

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.583(470.61)

СОВРЕМЕННАЯ АРИДИЗАЦИЯ КЛИМАТА НИЖНЕГО ДОНА

© 2026 г. В. В. Кулыгин^{1, *}, Л. В. Дашкевич¹, А. В. Парфенова¹

¹Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: kulygin@ssc-ras.ru

Поступила в редакцию 02.10.2025 г.

После доработки 07.10.2025 г.

Принята к публикации 23.12.2025 г.

В статье дана оценка изменений интенсивности аридизации и континентальности климата в бассейне Нижнего Дона за более чем 60-летний период. Рассматривались три индекса: коэффициент увлажнения Н.Н. Иванова, гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова, индекс континентальности климата по С.П. Хромову, расчет которых выполнялся для метеостанций региона. Получены значения трендов среднегодовой приземной температуры воздуха, относительной влажности, испаряемости и годовых сумм осадков для базисных климатических периодов 1961–1990 гг., 1991–2020 гг. и в целом для 1961–2024 гг. Выявлено некоторое снижение континентальности климата на юго-востоке региона. Оценена динамика площади распределения зон увлажнения по коэффициентам увлажнения и гидротермическому за рассматриваемые периоды. Отмечены особенности в их межгодовом распределении. Выявлено увеличение площадей засушливых зон в современный период на 6–8%. Приведена оценка для одного из самых засушливых за рассматриваемый отрезок времени — 2024 г. Среди других засушливых лет выделены 2007, 1962 и 2020 гг. со значительными площадями области скудного увлажнения; и 1998 г. с большой долей сухой зоны по гидротермическому коэффициенту. Самыми влажными по обоим индексам стали 1977, 1980 и 1997 гг. По разностным интегральным кривым коэффициентов увлажнения и гидротермического выделены периоды роста сухости, а также увлажнения в регионе. В настоящее время бассейн Нижнего Дона находится в засушливом периоде, при этом наблюдается снижение континентальности климата, связанное с преобладанием теплых зим в последние годы.

Ключевые слова: коэффициент увлажнения, гидротермический коэффициент, индекс континентальности, бассейн Нижнего Дона

DOI: 10.7868/S2658697526020073

ВВЕДЕНИЕ

Бассейн Нижнего Дона, расположенный на юго-западе Европейской территории России (ЕТР), является одним из важнейших сельскохозяйственных регионов страны. Он начинается у г. Калач-на-Дону и заканчивается устьем Дона, занимает территорию в 216 тыс. км² (большая часть в Ростовской области), характеризуется относительно благоприятным умеренно-континентальным климатом с неустойчивым режимом увлажнения. Среднегодовое количество атмосферных осадков увеличивается в направлении с юго-востока [410 мм на метеостанции (МС) Ремонтное] на северо-запад (580 мм на МС Богородицкое-Фенино), исключением в тер-

риториальном распределении выступает МС Ростов-на-Дону с годовыми суммами около 600 мм, что, вероятно, связано с влиянием крупной городской агломерации (Природные ..., 2002). Обычно лето жаркое и сухое, а зима относительно теплая с неустойчивым характером, малоснежная.

Под аридизацией климата обычно понимается комплекс процессов уменьшения степени увлажненности территории: сокращение количества атмосферных осадков, рост температуры воздуха, учащение таких явлений, как засухи, суховеи, пыльные бури. В регионе среднее за год число суховейных дней колеблется от 45 на юго-западе до 85 на юго-востоке Ростов-

ской области (Ионова и др., 2019), количество пыльных бурь от 1–2 до 8 в год в основном на юго-востоке (Парфенова, Кулыгин, 2023). Отмечается учащение и усиление интенсивности засух на юге ЕТР в современный период (Золотокрылин и др., 2020а, 2020б; Третий ..., 2022).

Рост среднесезонных температур, а также числа экстремально жарких дней на юге ЕТР с одновременным убыванием количества осадков значительно усиливают риски засух (Третий ..., 2022). Повторяемость атмосферных засух за 1984–2018 гг. в Ростовской области варьируется от 20 до 35% (Национальный доклад ..., 2021). В летний период на фоне быстрого роста средних температур вследствие роста испаряемости уменьшается влажность почвы, что приводит к увеличению иссушения территории и аридности климата. По расчетам, представленным в статье (Безуглова и др., 2022), засушливость возросла во всех районах Ростовской области, что свидетельствует об общей тенденции к нарастанию аридности климата. В работах (Золотокрылин и др., 2020а, 2022) установлено, что за временной интервал времени более века процесс аридизации на юге ЕТР имеет циклический характер при отсутствии значимых трендов, при этом существуют внутривековые периоды усиления и ослабления аридизации, которые характеризуются изменением частоты и интенсивности весенне-летних засух.

Продолжительные периоды с аномально высокими температурами и отсутствием осадков связаны с блокирующими антициклонами над ЕТР в весенне-летний период (Семенова, 2013; Черенкова, 2023). Так, в 2010 г. при подобной синоптической ситуации на многих метеостанциях Ростовской области летом наблюдались положительные аномалии температуры выше 95%-процентиля (Доклад об особенностях климата ..., 2011). В качестве возможных причин обозначенных изменений указывается перестройка атмосферной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе под действием долгопериодных изменений температуры поверхностного слоя Северной Атлантики (Черенкова, 2017; Черенкова, 2023), и даже замедление скорости вращения Земли (Сидоренков, Орлов, 2008).

Увеличение засушливости климата региона в восточном направлении связано с усилением континентальности и влиянием полупустынных и пустынных районов Средней Азии. Необходимо отметить, что значительную часть года территория Ростовской области находится под преимущественным влиянием континентальных воздушных масс, повторяемость которых достигает 54% (Борисов, 1959).

