
НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ

УДК 51-7:551.5 (470.61)
DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/4/93-102>

ISSN 1609-0683

Анализ климатических флюктуаций с использованием различных моделей на примере бассейна Нижнего Дона

В. В. Кулыгин, Л. В. Дацкевич , А. В. Парфенова

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр
Российской академии наук, Российской Федерации
(344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41)

Аннотация. Цель статьи – дать оценки региональных климатических изменений в бассейне Нижнего Дона с использованием различных моделей изменения метеорологических параметров.

Материалы и методы. Представлены варианты анализа климатических колебаний с помощью четырех моделей: стационарной, линейного тренда, ступенчатых изменений и модели смены тренда.

Результаты и обсуждение. Выявлены статистически значимые изменения в колебаниях температуры приземного воздуха, скорости ветра, атмосферных осадков и относительной влажности воздуха в бассейне Нижнего Дона. Обнаружено, что наиболее адекватные результаты при оценке климатических флюктуаций метеопараметров во временном ряду более 50 лет показывают методы моделей класса смены режима.

Выводы. При анализе климатических изменений следует рассматривать несколько моделей оценки для выбора наиболее адекватного метода. Статистические показатели, рассчитанные по выборкам небольшого объема (до 100), чувствительны к объему этих выборок. Поэтому декларативный способ выбора границ периодов может приводить к ошибочным выводам о наблюдаемых тенденциях. Лучше выполнять поиск этих границ на основе самих данных с учетом их однородности.

Ключевые слова: статистические методы, региональные климатические изменения, Нижний Дон.

Источник финансирования: Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта 125011200143-4. При выполнении работ использовалось оборудование ЦКП ЮНЦ РАН «Объединенный центр научно-технологического оборудования ЮНЦ РАН (исследование, разработка, апробация)» (программно-аппаратный комплекс для компьютерного моделирования и расчетов).

Для цитирования: Кулыгин В. В., Дацкевич Л. В., Парфенова А. В. Анализ климатических флюктуаций с использованием различных моделей на примере бассейна Нижнего Дона // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 4, с. 93-102. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/4/93-102>

ВВЕДЕНИЕ

Изучение климатических изменений в современной истории занимает значительный пласт от всех проводимых исследований в области географии. Недонозначность и неопределенность в прогнозировании не только флюктуаций на длительную перспективу в регионах, но и даже колебаний погоды на несколько месяцев становится вызовом для исследователей. Актуальной проблемой является адекватный анализ наблюдаемых флюктуаций метеопараметров, выделение периодов в их колебаниях и соотнесение наблюдавшихся региональных изменений с крупномасштабными процессами. В изучении динамики климатических флюктуаций широко распространен тренд-анализ, несколько реже используются модели смены режима. Фактически же можно считать, что тренд является частью цикла, так как бесконечных трендов в природе не существует и для нее характерны циклические колеба-

ния. А ступенчатые изменения являются проявлением этих колебаний при особой функции циклов, связанной с инерционным типом внутренней системы [7].

Цель исследования – на примере бассейна Нижнего Дона показать возможности анализа флюктуаций метеопараметров с помощью не только изучения наблюдаемых трендов, но также моделей ступенчатых изменений смены режима. Представить временную и пространственную изменчивость количественных показателей рассматриваемых величин.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования рассматривается бассейн Нижнего Дона (рис. 1). Анализ проводился на примере следующих метеопараметров: температура приземного воздуха, относительная влажность воздуха, количество атмосферных осадков, скорость приземного ветра. Период исследования 1966-2024 гг., использовались месячные ряды из базы данных Всероссийского на-

© Кулыгин В. В., Дацкевич Л. В., Парфенова А. В., 2025
✉ Дацкевич Людмила Владимировна, e-mail: dashkev@yandex.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

учно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [11]. Для МС Харьков из-за отсутствия информации не рассматривались относительная влажность воздуха и скорость ветра, а на МС Ростов-на-До-

ну ряд скорости ветра не использовался из-за значительных пропусков. Единичные пропуски среднемесячных данных заполнялись среднемноголетними значениями. Годовые ряды строились по месячным рядам путем нахождения среднего значения (для осадков – суммы).



Условные обозначения: Треугольниками обозначены МС внутри бассейна, кругами – вне бассейна (использовались для построения карт)

Rис. 1. Регион исследований – бассейн Нижнего Дона
[Fig. 1. Study area is the Lower Don basin]

Под климатическими флюктуациями будем понимать систематические изменения в статистических свойствах метеопараметров за период от нескольких десятилетий. В качестве инструментов для оценки наблюдавшихся изменений использовались четыре варианта математических моделей, общий вид которых может быть записан как (1):

$$y(t) = y_{\text{среднее}}(t) + \varepsilon_t = y_{\text{среднее}}(t) + N(0, \sigma^2), \quad (1)$$

где $y(t)$ – рассматриваемый метеопараметр, $y_{\text{среднее}}(t)$ – функция изменения его среднего значения, ε_t – случайная составляющая в форме нормального распределения $N(0, \sigma^2)$ с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением σ ; t – время.

Стационарная модель. Чтобы ответить на вопрос, есть ли климатические флюктуации во временном ряду, можно ограничиться самой простой моделью: изменением среднего значения со случайными колебаниями. Эта модель соответствует гипотезе стационарности климата и предполагает, что колебания процессов от межгодовых до десятилетних масштабов являются случайными, а сумма процессов более длительных масштабов (например, столетнего) и антропогенного воздействия проявляется в изменении среднего значения во времени. Базовая стационарная модель (2)

характеризуется неизменностью во времени среднего значения и среднего квадратичного отклонения:

$$y_{\text{среднее}}(t) = E[y] = \text{const}; \sigma^2 = \text{Var}(y) = \text{const}, \quad (2)$$

где $E[y]$, $\text{Var}(y)$ – математическое ожидание и дисперсия y .

