной и южной части республики – в Кашкадрийской области на станциях Карши (38812) и Гузар (38815) прирост температуры июля за весь период составил от  $+0,4^{\circ}$  до  $+0,6^{\circ}$  (хребты, горы). В Сурхандарьинской области на станции Термез (38827) температура июля выросла на  $+0,9^{\circ}$ .

На всей территории Джизакской области, на юго-западе (хребты, горы) и северо-востоке (равнинная часть) за весь период наблюдений с 1966 г. температура не поднялась больше, чем на  $+1,0^{\circ}$  и в среднем увеличение составляет  $+0,5^{\circ} - +0,8^{\circ}$ .

**Выводы.** В результате проведенного исследования получены следующие основные результаты.

1. Сформирована уникальная региональная база данных среднемесячных температур воздуха и осадков по 66 метеостанциям за последний период однородных наблюдений с 1966 года.

2. Эмпирические распределения температур воздуха и осадков практически не содержат неоднородных экстремумов. Выявлен только один неоднородный экстремум для температуры июля, обусловленный погрешностью данных и 18 неоднородных экстремумов в рядах осадков (1 для января и 17 для июля), обусловленные пропусками наблюдений и непродолжительными рядами.

3. Температуры июля выросли и притом ступенчато в основном в 1973 году и для трех рядов (Каракалпакия) установлен второй подъем температур в 2007 году. Вместе с тем для половины рядов температур июля пока еще эффективны стационарные модели.

4. На территории Узбекистана выделено 3 области нестационарности:

– северо-западная в Каракалпакии, находящаяся под влиянием высыхающего Аральского моря;

– южная вдоль границы с Киргизией и Таджикистаном;

– изолированная область на границе с Туркменистаном.

5. Рост норм температур на станциях возле Аральского моря составляет  $+3,6^{\circ}$ , на остальных станциях Каракалпакии  $+2,0^{\circ}$ , а по всей территории Узбекистана в среднем  $+1,0^{\circ} - +1,5^{\circ}$ .

**Вклад авторов:** **В.А. Лобанов:** Научное руководство, методология, постановка проблемы, анализ, моделирование, описание результатов, проверка. **А.И. Вдовенко:** Сбор и статистическая обработка данных, табличное и графическое представление результатов, анализ, моделирование, написание текста, оформление. **Ш.Х. Хабибуллаев:** Сбор данных, оценка качества информации, оформление. Все авторы прочитали и согласны с опубликованной версией рукописи.

## ЛИТЕРАТУРА

*Арушанов М.Л.* Объективная конструкция понятия «климат» // Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды. №1, 2021. – С. 11-19.

*Дрейнер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.

*Закс Л.* Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.

*Лобанов, В.А., Анисимов, О.А.* Современные изменения температуры воздуха на территории Европы // Метеорология и гидрология. №2, 2003. – С. 5-14.

*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. № 2, 2005. – С. 5-14.

*Лобанов В.А., Шадурский А.Е.* Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений // Ученые записки РГГМУ. №14, 2010. – С. 16.

*Лобанов В.А., Смирнов И.А., Шадурский А.Е.* Практикум по климатологии. Часть 1. (учебное пособие). – СПб.: 2011. – 144 с.

Лобанов В.А., Шадурский А.Е. Определение зон климатического риска на территории России при современном изменении климата. Монография. – СПб.: РГГМУ, 2013. – 164 с.

Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г. Проявление современных изменений климата на территории Костромской области. Монография. ФГБУ «Костромской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», Кострома. 2013. – 171 с.

Лобанов В.А., Кириллина К.С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография. – СПб.: РГГМУ, 2019. – 157 с.

Лобанов В.А. Учебное пособие по региональной климатологии. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 170 с.

Метеорологические данные Центра гидрометеорологической службы Республики Узбекистан (Узгидромет) (дата обращения 05.01.2017).

Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // Успехи физических наук. Т. 170, № 4, 2000. – 445 с.

Первый оценочный доклад «Изменение климата на территории Российской Федерации». – М.: 2008. – 1020 с.

Рекомендации по приведению рядов речного стока и их параметров к многолетнему периоду. – Л.: Гидрометеоздат, 1979. – 64 с.

Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33-101-2003. – М.: Госстрой России, 2004. – 73 с.

Шукри О.А.А., Лобанов В.А., Хамид М.С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография. – СПб.: РГГМУ, 2018. – 191 с.