Главными негативными последствиями аридизации климата является усиление деградации земель через сокращение продуктивных водных ресурсов, снижение почвенного потенциала, продуктивности растительных сообществ и биологического разнообразия, а также снижение урожайности сельскохозяйственных культур и нарушение устойчивого землепользования (Национальный ..., 2021).

Для изучения уровня аридизации используются различные методы и индексы, такие как коэффициент увлажнения Н.Н. Иванова (КУ), индекс аридности (Aridity Index, AI), гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК), стандартизированный индекс осадков (Standardized Precipitation Index, SPI), индекс аридности де Мартона, индекс суровости засухи Палмера (Palmer Drought Severity Index, PDSI) и пр. Одновременное рассмотрение нескольких индексов позволяет исследовать тенденции аридизации под разными углами (Luković et al., 2024; Ullah et al., 2022).

Цель настоящего исследования — дать для бассейна Нижнего Дона оценку изменений интенсивности аридизации и континентальности климата за более чем 60-летний период, выявить региональные особенности на общем фоне климатической изменчивости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Источниками многолетних рядов метеоинформации стали данные 8-ми метеостанций (Богородицкое-Фенино, Валуйки, Харьков, Чертково, Цимлянск, Ростов-на-Дону, Гигант, Ремонтное) (рис. 1) из архивов ВНИИГМИ-МЦД за период 1961–2024 гг.¹ В расчетах использовались ряды среднемесячных значений температуры воздуха, относительной влажности, суммарные значения осадков.

Аридизация климата Нижнего Дона рассматривалась нами на основе оценки атмосферного увлажнения территории с использованием нескольких показателей. Во-первых, согласно эталонному показателю КУ Н.Н. Иванова, исторически применяемому для определения границ зон увлажнения (Иванов, 1941), во-вторых — широко используемому в отечественной практике гидротермическому коэффициенту Г.Т. Селянинова (ГТК) (Селянинов, 1928), и в-третьих, согласно индексу континентальности климата ($K_{\text{кр}}$) по С.П. Хромову (1983). Такой подход позволил рассмотреть наблюдающийся процесс аридизации бассейна Нижнего Дона с разных сторон и получить интегральную оценку климатических изменений в регионе.

¹ <http://meteo.ru/data> (дата обращения 21.05.2025).



Рис. 1. Бассейн Нижнего Дона с использованными метеостанциями (треугольники — станции, расположенные внутри бассейна, кружки — метеостанции, дополнительно использованные при построении картосхем).

Коэффициент увлажнения КУ (Иванов, 1941) определяется как:

$$КУ = P/E_0, \quad (1)$$

где P — величина осадков за год (месяц) (мм); E_0 — суммарная годовая испаряемость (мм).

Испаряемость за месяц рассчитывается по формуле (Иванов, 1954):

$$E_0 = 0.0018(25 + T)^2(100 - a), \quad (2)$$

где T — среднемесячная температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); a — среднемесячная относительная влажность (%). Этот метод Н.Н. Иванова был отнесен к наиболее надежным по результатам сравнения различных методов расчета испаряемости на юге Русской равнины (Черенкова, Шумова, 2007). Для МС Харьков из-за отсутствия информации об относительной влажности воздуха испаряемость и КУ не рассчитывались.

ГТК Селянинова, характеризующий увлажненность территории, определяется для вегетационного периода:

$$\text{ГТК} = 10 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (3)$$

где R_i — сумма осадков за i сутки; t_i — средне-суточная температура в i сутки; n — число дней в периоде с температурами выше 10°C .

Известно более десяти вариантов вычисления индекса континентальности (Котляров, 2024). В данной работе расчет проводился по формуле С.П. Хромова (1983), показывающей, какая доля годовой амплитуды температуры создается за счет влияния на нее континентов, так как годовая амплитуда температур является основным показателем континентальности климата.

$$K_{\text{хр}} = (A - 5.4 \sin \varphi) / A, \quad (4)$$

где A — годовая амплитуда температуры (разность средних месячных температур самого теплого и самого холодного месяцев); φ — географическая широта места.

Градации индексов, которые использовались в настоящей работе, представлены в табл. 1. Для $K_{\text{хр}}$, значения которого изменяются в сравнительно узком диапазоне, отсутствуют принятые градации. В связи с этим для того, чтобы показать пространственные различия и тенденции его динамики, градации выделялись на основе среднееголетнего среднего значения и стандартного отклонения индекса $K_{\text{хр}}$. Выделялось четыре диапазона, границы которых выбирались равными среднему значению, среднему значению $\pm$ одно стандартное отклонение, среднему значению $\pm$ три стандартных отклонения.

В качестве меры интенсивности изменений рассматриваемых характеристик использовался коэффициент линейного тренда, его значимость определялась при помощи t -критерия Стьюдента с уровнем значимости 5%.

Для пространственного анализа климатических изменений были построены картосхемы распределения индексов. Сеточные области с размером ячеек 10×10 км, отражающие средние значения величин, строились с использованием геостатистической интерполяции методом обычного кригинга (ordinary kriging) для каждого года за рассматриваемый отрезок времени. Помимо данных МС на территории бассейна, при построении картосхем также использовались МС, лежащие в непосредственной близости от границ региона (до 100 км): Курск, Воронеж, Готня, Урюпинск, Волгоград, Таганрог, Элиста, Армавир, Ставрополь, Буденновск, Минеральные Воды (см. рис. 1).