Модель линейного тренда (3) – другая наиболее распространенная модель при исследовании климатических флюктуаций, представляющая собой однофакторное регрессионное уравнение зависимости характеристики от времени. Используется для оценки общих тенденций изменений и эффективна, когда процесс развивается более или менее монотонно.

$$y_{\text{среднее}}(t) = a_1 t + a_0, \quad (3)$$

где a_0 , a_1 – коэффициенты.

Коэффициент линейного тренда (a_1), характеризующий среднюю скорость изменения метеопараметра на рассматриваемом отрезке времени, используется в качестве меры интенсивности климатических флюктуаций. Его статистическая значимость (отличие от нуля) определялась с помощью t -критерия Стьюдента с уровнем значимости 95 %.

Модель ступенчатых изменений (4) и **модель смены тренда** (5) относятся к классу моделей смены режима. При анализе временных рядов наблюдений следует

помнить, что рассматриваемый период может не быть однородным, зачастую выделяются подпериоды, и гипотеза монотонного изменения не выполняется. В этом случае может быть рассмотрен класс моделей смены режима. Такие модели составляются из двух (или более) аналогичных моделей для двух (или нескольких) частей временного ряда. Например, модель ступенчатых изменений характеризуется неизменностью во времени среднего значения и стандартного отклонения для каждой части временного ряда (4):

$$y_{\text{среднее}}(t) = \begin{cases} E[y] = m_1 = \text{const}; \text{Var}(y) = \sigma_1^2 = \text{const}, t \leq T \\ E[y] = m_2 = \text{const}; \text{Var}(y) = \sigma_2^2 = \text{const}, t > T' \end{cases} \quad (4)$$

$$y_{\text{среднее}}(t) = \begin{cases} a_{11}t + a_{01}, \sigma_1^2 = \text{const}, t \leq T \\ a_{12}t + a_{02}, \sigma_2^2 = \text{const}, t > T' \end{cases} \quad (5)$$

где T – момент времени смены режима.

Момент смены режима определяется либо визуально, либо на основе информации, свидетельствующей о нарушении однородности ряда. Например, для выделения периодов можно использовать разностную интегральную кривую, дающую представление о нарастающей сумме аномалий. Однако, ее использование не самый лучший способ, так как оставляет много неопределенности и может давать смещение границ периодов. Другой вариант выделения момента смены режима – минимизация ошибки аппроксимации выбранной модели. Для модели ступенчатых изменений (4) в этом

случае минимизируются значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда от модельных значений (6):

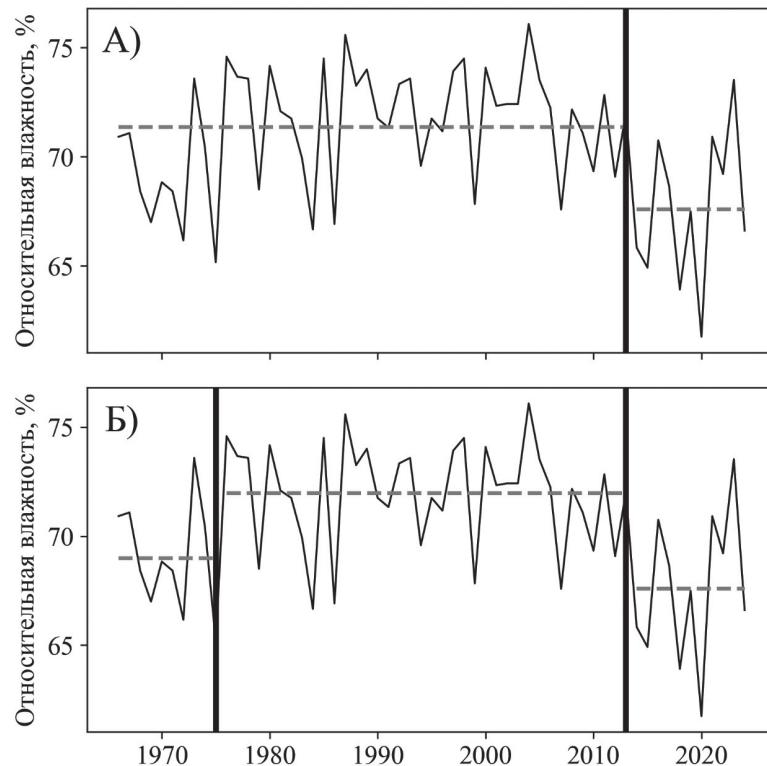
$$\sum_{i=1}^T (m_1 - y_i)^2 + \sum_{i=T+1}^n (m_2 - y_i)^2 = \sigma_1^2(n_1 - 1) + \sigma_2^2(n_2 - 1) \rightarrow \min_T. \quad (6)$$

После нахождения минимума (6) проверяется статистическая значимость этого разделения с помощью критерия Фишера (7), оценивающего однородность дисперсий исходного ряда и дисперсии результата разложения на 2 части. Если они неоднородны, то данное разделение статистически значимо:

$$F = \frac{\sigma_{\text{ряд}}^2}{\sigma_{\text{ступ}}^2}, \quad \sigma_{\text{ступ}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}}. \quad (7)$$

Дополнительно выполнялась проверка статистического различия средних значений двух полученных частей ряда на основе t -критерия.

Мы реализовали рекурсивный вариант алгоритма, когда после первого разделения всего ряда на две части, этот же алгоритм применяется для каждой из выделенных частей (рис. 2). Процесс останавливается, когда не удается найти значимое разделение, или ряд становится слишком мал. Процедура разбивает весь ряд на несколько периодов с существенным различием дисперсий и/или средних значений.



Условные обозначения: вертикальные линии отмечают моменты смены режима, горизонтальные штриховые – средние значения метеопараметра на выделенной части ряда

Rис. 2. Поиск момента смены режима для годового ряда относительной влажности на МС Ремонтное:
А) первоначальное разделение ряда на две части; Б) повторное разделение одной из полученных частей

[Fig. 2. Search for the moment of regime change for the annual series of relative humidity on meteostation Remontnoye:
A) initial split of the series into two parts; B) repeated split of one of the obtained parts]

Полученные параметры моделей сравнивались со значениями опорных климатологических норм, вычисленных для периода 1991-2020 гг., рекомендованного Всемирной метеорологической организацией [9].