Третье Национальное сообщение Республики Узбекистан по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата. – Ташкент, 2016. – 246 с.

IPCC Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I. Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda M.B. Tignor, Simon K. Allen, Judith Boschung, Alexander Nauels, Yu Xia, Vincent Bex, Pauline M. Midgley. Cambridge University Press. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo, Delhi, Mexico City. 2013. – 1552 pp.

*Электронный ресурс:*

Вашингтонский Климатический Центр: [http://cdiac.ornl.gov/by\\_new/bysubjec.html](http://cdiac.ornl.gov/by_new/bysubjec.html) #climate (дата обращения 14.02.2017)

## ЎЗБЕКИСТОН ҲУДУДИДА ЗАМОНАВИЙ ИҚЛИМ ЎЗГАРИШИНИ БАҲОЛАШ

В.А. ЛОБАНОВ<sup>1</sup>, А.И. ВДОВЕНКО<sup>2</sup>, Ш.Ҳ. ҲАБИБУЛЛАЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Россия давлат гидрометеорология университети,

<sup>2</sup> Ўзбекистон Республикаси Гидрометеорология хизмати маркази, [alena-meteo@mail.ru](mailto:alena-meteo@mail.ru)

**Аннотация.** Ўзбекистон Республикасининг 66 метеорология станциялари учун 1966 йилдан ҳозирги вақтгача бўлган ҳаво ҳарорати ва ёгинлар миқдорининг кузатув қаторлари моделлаштирилган. Иқлим ўзгаришининг энг катта таъсири июль ойи ҳароратида намоён бўлгани ҳамда ҳароратнинг погонали кўтарилиши 1973 йилдан буён кузатилаётгани аниқланган. Орол денгизи яқинидаги метеорология станцияларида 2007 йилда ўртача ҳароратнинг иккинчи кўтарилиши кузатилиб, бу жараён ҳудуддаги чўлланиш билан боғлиқ. Январь ойида ҳароратнинг кўтарилиши сезиларсиз бўлиб, фақат бир нечта алоҳида станцияларда кузатилган. Шунингдек, катта табиий ўзгарувчанлик туфайли ёгингарчилик қаторларида иқлим ўзгаришлари деярли намоён бўлмаган.

**Калит сўзлар:** иқлим ўзгариши, узоқ муддатли кузатув қаторлари, ёгингарчилик, ҳарорат, ностационар ўртачалар моделлари, чизиқли тренд, погонали ўзгаришлар модели, ностационарлик кўрсаткичлари, фазовий қонуниятлар.

**ASSESSMENT OF THE MODERN CLIMATE CHANGES  
IN THE TERRITORY OF UZBEKISTAN****V.A. LOBANOV<sup>1</sup>, A.I. VDOVENKO<sup>2</sup>, Sh.Kh. KHABIBULLFEV<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University,<sup>2</sup> Centre of the Hydrometeorological Service of the Republic of Uzbekistan, alena-meteo@mail.ru

**Abstract.** *The modeling of time series of air temperatures and precipitation was carried out for 66 meteorological stations of the Republic of Uzbekistan from 1966 to the present. It was found that the greatest manifestation of climate change affects the July temperature and its stepwise increase has been observed since 1973, and at meteorological stations near the Aral Sea there was a second increase in the average temperature in 2007, associated with the desertification of the territory. An increase of January temperature is insignificant and is observed at several separate stations, as well as practically no manifestation of modern climate changes in precipitation time series is observed due to their high natural variability.*

**Keywords:** *climate change, long-term observation time series, precipitation, temperature, models of non-stationary average, linear trend, step-change model, indicators of non-stationarity, spatial patterns.*

**REFERENCES**

*Arushanov M.L.* Obektivnaya konstruksia ponyatiya «Klimat» [Objective construction of the concept of «Climate»] // *Gidrometeorologiyay i monitoring okrujashey sredi*, №1, 2021. – S. 11-19. (in Russian)

*Drejper H., Smith G.* Prikladnoy regressionniy analiz [Applied regression analysis]. – M.: Statistika, 1973. – 392 s. (in Russian)

*Zaks L.* Statisticheskoe otzenivanie [Statistical estimation]. – M.: Statistika, 1976. – 598 s. (in Russian)