Годовые сеточные области рассматриваемых индексов осреднялись по пространству в пределах границ бассейна Нижнего Дона. С целью выделения переломных моментов в динамике средних по бассейну индексов по полученным

Таблица 1. Градации используемых индексов

КУ (Иванов, 1941)		ГТК (Селянинов, 1928)		К _{хр} , принятые авторами градации
Градации	Название зоны	Градации	Название зоны	Градации
[0.00; 0.13)	ничтожного увлажнения	[0.0; 0.4)	сухая	[0.83; 0.85)
[0.13; 0.30)	скудного увлажнения	[0.4; 0.7)	очень засушливая	[0.85; 0.86)
[0.30; 0.60)	недостаточного увлажнения	[0.7; 1.0)	засушливая	[0.86; 0.87)
[0.60; 1.00)	умеренного увлажнения	[1.0; 1.3)	слабо засушливая	[0.87; 0.90)
[1.00; 1.50)	достаточного увлажнения	[1.3; 1.6)	влажная	

временным рядам строились разностные интегральные кривые — графики нарастания суммы отклонений ежегодных значений от среднего:

$$f(t) = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), \quad (5)$$

где $f(t)$ — значение разностной интегральной кривой в году t ; x_i — член временного ряда; $\bar{x}$ — среднее значение временного ряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На Нижнем Дону за период 1961–2024 гг. были выявлены статистически значимые изменения (табл. 2): положительные — для годовой приземной температуры воздуха и испаряемости, отрицательные — для относительной влажности воздуха. Для годовых сумм атмосферных осадков значимых трендов не отмечено на большинстве рассматриваемых МС. Полученный на Нижнем Дону тренд приземной температуры воздуха $+0.4^\circ\text{C}/10$ лет немного выше тренда для Ростовской области $+0.3^\circ\text{C}/10$ лет в работах (Дрововозова, Кириленко, 2021) за 1900–2020 гг. и (Гудко и др., 2021) за 1960–2019 гг.

Основным фактором роста приземной температуры воздуха многие исследователи считают изменения в циркуляционных условиях, в том числе увеличение частоты установления блокирующих антициклонов в весенне-летний период после 1988 г. (Кононова, 2015; Семенова, 2013; Черенкова, 2023). Тенденция увеличения годовых значений температуры воздуха в регионе наблюдается с конца 1990-х годов, а значимые измерения испаряемости и относительной влажности с 2007 г. Таким образом, рост температуры воздуха при отсутствии значимой динамики атмосферных осадков способствует усилению аридизации климата региона, и проявляется в уменьшении относительной влажности и росте испаряемости, для которых тренды значимы на всех МС (см. табл. 2).

Также подтверждением иссушения климата выступают отрицательные тенденции в динамике числа дней с осадками и снежным покровом на всех МС региона, хотя здесь коэффициенты в основном статистически не значимы, что говорит о больших колебаниях в системе распределения атмосферных осадков. При этом наблюдаются изменения во внутригодовом распределении осадков (несущественный рост весной и снижение летом) и в характере их выпадения (увеличение доли ливневых осадков). Растет средняя продолжительность периодов без осадков и число дней с низкой относительной влажностью.

Анализ динамики КУ и ГТК за 1961–2024 гг. показывает слабую, статистически не значимую тенденцию к снижению значений (в среднем $-0.01/10$ лет) на всех МС Нижнего Дона. При этом следует отметить, что на отрезке 1990–2020 гг. КУ показывает не большие, но значимые отрицательные тренды ($-0.1/10$ лет) на большинстве МС бассейна, а по ГТК тренд значим для МС Валуйки и МС Гигант. Связь между КУ и ГТК высокая на всех станциях ($R^2 = 0.68...0.81$). Индекс континентальности ($K_{хр}$) на данном промежутке времени на всех МС проявляет очень слабую и статистически незначимую отрицательную тенденцию ($-0.001/10$ лет). Безусловно, снижение значений КУ и ГТК в современный период связано с ростом температур и испаряемости, а также уменьшением выпадения осадков летом, а снижение $K_{хр}$ — с теплыми зимами, преобладающими в последнее десятилетие. Статистически значимой связи между $K_{хр}$ и динамикой КУ и ГТК нет.

Высокая дисперсия, незначительно изменяющаяся во времени, свойственная годовым временным рядам КУ, ГТК, и $K_{хр}$, не позволила выделить периоды с разным режимом этих индексов. В связи с этим для характеристики многолетних тенденций рассматривались ряды 5-летних скользящих средних (рис. 2).

Таблица 2. Коэффициенты линейных трендов годовых значений основных метеопараметров в бассейне Нижнего Дона за 1961–2024 гг.

Станция	Температура воздуха, °C/10 лет			Относительная влажность, %/10 лет			Атмосферные осадки, мм/10 лет			Испаряемость, мм/10 лет		
	1961–1990	1991–2020	1961–2024	1961–1990	1991–2020	1961–2024	1961–1990	1991–2020	1961–2024	1961–1990	1991–2020	1961–2024
Богородицкое-Фенино	0.00	0.76	0.42	–0.24	–1.11	–0.70	46.78	14.93	11.91	–37.06	60.04	22.39
Харьков	–0.03	0.87	0.45				16.51	4.63	2.09			
Валуйки	–0.02	0.88	0.44	–0.14	–1.85	–0.65	41.42	–18.73	8.87	–41.73	93.85	29.87
Чертково	–0.01	0.73	0.41	–0.71	–2.48	–0.93	24.52	–17.45	11.45	–24.78	125.13	36.57
Цимлянск	–0.03	0.81	0.42	0.13	–1.59	–0.70	27.65	4.68	7.93	–37.04	104.05	39.06
Ростов-на-Дону	–0.17	0.82	0.31	1.06	–2.31	–0.74	–3.10	–22.66	5.93	–74.80	146.62	50.24
Гигант	–0.16	0.75	0.36	0.39	–1.74	–0.50	42.35	–47.82	5.55	–64.98	125.29	35.44
Ремонтное	–0.03	0.64	0.36	0.10	–2.39	–0.42	37.94	–7.57	8.34	–46.12	141.64	31.31

Примечание: жирным выделены статистически значимые коэффициенты (уровень значимости 5%).