Для анализа пространственных изменений метеопараметров удобно работать с картосхемами. Сеточные области с размером ячеек 30*30 км, отражающие среднемесячные значения рассматриваемых величин, строились для каждого месяца каждого года за 1966-2024 гг. с использованием геостатистической интерполяции методом обычного кригинга (ordinary kriging). Для временных рядов в каждой ячейке были оценены параметры модели линейного тренда. Статистическая значимость коэффициентов определялась с помощью t-критерия Стьюдента с уровнем значимости 95 %.

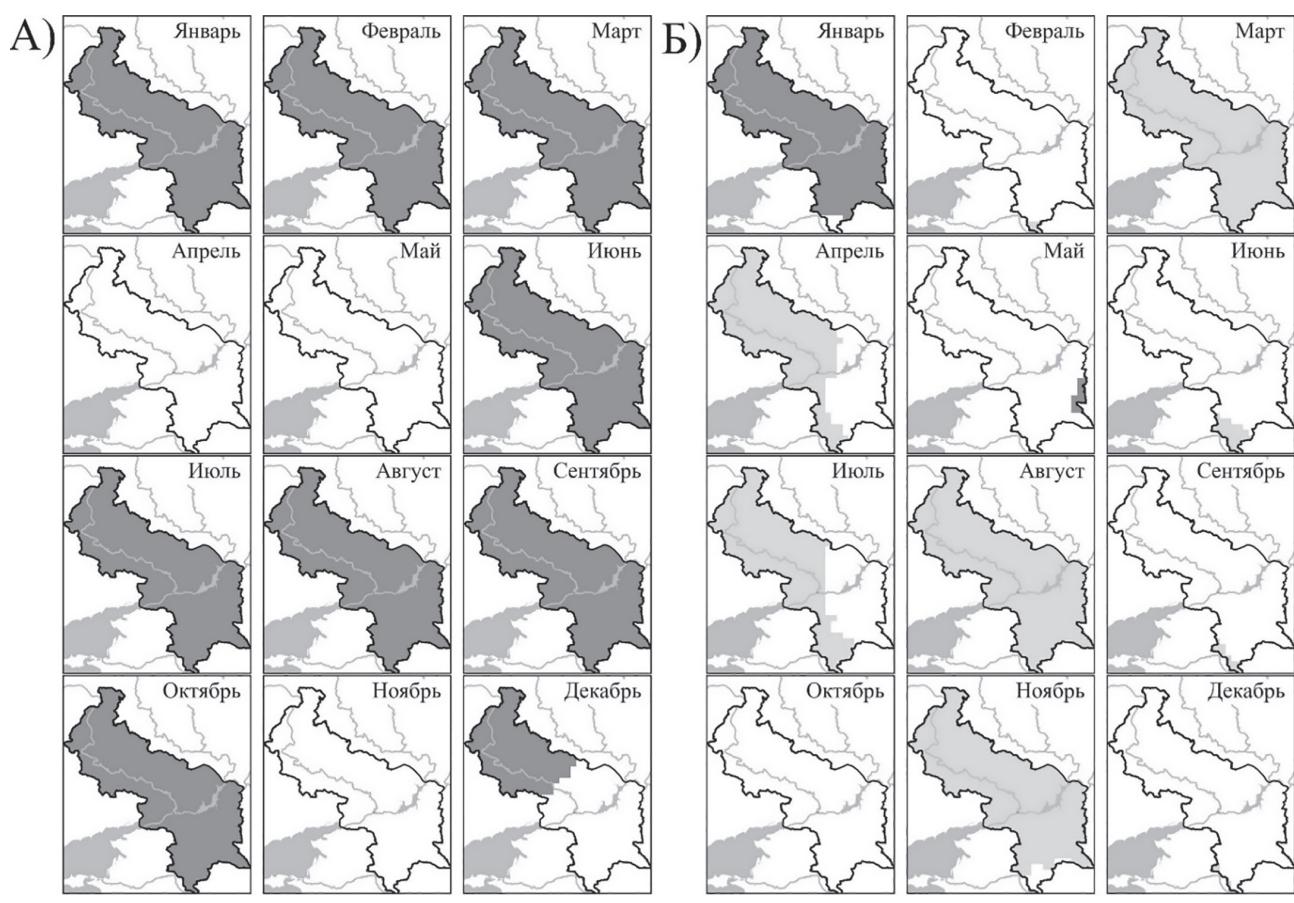
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В бассейне Нижнего Дона за 1966-2024 гг. линейные тренды среднегодовой приземной температуры воздуха были положительными, а относительной влажности воздуха и скорости ветра – отрицательными (табл., рис. 3). Осредненные по МС тенденции в бассейне составляют: для температуры воздуха 0,4 °C

/ 10 лет, атмосферных осадков 2 мм / 10 лет, относительной влажности -0,6 % / 10 лет, скорости ветра -0,2 м/с / 10 лет. Полученный для 1966-2024 гг. тренд приземной температуры воздуха на Нижнем Дону немного выше тренда за 1900-2020 гг. для Ростовской области (0,3 °C / 10 лет) [4].

Исследование рядов температур воздуха по месяцам показало, что для большинства имеет место тренд потепления (значим на уровне 5 %), за исключением апреля, мая, ноября и отчасти декабря (см. рис. 3). Наиболее быстрый рост 0,9 °C / 10 лет наблюдается в феврале на МС Ремонтное.

На Нижнем Дону не выявлено значимых изменений в поступлении атмосферных осадков, отмечено перераспределение по сезонам (см. табл.). За 1966-2024 гг. несущественный рост выпадения осадков наблюдался в марте, мае и отчасти октябре (тренд 2-3 мм / 10 лет, статистически значим только для МС Ремонтное в марте 3 мм / 10 лет). При этом осадки убывали в августе и декабре, а также отчасти в июне и сентябре (тренд -2 мм / 10 лет, статистически значим только в августе для МС Харьков -7 мм / 10 лет и МС Цимлянск -4 мм / 10 лет).