*Lobanov V.A., Anisimov O.A.* Sovremennye izmeneniya temperaturi vozduha na territorii Evropi [Modern changes in air temperature in Europe] // *Meteorologiya i Gidrologiya*, №2, 2003. – S. 5-14. (in Russian)

*Lobanov V.A., Lemeshko N.A., Zhiltsova E.L., Gorlova S.A., Reneva S.A.* Vostanovlenie mnogoletnih ryadov temperaturi vozduha na Evropeyskoy territorii Rossii [Reconstruction of long-term series of air temperature in the European territory of Russia] // *Meteorologiya i Gidrologiya*, № 2, 2005. – S. 5-14. (in Russian)

*Lobanov V.A., Shadurskiy A.Ye.* Primenenie empiriko-statisticheskikh metodov dlya modelirovaniya i analiza klimaticheskikh izmeneniy [Application of empirical-statistical methods for modeling and analysis of climate change] // *Ucheniye zapiski RGGMU, Sankt-Peterburg*, №14, 2010. – S. - 16. (in Russian)

*Lobanov V.A., Smirnov I.A., Shadurskiy A. Ye.* Praktikum po klimatologii. Chast 1 (uchebnoe posobie) [Practice book on climatology. Part 1]. RGGMU, Sankt-Peterburg, 2011. – 144 s. (in Russian)

*Lobanov V.A., Shadurskiy A.Ye.* Opredeleniye zon klimaticheskogo riska na territorii Rossii pri sovremennom izmenenii klimata [Identify areas of climate risk in Russia at the present climate change]. Monografiya RGGMU, Sankt-Peterburg, 2013. – 164 s. (in Russian)

*Lobanov V.A., Toschakova G.G.* Proyavleniye sovremennih izmeneniy klimata na territorii Kostromskoy oblasti [Manifestation of modern climate changes on the territory of the Kostroma region]. Monografiya. FGBU. Kostromskoy Sentr po gidrometeorologii i monitoringu okrujashey sredi, Kostroma, 2013. – 171 s. (in Russian)

*Lobanov V.A., Kirillina K.S.* Sovremenniye i budushiye izmeneniya klimata Respubliki Saha (Yakutiya) [Modern and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia)]. Monografiya, RGGMU, Sankt-Peterburg, 2019. – 157 s. (in Russian)

*Lobanov V.A.* Uchebnoe posobie po regionalnoy klimatologii [Tutorial for Regional Climatology]. RGGMU, Sankt-Peterburg, 2019. – 170 s. (in Russian)

Meteorologicheskiye danniyе Sentra Gidrometeorologicheskoy Slujby Respubliki Uzbekistan [Meteorological data of the Center of the Hydrometeorological Service of the Republic of Uzbekistan]. (data obrasheniya 05.01.2017). (in Russian)

Monin A.S., Shishkov Yu.A. Klimat kak problema fiziki [Climate as a problem of physics] // Uspexi Fizicheskix Nauk, T. 170, № 4, 2000. – 445 s. (in Russian)

Perviy otsenochniy doklad «Izmeneniye klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii» [First Assessment Report "Climate Change in the Territory of the Russian Federation"]. – M.: 2008. – 1020 s. (in Russian)

Rekomendatsii po privedeniyu ryadov rechnogo stoka i ih parametrov k mnogoletnemu periodu [Recommendations for bringing the river runoff series and their parameters to a long-term period.]. – L.: Gidrometeoizdat, 1979. – 64 s. (in Russian)

Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitelstvu. Opredeleniye osnovnih raschetnih gidrologicheskikh harakteristik. SP 33-101-2003. [A set of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics. SP 33-101-2003]. – M.: Gosstroy Rossii, 2004. – 73 s. (in Russian)

Shukri O.A.A., Lobanov V.A., Hamid M.S. Sovremenniy i budushiy klimat Araviyskogo poluostrova [The modern and future climate of the Arabian Peninsula]. Monografiya. RGGMU, Sankt-Peterburg, 2018 – 191 s. (in Russian)

Tretye Natsionalnoye soobsheniye Respubliki Uzbekistan po Ramochnoy Konventsii OON ob izmenenii klimata [Third National Communication of the Republic of Uzbekistan on the UN Framework Convention on Climate Change]. – Tashkent, 2016. – 246 s. (in Russian)

*Electronic resource:*

Vashingtonskiy Klimaticheskiy Sentr [Washington Climate Center], [http://cdiac.ornl.gov/by\\_new/bysubject.html#climate](http://cdiac.ornl.gov/by_new/bysubject.html#climate).