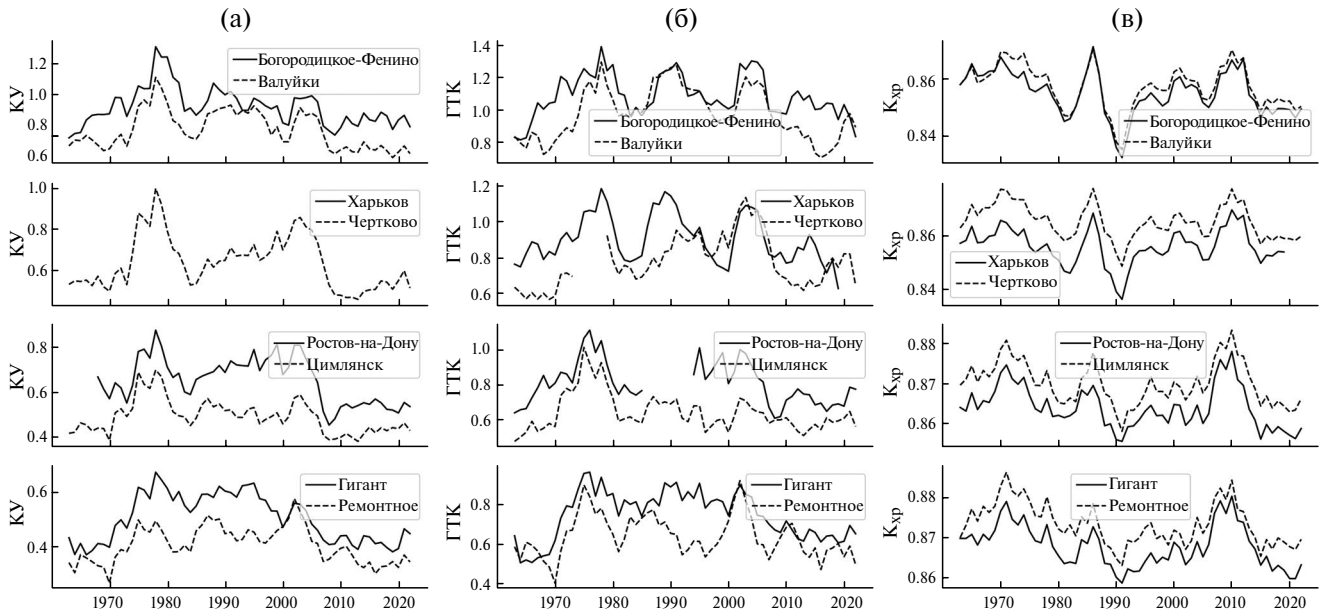


Рис. 2. Динамика 5-летних скользящих средних значений КУ (а), ГТК (б) и $K_{хр}$ (в) по метеостанциям Нижнего Дона.

Согласно графикам (см. рис. 2а, б), на большинстве МС отмечен рост КУ и ГТК до конца 1970-х–начала 1980-х годов, сменившийся непродолжительным снижением и вновь ростом до начала 2000-х годов. После чего до начала 2010-х годов на всех МС наблюдается падение значений, и далее эта тенденция снижения с небольшими колебаниями сохраняется до настоящего времени. Таким образом, за 1961–2024 гг. можно выделить 5 периодов: засушливый–влажный–засушливый–влажный–засушливый, причем последний длится уже более 15 лет. На-

блюдающийся сегодня период аридизации по значениям примерно соответствует 1960-м годам. Отмеченные тенденции более выражены на северных МС рассматриваемого региона, что согласуются с работами (Гудко и др., 2021, 2023; Золотокрылин и др., 2020б, 2022).

Аналогичная процедура анализа была проведена для $K_{хр}$ (см. рис. 2в). После периода высокого уровня континентальности климата в 1960–1970-х годах наблюдается его снижение (максимальное значение индекса — в 1972 г. на всех МС). Минимальный уровень $K_{хр}$ от-

мечен в 1989–1990 гг. на севере бассейна, а в центре и на юге — в 2004 г. (эти годы характеризовались холодным летом и теплой зимой). После чего $K_{хр}$ вновь рос до начала 2010-х годов. В континентальном климате умеренных и высоких широт большая амплитуда обуславливается не столько повышенной летней, сколько пониженной зимней температурой (Хромов, 1983). В настоящее время, после 2012 г. (последней суровой зимы за 2010–2025 гг.) преобладают теплые зимы, соответственно наблюдается снижение $K_{хр}$.

Отмеченная выше динамика рассматриваемых индексов нашла отражение в их пространственном распределении. Для каждого года были построены картосхемы распределения КУ, ГТК и $K_{хр}$. Динамика долей площади бассейна, занимаемых разными градациями индексов, представлена на рис. 3. Здесь хорошо видна высокая межгодовая изменчивость условий увлажнения Нижнего Дона: как чередование очень сухих и влажных лет (1961 и 1962, 1986 и 1987, 2023 и 2024 гг. и др.), так и установление непродолжительных периодов со схожими условиями увлажнения.