Условные обозначения: темно-серая заливка – значимые положительные изменения, светло-серая – значимые отрицательные

Рис. 3. Пространственное распределение коэффициента линейного тренда
А – температуры и Б – относительной влажности воздуха на Нижнем Дону за 1966-2024 гг.

[Fig. 3. Spatial distribution of the linear trend coefficient

A – air temperature and B – relative air humidity in the Lower Don basin for period 1966-2024]

Таблица

Коэффициенты линейных трендов метеопараметров по периодам
[Table. Linear trend coefficients of meteorological parameters by periods]

| Станция / Station | 1966- 1998 | 1999- 2024 | 1966- 2024 | 1966- 2005 | 2006- 2024 | 1966- 2024 | 1966- 1997 | 1998- 2024 | 1966- 2024 | 1966- 2006 | 2007- 2024 | 1966- 2024 |
|----------------------|---|---------------|---------------|--|---------------|---------------|---|---------------|---------------|--|---------------|---------------|
| | Температура воз- духа, °C/10 лет / Air temperature, °C/10 years | | | Сумма осадков, мм/10 лет / Precipitation, mm/10 years | | | Средняя скорость ветра, м/с /10 лет / Average wind speed, m/sec /10 years | | | Относительная влажность воздуха, % /10 лет / Relative air humidity, % / 10 years | | |
| Богородицкое-Фенино | 0,0 | 0,6 | 0,5 | 1,7 | 14,1 | 3,4 | -0,2 | -0,2 | -0,2 | -0,1 | 0,2 | -0,6 |
| Харьков | -0,1 | 0,7 | 0,5 | -6,0 | -1,8 | -4,8 | | | | | | |
| Валуйки | 0,0 | 0,7 | 0,5 | 24,7 | 22,0 | 4,2 | -0,4 | 0,0 | -0,2 | 0,4 | -1,8 | -0,6 |
| Чертково | 0,0 | 0,7 | 0,5 | 33,8 | 38,5 | 6,5 | -0,6 | 0,0 | -0,3 | 0,2 | -1,6 | -0,9 |
| Цимлянск | 0,0 | 0,7 | 0,5 | 14,6 | 58,0 | 3,5 | -0,4 | 0,0 | -0,3 | 0,0 | -0,9 | -0,7 |
| Ростов-на-Дону | -0,2 | 0,8 | 0,3 | 17,5 | 90,0 | 1,0 | | | | 0,3 | -2,6 | -0,7 |
| Гигант | -0,1 | 0,5 | 0,4 | 29,8 | 32,6 | 1,1 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | 0,1 | 0,4 | -0,5 |
| Ремонтное | 0,0 | 0,5 | 0,4 | 23,1 | 16,7 | 3,9 | -0,3 | -0,2 | -0,2 | 1,0 | -1,5 | -0,3 |

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты (уровень 95 %) положительные – курсивом, отрицательные – прямо

[Note. Statistically significant coefficients (95 % level) are highlighted in **bold**; positive coefficients are highlighted in *italics*; negative coefficients are highlighted in plain text]

Региональные оценки трендов скорости ветра для Нижнего Дона за 1966-2024 гг. показали убывание значений на протяжении всего года на всей территории (см. табл.). Наибольшие изменения отмечены в январе и феврале (тренд -0,2... -0,4 м/с / 10 лет, максимальное снижение в феврале на МС Чертково -0,4 м/с / 10 лет), минимальные – в летний сезон (тренд до -0,1 м/с / 10 лет). Практически для всех месяцев года и МС коэффициенты статистически значимы.

Коэффициенты линейных трендов средней годовой относительной влажности указывают на ее снижение на Нижнем Дону для всех МС (см. табл., рис. 3). Наибольшее убывание значений за 1966-2024 гг., статистически значимое на большинстве МС, отмечено в марте, августе, а также отчасти в апреле, июле и ноябре (тренд -1...-2 % / 10 лет). Наиболее быстрый темп падения – в августе на МС Ростов-на-Дону (-2,6 % / 10 лет) и МС Гигант (-2,4 % / 10 лет), а за год в целом – на МС Чертково (-0,9 % / 10 лет). При этом относительная влажность немного повышалась на всех МС в январе (тренд до 1,1 % / 10 лет на МС Ростов-на-Дону) и мае (тренд до 1,3 % / 10 лет на МС Ремонтное).

Для исследования характера изменений метеопараметров в 1966-2024 гг. временной промежуток был разделен на периоды. Для этого по всем МС были построены разностные интегральные кривые среднегодовых значений температуры воздуха, скорости ветра, относительной влажности воздуха и суммы атмосферных осадков (пример на рис. 4).