УДК 551.509

## МЕТОДИКА РАЦИОНАЛИЗАЦИИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА

М.Л. АРУШАНОВ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, [mikl-arushanov@rambler.ru](mailto:mikl-arushanov@rambler.ru)

**Аннотация.** В статье рассмотрен метод рационализации метеорологической сети станций на территории Узбекистана с учетом существующей густоты станций наблюдений, основанный на величине ошибки оптимальной интерполяции, как функции расстояния между станциями.

Показано, что теоретически корректное решение задачи рационального планирования систем метеорологических наблюдений относительно некоторой «идеальной» сети должно основываться на использовании двух основных критериев – экономического и метеорологического. При этом под «идеальной» сетью понимается сеть наблюдений, обеспечивающая точными наблюдениями метеорологических величин в каждой точке пространства в каждый момент времени. Тем не менее, даже при мыслимо существующей такой сети, хозяйственные потери неизбежны из-за невозможности достижения 100%-ной точности прогнозов. Из очевидных соображений следует, что затраты на содержания «идеальной» системы наблюдений огромны, т.е. такая система экономически нецелесообразна. Поэтому задача рационализации метеорологической сети, теоретически, должна ставиться, как

\* [mikl-arushanov@rambler.ru](mailto:mikl-arushanov@rambler.ru), тел.: +998 90 9976146

задача оптимизации затрат на содержание системы и убытков хозяйства вследствие неточности и недостаточности метеорологической информации.

Практическая же реализация рационализации метеорологической сети с учётом экономического критерия в силу крайне слабой его изученности (последствий использования метеорологической информации) чрезвычайно сложна. Поэтому в данной статье использован метеорологический подход.

**Ключевые слова:** оптимальная интерполяция, мера Шеннона, ошибка интерполяции, квадратичная ошибка, корреляционная функция, метеорологическая сеть.

**Введение.** Оптимальная метеорологическая сеть такова, если расстояние между метеорологическими станциями составляет около 50-60 км для основных непрерывных метеорологических величин (температура, давление, влажность и др.), что согласно требованиям Всемирной метеорологической организации (ВМО) соответствует индексу плотности станций ( $\rho = 1 \text{ МС}/1000 \text{ км}^2$ ) 3,0-3,5 (один пункт на 3,0-3,5 тыс. км<sup>2</sup>). Концепция оптимальности в полном объёме не может быть реализована из-за необходимости учета всех потребностей различных отраслей экономики. В табл. 1 приведён индекс плотности станций на территории Республики Узбекистан и сопредельных с ней странах. Как видно из таблицы, плотность сети метеорологических станций Узбекистана и сопредельных стран не удовлетворяет требованиям ВМО, кроме Таджикистана.

Таблица 1

**Индекс плотности метеорологической сети Узбекистана  
и сопредельных стран**

Table 1

**Density index of the meteorological network of Uzbekistan  
and neighboring countries**

Страна	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Количество метеостанций	Плотность сети, $N_{\text{мс}}/100000 \text{ км}^2$	Индекс $\rho$
<b>Узбекистан</b>	<b>417,400</b>	<b>82</b>	<b>20</b>	<b>5</b>
Казахстан	2717,300	260	10	10
Кыргызстан	198,500	32	16	6
Россия	17075,200	1686	10	10
Таджикистан	143,100	53	37	3
Туркменистан	491,200	102	21	5
Афганистан	652,864	112	17	5

*Примечание:*  $N_{\text{мс}}$  – число метеостанций.

*Note:*  $N_{\text{мс}}$  – number of weather stations.

Плотность метеорологической сети в Узбекистане составляет  $\approx 1 \text{ МС}$  на  $6000 \text{ км}^2$ , что почти в два раза меньше требуемой ВМО нормы. Для обеспечения метеорологической информацией, отвечающей требованиям ВМО, территория Узбекистана должна быть оснащена не менее 144 метеорологическими станциями. Это требует значительных финансовых затрат. Однако, информативность метеорологической сети определяется не только расстоянием между станциями, а и их взаимным расположением. Критерием оптимального количества станций и их расположения может служить ошибка интерполяции [Гандин, 1961, 1963].

**Теоретические основы задачи рационального размещения метеорологической сети станций.** До 60-х годов прошлого столетия основной упор на развитие