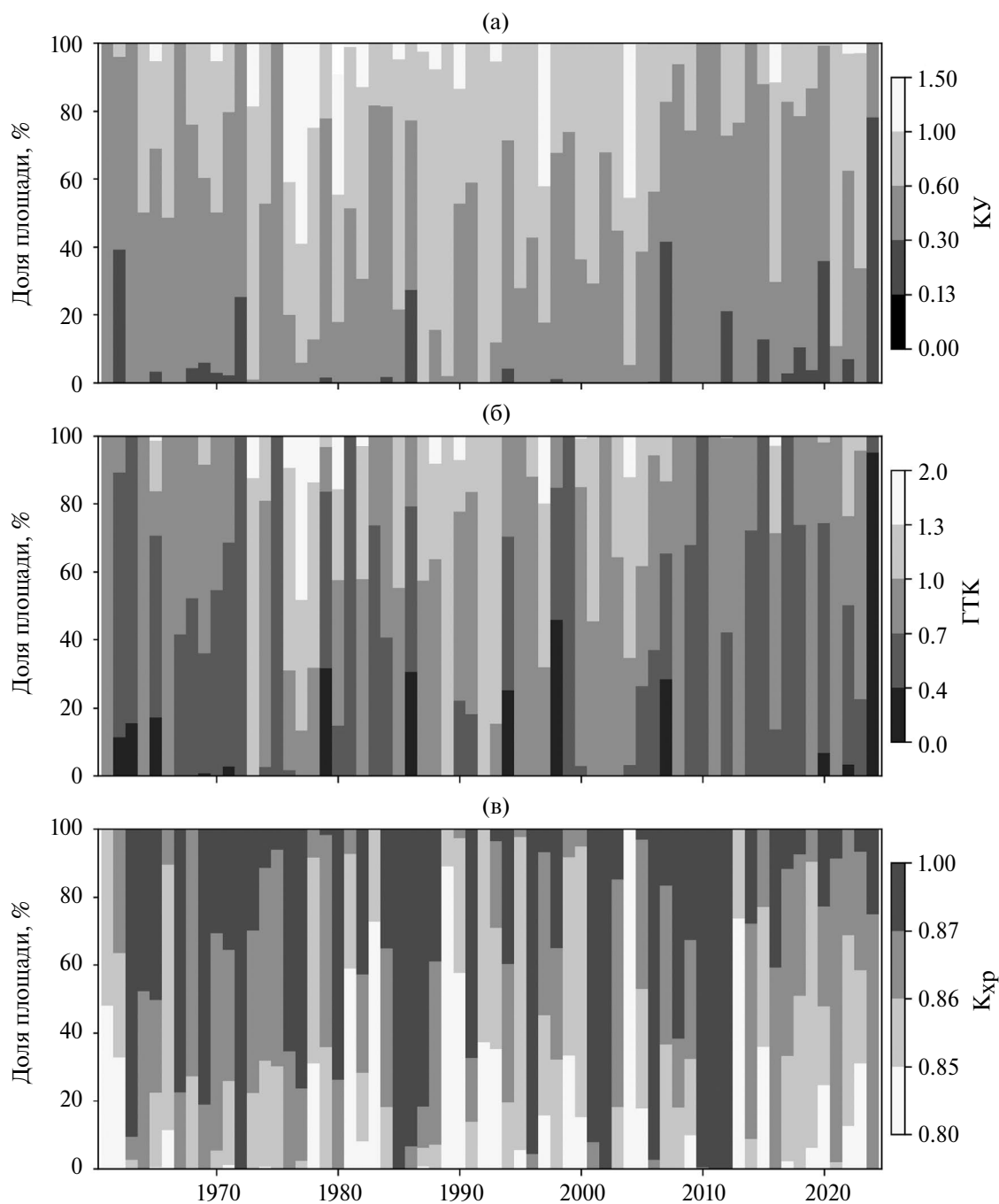


Рис. 3. Доли площади бассейна Нижнего Дона, занимаемые разными градациями КУ (а), ГТК (б) и $K_{хр}$ (в) за 1961–2024 гг.

Рассмотрим подробнее картосхемы среднего распределения КУ, ГТК и $K_{хр}$ за два базисных 30-летних периода, выделяемых ВМО (1961–1990 и 1991–2020 гг.)², а также один из самых засушливых — 2024 г. (рис. 4).

На картосхемах распределения КУ (см. рис. 4а, б, в) можно наблюдать смещение границ зон недостаточного и умеренного увлажнения на северо-запад бассейна в современный пе-

риод. Изменение доли площади КУ от первого ко второму периоду составило: для области недостаточного увлажнения +5.5% (до 56.1%), умеренного –1.6% (до 36.0%), достаточного –4.2% (до 3.5%). В засушливый 2024 г. большая часть Нижнего Дона оказалась в зоне скудного увлажнения (78.0%). Это единственный случай за рассматриваемый временной промежуток, когда область скудного увлажнения превышала на Нижнем Дону половину территории, до этого максимальные ее площади отмечались в 2007 г. (41.5%), 1962 г. (39.2%) и 2020 г. (35.7%). В семи

² Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм (ВМО-№ 1203). Женева: ВМО, 2017. 32 с.