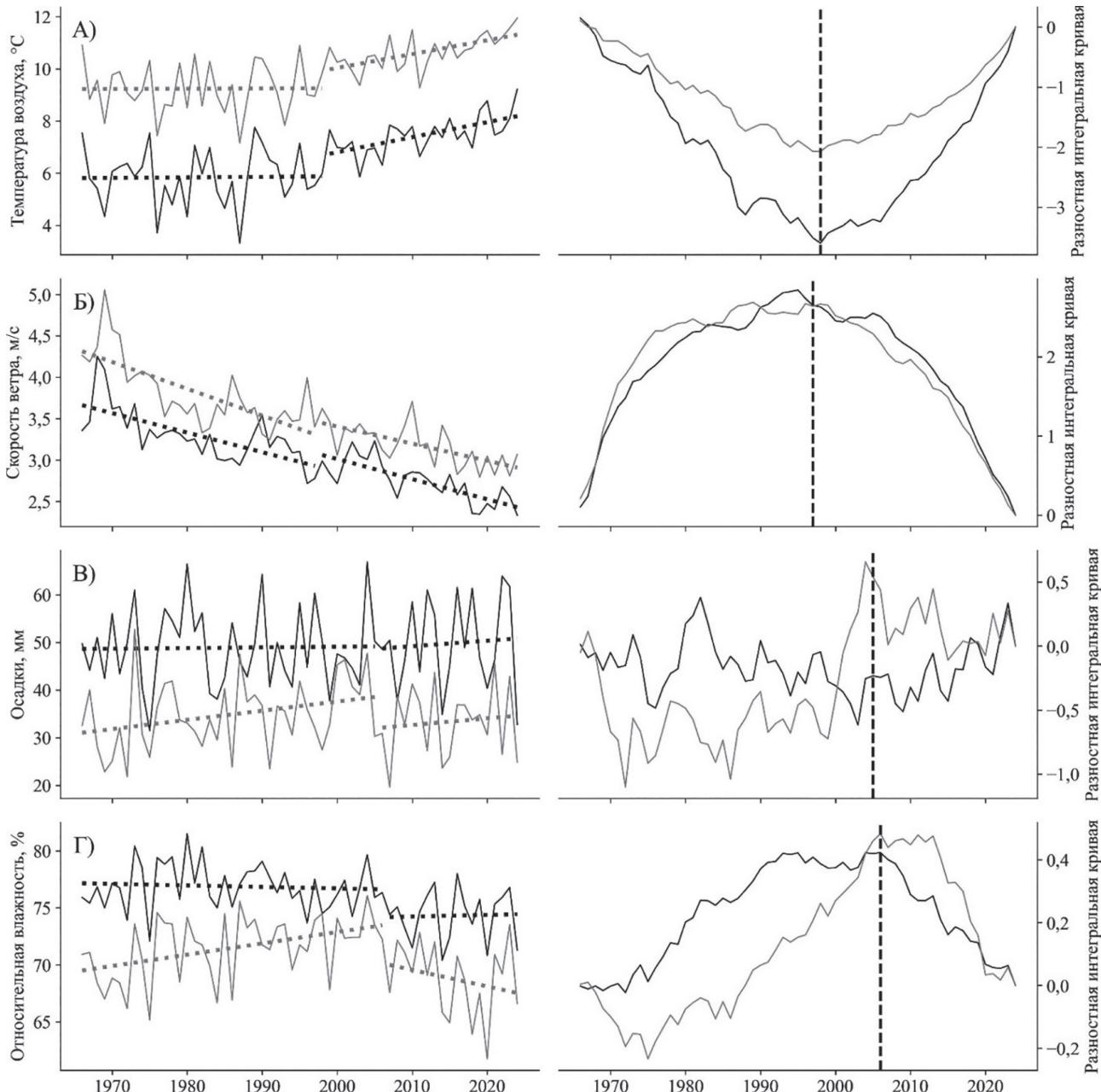
На интегральной кривой годовой температуры воздуха удалось четко выделить два периода: 1966-1998 и 1999-2024 гг. Для каждого из них были рассчитаны коэффициенты линейного тренда (использовалась мо-

дель (5)). Анализ полученных результатов показывает, что значимые изменения в динамике приземной температуры воздуха происходили во втором выделенном периоде. Максимальное повышение температуры в этот промежуток наблюдалось на МС Харьков, Валуйки, Ростов-на-Дону (0,74, 0,66 и 0,76 °C / 10 лет соответственно). В свою очередь в первом периоде не отмечено значимых линейных трендов температуры воздуха для всех МС. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований климатических изменений в смежных Белгородской и Воронежской областях [3, 10].

Для годовых значений атмосферных осадков и относительной влажности воздуха картина на графиках интегральных кривых иная (см. рис. 4). Достаточно резкий переход от возрастающего тренда к выраженному снижению, в большей степени характерный для юга бассейна Нижнего Дона, позволил выделить интервалы 1966-2005 и 2006-2024 гг. для атмосферных осадков и 1966-2006 и 2007-2024 гг. для относительной влажности воздуха (см. рис. 4, табл.). Снижение поступления атмосферных осадков отразилось в наблюдаемом сегодня маловодном периоде на Дону [2, 6, 10, 12], аридизации климата Нижнего Дона [5, 8]. Вероятно, эта тенденция связана с изменениями в атмосферной циркуляции, в частности, снижением повторяемости процессов W-типа [1].

Исследование динамики скорости ветра выявило монотонный характер снижения без переломных моментов, с некоторым замедлением темпов примерно с конца 1990-х гг.

Результаты выделения моментов ступенчатых изменений согласно процедуре (6) для температуры воздуха, атмосферных осадков и относительной влажности воздуха для каждой МС представлены на рисунке 5.



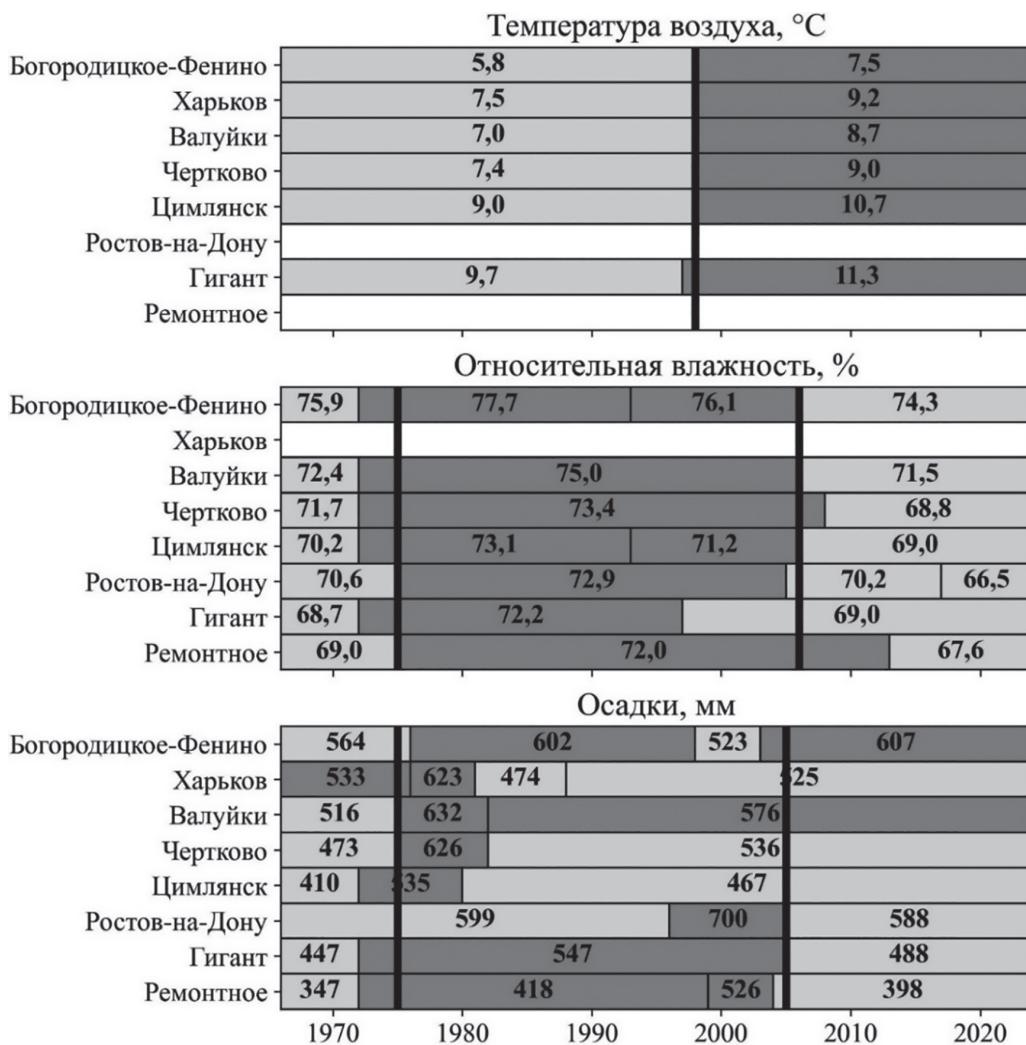
Условные обозначения: А – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), Б – скорость ветра (м/с), В – атмосферные осадки (мм), Г – относительная влажность воздуха (%); темный цвет – МС Богородицкое-Фенино, светлый – МС Ремонтное; наклонные пунктирные линии – линейный тренд, вертикальная штрихованная линия – год разделения периодов

Rис. 4. Поиск переломного момента в динамике метеопараметров по разностной интегральной кривой
[Fig. 4. Search for a turning point in the dynamics of meteorological parameters using a difference integral curve]

Для скорости ветра моменты смены режима найдены не были из-за сравнительно монотонной динамики в рассматриваемом временном ряду. Для температуры воздуха отмечено практически синхронное для всего бассейна изменение режима в 1998 г., что совпало со значением, определенным по разностной интегральной кривой. Процедура (6) не выявила четкого деления на подпериоды на МС Ростов-на-Дону и Ремонтное, хотя, согласно таблице, в бассейне Нижнего Дона наблюдаются общие тенденции для температуры воздуха. Распределение осадков и относительной влажности менее

однородно, но по состоянию на юге бассейна можно выделить три периода (рис. 5): 1966-1975 (пониженная влажность), 1976-2006 (повышенная), 2007-2024 гг. (пониженная). Здесь одна из двух границ разделения частей рядов опять совпала с результатами, полученными по разностной интегральной кривой.

Полученное разбиение на подпериоды дает дополнительную информацию для понимания процессов, влияющих на метеопараметры. Для примера на рисунке 6 сравнивается итоговое разбиение на интервалы с 30-летними базисными периодами [9] для МС Богоро-



Условные обозначения: цифры показывают среднее значение параметра в выделенных частях рядов; темно-серая заливка у частей ряда, среднее значение которых превышает среднее за весь период, светло-серая у частей ряда, среднее значение которых ниже; жирные вертикальные линии – моменты смены режима в целом для бассейна

Рис. 5. Выделение моментов ступенчатых изменений атмосферных осадков (мм), температуры (°C) и относительной влажности воздуха (%) для Нижнего Дона
[Fig. 5. Highlighting the moments of step changes in air temperature (°C), precipitation (mm) and relative air humidity (%) for the Lower Don basin]

дицкое-Фенино и Ремонтное (северо-запад и юго-восток бассейна). В результате удалось уточнить границы интервалов смены состояния рассматриваемых метеопараметров. Так можно видеть, что тенденция роста температуры воздуха отсутствует до 1998 г., т.е. потепление начинается почти на 10 лет позже, нежели описывать ситуацию исходя из 30-летних периодов. Для относительной влажности сначала отмечался рост, а затем падение значений, в отличие от однонаправленной тенденции к снижению при рассмотрении базисных периодов. Эта закономерность характерна для всех МС.

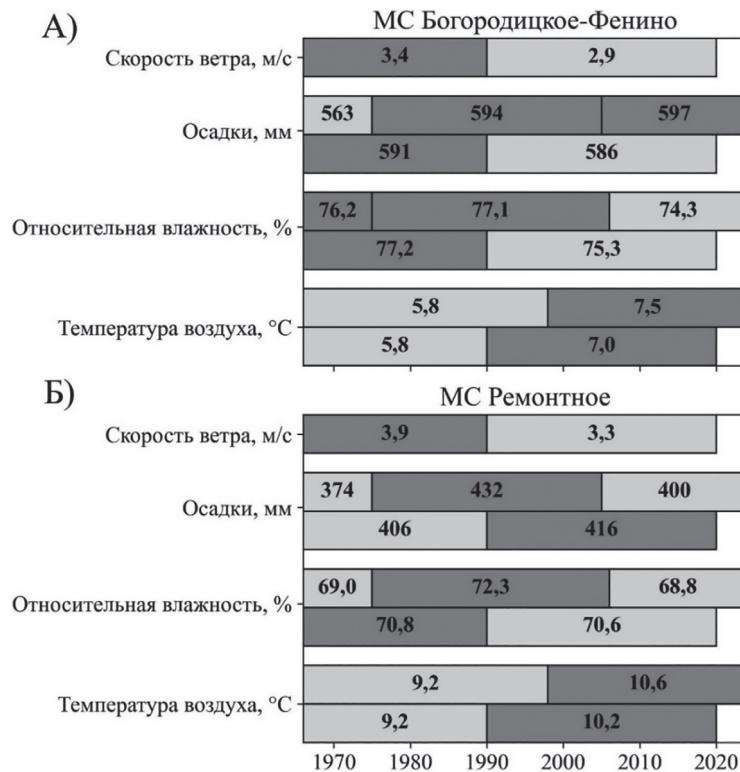
Следует отметить, что статистические показатели, рассчитанные по выборкам небольшого объема, чувствительны к объему этих выборок. В связи с этим включение или исключение из выборки даже одного года может повлиять на величину среднего значения.