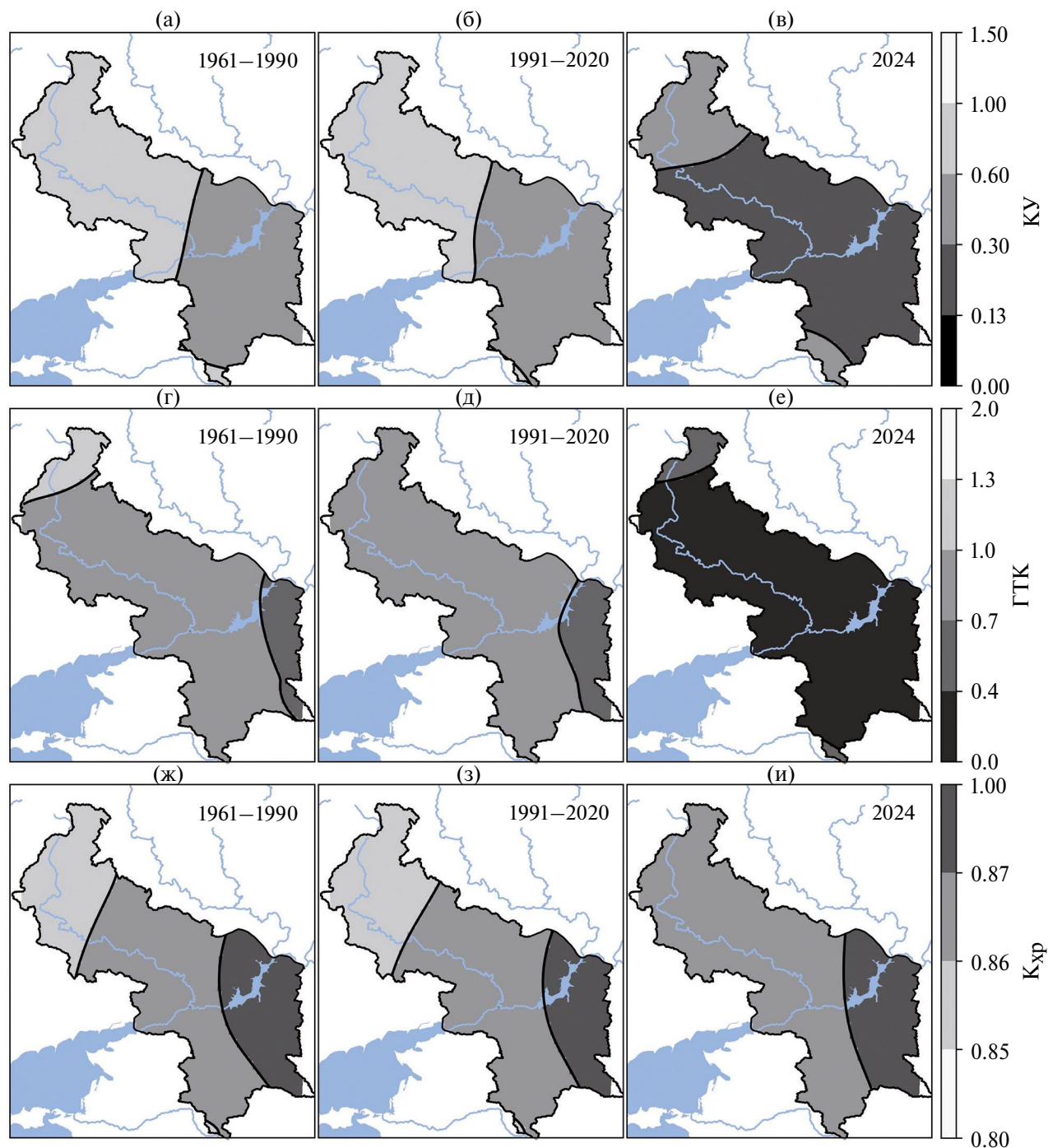


Рис. 4. Распределение КУ (а, б, в), ГТК (г, д, е) и $K_{хр}$ (ж, з, и) в бассейне Нижнего Дона.

случаях вся территория бассейна оказывалась в зоне недостаточного увлажнения: в 1961, 1963, 1967, 1975, 2010, 2011, 2014 гг. Однако были годы, когда увлажненность Нижнего Дона соответствовала гумидным условиям: так более половины территории находилось в зоне достаточного увлажнения в 1977 г. (59.1%), более трети: в 2004 г. (45.5%), 1997 г. (42.2%), 1976 г. (41.0%), 1980 (35.3%). При этом в 1980 г. на Нижнем Дону была отмечена зона избыточного увлажнения (9.2%) — единственный случай за рассматриваемый временной промежуток.

Среднегодовое распределение ГТК показано на рис. 4 (г, д, е). Здесь картина территориальных изменений между 30-летними периодами несколько иная: можно наблюдать расширение очень засушливой зоны +3.4% (до 13.7%) и засушливой +2.8% (до 86.3%), при этом слабо засушливая зона в современное время исчезает с картосхемы.

Отдельного внимания заслуживает 2024 г., так как он был одним из самых сухих за рассматриваемый период: практически всю территорию бассейна заняла сухая зона (95%), отмечены минимальные значения ГТК и КУ на севере региона. Согласно проведенному ранжированию индексов ГТК и КУ за 1961–2024 гг., на МС Богородицкое-Фенино, Валуйки, Харьков, Чертков с сортировкой значений индексов по убыванию (по степени засушливости условий), 2024 г. имел ранг 1, а на остальных МС бассейна ранг этого года идентифицирован в диапазоне 4–5.

Однако следует отметить, что, несмотря на высокую степень связи между КУ и ГТК, пространственное распределение увлажнения территории по этим индексам соответствует не всегда, и также можно видеть, что некоторые годы, которые относятся к экстремальным по одному из рассматриваемых индексов, по-другому — экстремальными не являются (см. рис. 3а, б). Не всегда точное соответствие уровня значений индексов КУ и ГТК, связано с характером условий вне вегетационного периода в эти годы. Поскольку при расчете ГТК, используются данные только за вегетационный период, то в случаях более влажного “холодного” периода года (при прочих равных условиях) КУ будет иметь более высокое значение, т.е. определять ситуацию как менее засушливую по сравнению со значением ГТК.

Выявлены следующие особенности в межгодовом распределении зон увлажнения по ГТК: максимальная площадь сухой зоны была отмечена в 2024 г. (95% бассейна), однако в остальные годы она не превышала 45.8% (1998 г.). Полностью в пределах сухой и очень засушливой зон рассматриваемая территория была в 1963, 1972, 1975, 1981, 1999, 2010, 2015, 2017 и 2024 гг.

Полное покрытие территории засушливой зоной отмечено в 1961, 1964, 1966, 1995, 2002, 2008, 2011, 2013, 2019, 2021 гг. Гумидными условиями увлажнения отличались 1977 г. (влажная зона 48.3% — максимум), а также 1973, 1989, 1992, 1993 гг.