Поэтому нормативный способ выбора границ периодов (каждые 10, 30 лет и т.д.) может приводить к ошибочным выводам о наблюдаемых тенденциях. Более надежным выглядит использование методов, основанных на анализе однородности рассматриваемых рядов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы можно сделать следующие выводы.

Использование рассчитанных средних значений или линейных трендов для объяснения или предсказания климатических флюктуаций часто предполагает неявное использование некоторой модели изменения среднего значения. Однако предположения, которые лежат в основе этих моделей, могут не выполняться, и только их явная проверка может говорить об адекватности использования той или иной. Следует рас-



Условные обозначения: двухслойная временная полоса для каждой рассматриваемой характеристики (кроме скорости ветра) показывает средние значения в верхней части – за интервалы, полученные в рамках модели ступенчатых изменений; в нижней части – за базисные периоды по 30 лет; темно-серая заливка у частей ряда, среднее значение которых превышает среднее за весь период, светло-серая у частей ряда, среднее значение которых ниже

Рис. 6. Сравнение 30-летних периодов с выделенными интервалами смены состояния метеопараметров:
А) МС Богородицкое-Фенино; Б) МС Ремонтное

[Fig. 6. Comparison of 30-year periods with selected intervals of change in the state of meteorological parameters:
A) Bogoroditskoye-Fenino; B) Remontnoye]

сматривать несколько моделей и выбирать из них «лучшую» на основе визуального анализа результатов или по величине ошибки аппроксимации.

За период 1966-2024 гг. на Нижнем Дону выявлен восходящий тренд приземной температуры воздуха (с 1998 г. в среднем по региону на 0,4 °C / 10 лет). Для годовых сумм атмосферных осадков и относительной влажности воздуха наблюдается достаточно резкий переход от возрастающего тренда к выраженному снижению (с 2007 г.), что отразилось в наблюдаемом сегодня маловодном периоде на Дону. Исследование динамики скорости приземного ветра установило монотонный характер снижения значений без переломных моментов (примерно -0,2 м/с / 10 лет).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дмитриев А. А., Дубравин В. Ф., Белязю В. А. *Атмосферные процессы Северного полушария (1891-2018 гг.), их классификация и использование*. Санкт-Петербург: СУПЕР, 2018. 306 с.
- Дмитриева В. А., Сушкив А. И., Закусилов В. П. Климатическая обусловленность современных гидроэкологических процессов в речных потоках бассейна Верхнего Дона // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2022, № 2, с. 118-127.
- Дмитриева В. А., Сушкив А. И. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата // Вестник Воронежского университета. Серия: География. Геоэкология, 2023, № 2, с. 56-63.
- Дрововозова Т. И., Кириленко А. А. Влияние метеорологических факторов на качество природных водных объектов на территории Багаевской оросительной системы // Экология и водное хозяйство, 2021, т. 3, № 4, с. 1-13.
- Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б. Роль весенне-летних засух в динамике аридизации засушливых земель Европейской территории России // Известия РАН. Серия географическая, 2022, т. 86, № 1, с. 98-108.
- Матишин Г. Г., Дацкевич Л. В., Кириллова Е. Э. Цикличность климата в Приазовье: голоцен и современный период (XIX-XXI вв.) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2021, т. 498, № 5, с. 96-100.
- Методы и результаты оценки современных региональных изменений климата / В. А. Лобанов, С. А. Мамедов, Ж. К. Наурозбаева, Фань Сяо Цинь // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», 2019, с. 494-507.
- Парфенова А. В., Дацкевич Л. В. Аридизация климата Ростовской области // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем, 2021, т. 1. № 6, с. 131-138.

9. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. ВМО, № 1203. Всемирная метеорологическая организация, 2017. 32 с.

10. Современные климатические и гидрологические изменения в Белгородской области и их последствия / А. Г. Георгиади, С. В. Долгов, Е. А. Кащунина, Н. И. Короневич, С. И. Шапоренко, С. В. Ясинский // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2023, № 4, с. 84-89.

11. Специализированные массивы данных Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД). – URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 21.01.2025). – Текст: электронный.

12. Чернова М. А., Дудник С. Н., Буковский М. Е. Изменчивость водного режима рек донского бассейна // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2020, № 3, с. 40-48.

Конфликты интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 14.04.2025

Принята к публикации: 25.11.2025

ATMOSPHERIC AND CLIMATE SCIENCES

UDC 51-7:551.5 (470.61)

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/4/93-102>

ISSN 1609-0683

Analysis of Climate Fluctuations Using Various Models Using the Example of the Lower Don Basin

V.V. Kulygin, L.V. Dashkevich[✉], A.V. Parfenova

Federal Research Centre the Southern Scientific Centre
of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation
(41, Chekhov Ave., Rostov-on-Don, 344006)

Abstract. The purpose of the article is to provide estimates of regional climate changes in the Lower Don basin using various models of meteorological parameters changes.

Materials and methods. The article presents options for analyzing climate fluctuations using four models: stationary, linear trend, step changes, and a trend change model.

Results and discussion. Statistically significant changes in surface air temperature, wind speed, precipitation, and relative air humidity in the Lower Don basin were revealed. The most adequate results in assessing climatic fluctuations of meteorological parameters over of more than 50 years were obtained using the method of regime change class models.

Conclusion. Several assessment models should be considered to select the most correct method for climate change analysis. Statistics calculated from small dataset (up to 100) are sensitive to the size of these datasets. Therefore, the declarative method of choosing period boundaries can lead to erroneous conclusions about the observed trends. For this reason, the search for period boundaries must be carried out on the basis of data and its homogeneity.

Key words: statistical methods, regional climate changes, Lower Don.

Funding: The study was carried out within the framework of state assignment of SSC RAS, project No. 125011200143-4. The work was performing with using the equipment of the «Joint Science and Technology Equipment Center of SSC RAS (research, development, testing)».

For citation: Kulygin V. V., Dashkevich L. V., Parfenova A. V. Analysis of Climate Fluctuations Using Various Models Using the Example of the Lower Don Basin. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2025, no. 4, pp. 93-102 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/4/93-102>

REFERENCES

1. Dmitriev A. A., Dubravin V. F., Belyazo V. A. *Atmosfernye protsessy Severnogo polushariya (1891-2018 gg.)*. [Atmospheric processes of the Northern Hemisphere (1891-2018), their classification and use]. Saint-Petersburg: SUPER, 2018. 306 p. (In Russ.)
2. Dmitrieva V. A., Sushkov V. A., Zakusilov V. P. Klimaticheskaya obuslovленность современных гидроэкологических процессов в реках верхнего бассейна Верхнего Дона [Climatic

Conditionality of Modern Hydroecological Processes in the River Flows of the Upper Don Basin]. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2022, no. 2, pp. 118-127. (In Russ.)

3. Dmitrieva V. A., Sushkov A. I. Temperaturnyj rezhim Voronezhskoj oblasti v usloviyah menyayushchegosya klimata [Thermal Regime in the Voronezh Region in a Changing Climate]. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2023, no. 2, pp. 56-63. (In Russ.)

© Kulygin V. V., Dashkevich L. V., Parfenova A. V., 2025

✉ Lyudmila V. Dashkevich, e-mail: dashkev@yandex.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

4. Drovovozova T. I., Kirilenko A. A. Vliyaniye meteorologicheskikh faktorov na kachestvo prirodnykh vodnykh ob'yektor na territorii Bagayevskoy orositel'noy sistemy [The influence of meteorological factors on the quality of natural water bodies in the territory of the Bagayevskaya irrigation system]. *Ekologiya i vodnoye khozyaystvo*, 2021, vol. 3, no. 4, pp. 1-13. (In Russ.)
5. Zolotokrylin A. N., Cherenkova Ye. A., Titkova T. B. Rol' vesenne-letnikh zasukh v dinamike aridizatsii zasushlivykh zemel' Yevropeyskoy territorii Rossii [The role of spring-summer droughts in the dynamics of aridization of drylands of the European territory of Russia]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 1, pp. 98-108. (In Russ.)
6. Matishov G. G., Dashkevich L. V., Kirillova Ye. E. Tsiklichnost' klimata v Priaзов'ye: golotsen i sovremenyy period (XIX-XXI vv.) [Climate cyclicity in the Azov region: Holocene and modern period (19th-21st centuries)]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle*, 2021, vol. 498, no. 5, pp. 96-100. (In Russ.)
7. Metody i rezul'taty otsenki sovremennykh regional'nykh izmeneniy klimata [Methods and results of assessing modern regional climate changes] / V. A. Lobanov, S. A. Mamedov, Zh. K. Naurozbayeva, Fan' Syao Tsin'. *Materialy II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii»*, 2019, pp. 494-507. (In Russ.)
8. Parfenova A. V., Dashkevich L. V. Aridizatsiya klimata Rostovskoy oblasti [Aridization of the climate of the Rostov region]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovaniye ekonomiceskikh i ekologicheskikh sistem*, 2021, vol. 1, no. 6, pp. 131-138. (In Russ.)
9. Rukovodjashchie ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm. VMO, no. 1203 [WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO-No. 1203]. Vsemirnaja meteorologicheskaja organizacija, 2017. 32 p.
10. Sovremennye klimaticheskie i gidrologicheskie izmeneniya v Belgorodskoj oblasti i ih posledstviya [Contemporary Climatic and Hydrological Changes in the Belgorod Region and Their Consequences] / A. G. Georgiadi, S. V. Dolgov, E. A. Kashutina, N. I. Koronkevich, N. I. Shaporenko, S. V. Yasinsky. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2023, no. 4, pp. 84-89. (In Russ.)
11. Specialized data arrays of the All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center (VNIGMI-MDC). – URL: <http://meteo.ru/data> (accessed 21.01.2025). – Text: electronic. (In Russ.)
12. Chernova M. A., Dudnik S. N., Bukovsky M. E. Izmenchivost' vodnogo rezhima rek donskogo bassejna [Variability of the Water Regime in the Don Basin Rivers]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2020, no. 3, pp. 40-48. (In Russ.)

Conflict of interests: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 14.04.2025

Accepted: 25.11.2025

Кулыгин Валерий Валерьевич

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Информационных технологий и математического моделирования Южного научного центра РАН, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-9748-6497, e-mail: kulygin@ssc-ras.ru

Дашкевич Людмила Владимировна

Кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Южного научного центра РАН, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-1827-0696, e-mail: dashkev@yandex.ru

Парфенова Анна Васильевна

Инженер-исследователь Южного научного центра РАН, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, ORCID: 0009-0005-1656-0656, e-mail: annparfenowa@mail.ru

Valerii V. Kulygin

PhD, research assistance, Head of the Laboratory of Information Technologies and Mathematical Modeling, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-9748-6497, e-mail: kulygin@ssc-ras.ru

Lyudmila V. Dashkevich

PhD research assistance, Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-1827-0696, e-mail: dashkev@yandex.ru

Anna V. Parfenova

Research engineer at the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation, ORCID: 0009-0005-1656-0656, e-mail: annparfenowa@mail.ru