На рис. 4 (ж, з, и) можно видеть, что изолинии K_{xp} проходят почти вертикально, и ими можно разделить бассейн на 3 зоны со значениями K_{xp} в интервалах 0.85–0.86, 0.86–0.87 и 0.87–0.90. Следует отметить, что величина K_{xp} от первого периода ко второму в территориальном плане изменилась не сильно: наблюдается снижение доли площади с наиболее континентальным климатом ($K_{xp} \geq 0.87$) — 5.2% (до 20.8%), и рост +2.4 и +2.9% зон с менее континентальным климатом соответственно. В 2024 г. регион был поделен между зонами со значениями K_{xp} в интервалах 0.86–0.87 (74.8%) и 0.87–0.90 (25.2%).

Континентальность климата это, в первую очередь, функция амплитуды температур, что находит отражение в пространственном распределении индекса. По среднесезонной температуре за 1961–2024 гг. наиболее холодные зимы на территории бассейна отмечались на севере — в 1985 г., центре — в 1969 г., а на юго-востоке (МС Ремонтное) — в 1972 г. Самая теплая зима была в 2020 г. почти на всех МС, исключением стал юго-запад региона (МС Ростов-на-Дону, МС Гигант) здесь — 1966 г. Самое холодное лето отмечено на севере региона в 1976 г., а в центре и на юге — в 1978 г., исключение МС Гигант — 1982 г. Самое жаркое лето на всех МС региона отмечено в 2010 г. Соответственно за 1961–2024 гг. зона наиболее континентального климата со значениями K_{xp} в интервале 0.87–0.90 полностью охватывала регион в 1972, 1985, 2002, 2010, 2011 и 2012 гг., а зона с наименьшими значениями индекса ($K_{xp} < 0.85$) превалировала в регионе в 2004 г. (100%), 1989 г. (88.9%), 2013 г. (73.6%), 1983 г. (72.7%) (см. рис. 3в).

Следует учитывать, что оценка площадей занимаемых различными грациями индексов, выполнялась по картосхемам, полученным в результате интерполяции данных метеостанций методом кригинга. Использование других методов интерполяции может привести к изменению расчетных долей площадей и получаемых результатов.

На рис. 5 представлены разностные интегральные кривые многолетних изменений средних по бассейну Нижнего Дона значений КУ, ГТК и K_{xp} . Для КУ и ГТК можно видеть почти монотонный рост с 1972 по 2005 г. и далее их падение по настоящее время. Согласно графику, можно предположить продолжение снижения значений данных индексов в ближайшие годы.

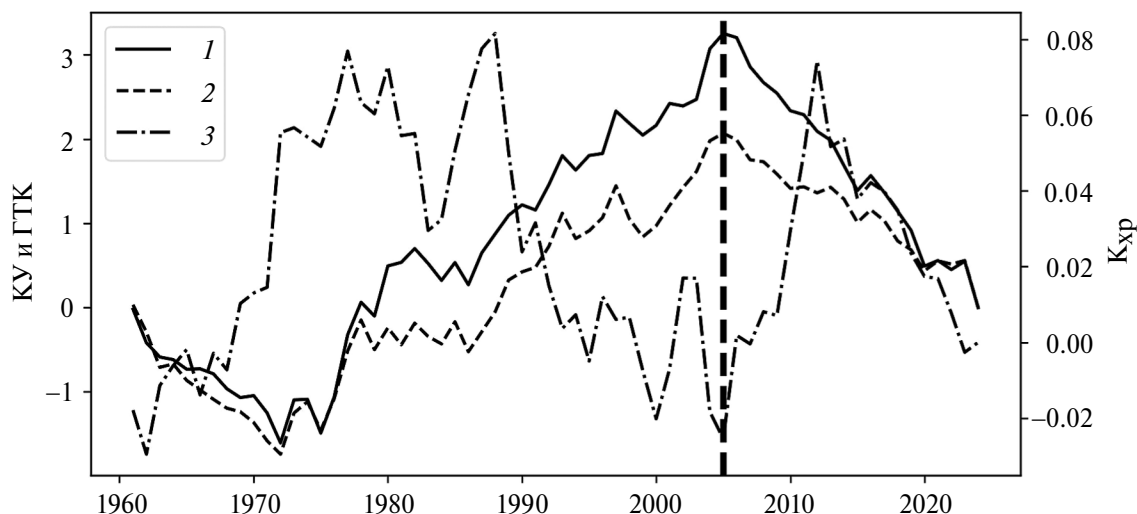


Рис. 5. Разностные интегральные кривые КУ (1), GTK (2) и K_{xp} (3) для бассейна Нижнего Дона за 1961–2024 гг.

Динамика K_{xp} находится почти в противофазе КУ и GTK (см. рис. 5). В современный период минимум значений K_{xp} пришелся также на 2005 г. после чего отмечался рост континентальности климата до 2012 г. (последняя суровая зима) с последующим падением по настоящее время. Для динамики индекса континентальности просматривается больший размах колебаний и более короткий цикл, нежели для режима увлажнения бассейна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На Нижнем Дону за период 1961–2024 гг. были выявлены статистически значимые изменения на всех МС: положительные — для годовой приземной температуры воздуха ($+0.4^{\circ}\text{C}/10$ лет) и испаряемости ($+35$ мм/10 лет), отрицательная — для относительной влажности воздуха ($-0.7\%/10$ лет). Для годовых сумм атмосферных осадков значимых трендов не выявлено на большинстве рассматриваемых МС. Следует отметить значительные изменения между базисными 30-летними периодами для температуры воздуха и испаряемости на всех МС, что в период 1991–2020 гг. дает не большие, но значимые отрицательные тренды по КУ ($-0.1/10$ лет) на большинстве станций бассейна. Показаны особенности в межгодовом распределении зон увлажнения по КУ и GTK. Выявлено увеличение площадей засушливых зон в современный период на 6–8% относительно 1961–1990 гг. Отмечено, что несмотря на высокую степень связи между КУ и GTK, пространственное распределение увлажненности территории по этим индексам соответствует не всегда, что возможно связано с характером условий вне вегетационного периода в эти годы. Выявлено некоторое снижение континентальности климата на юго-востоке

региона, связанное с преобладанием теплых зим в последние годы.

Согласно разностным интегральным кривым средних по бассейну Нижнего Дона значений индексов КУ и GTK можно выделить периоды роста увлаженности (1972–2005 гг.) и роста засушливости территории (1961–1971 гг., 2006–2024 гг.), а также можно предположить продолжение снижения значений данных индексов в ближайшие годы.

В настоящее время регион Нижнего Дона находится в засушливом периоде, с выраженным маловодьем на Дону (Матишов и др., 2021). Установление продолжительного аридного периода бросает вызов сельскому хозяйству, особенно учитывая значимость региона в обеспечении продовольственной безопасности России, в очередной раз подчеркивая, что Нижний Дон — зона рискованного земледелия, нуждающаяся в повышении эффективности использования водных и земельных ресурсов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № гр. проекта ГЗ 125011200143-4.

FUNDING

The study was conducted within the framework of state assignment of SSC RAS, project no. 125011200143-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Безуглова О.С., Ильинская И.Н., Закруткин В.Е., Назаренко О.Г., Литвинов Ю.А., Гаевая Э.А., Меженкова А.А., Жумбей А.И. Динамика деградации

- земель в Ростовской области // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 1. С. 41–54.
<https://doi.org/10.31857/S2587556622010034>
- Борисов А.А. Климаты СССР. М.: Изд. Мин. просвещения, 1959. 275 с.
- Гудко В.Н., Усатов А.В., Азарин К.В. Анализ гидротермических условий в Ростовской области за период 1960–2019 гг. // Аридные экосистемы. 2021. Т. 27. № 4 (89). С. 25–31.
- Гудко В.Н., Усатов А.В., Азарин К.В. Сезонная и годовая динамика гидротермических условий в восточной природно-сельскохозяйственной зоне Ростовской области в 1961–2020 гг. // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29. № 2 (95). С. 29–35.
<https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-2-29-35>
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2011 год. М.: Росгидромет, 2012. 83 с.
- Дровозовова 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., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. Характеристики весенне-летних засух в сухие и влажные периоды на юге Европейской России // Аридные экосистемы. 2020а. Т. 26. № 4 (85). С. 76–83.
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Изв. РАН. Сер. геогр. 2020б. № 2. С. 207–217.
<https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Роль весенне-летних засух в динамике аридизации засушливых земель Европейской территории России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 1. С. 98–108.
<https://doi.org/10.31857/S2587556622010137>
- Иванов Н.Н. Зоны увлажнения земного шара // Изв. АН СССР. Сер. География и геофизика. 1941. № 3. С. 261–288.
- Иванов Н.Н. Об определении величин испаряемости // Изв. ВГО. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.
- Ионова Е.В., Лиховидова В.А., Лобунская И.А. Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности (обзор литературы) // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6 (66). С. 18–22.
<https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-66-6-18-22>
- Кононова Н.К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2015. Т. 1. С. 133–162.
- Котляров Д.А. Анализ индекса континентальности климата на территории Северо-Востока России // Вестн. Балтийского фед. ун-та им. И. Канта. Сер. Естественные и медицинские науки. 2024. № 1. С. 92–103.
<https://doi.org/10.5922/gikbfu-2024-1-6>
- Матишов Г.Г., Дашкевич Л.В., Кириллова Е.Э. Цикличность климата в Приазовье: голоцен и современный период (XIX–XXI вв.) // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 498. № 5. С. 96–100.
<https://doi.org/10.31857/S2686739721050091>
- Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)”. М.: ООО “Изд. МБА”, 2021. Т. 3. 700 с.
- Парфенова А.В., Кулыгин В.В. Динамика пыльных бурь в бассейне Нижнего Дона // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2023. Т. 1. № 8. С. 103–109.
<https://doi.org/10.23885/2500-395X-2023-1-8-103-109>
- Природные условия и естественные ресурсы Ростовской области. Ростов-на-Дону, 2002. 432 с.
- Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Тр. по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. Вып. 20. С. 165–177.
- Семенова И.Г. Роль процессов блокирования в формировании засух на Украине // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2013. № 569. С. 124–136.
- Сидоренков Н.С., Орлов И.А. Атмосферные циркуляционные эпохи и изменения климата // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 22–29.
- Третий оценочный докл. об изменениях климата и их последствиях на территории РФ / ред. В.М. Катцов. Росгидромет. СПб.: Научно-технологические, 2022. 676 с.
- Хромов С.П. Метеорология и климатология для географических факультетов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 456 с.
- Черенкова Е.А. Роль изменений атмосферной циркуляции в увеличении повторяемости летних засух на европейской части России // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 43–60.
<https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-43-60>
- Черенкова Е.А. Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 5. С. 72–81.
<https://doi.org/10.7868/S0373244417050061>
- Черенкова Е.А., Шумова Н.А. Испаряемость в количественных показателях климата // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13. № 33–34. С. 55–67.

Luković J., Burić D., Mihajlović J., Pejović M. Spatial and temporal variations of aridity-humidity indices in Montenegro // *Theor. Appl. Climatol.* 2024. Vol. 155. P. 4553–4566.
<https://doi.org/10.1007/s00704-024-04893-y>

Ullah S., You Q., Sachindra D.A., Nowosad M., Ullah W., Bhatti A.S., Jin Z., Ali A. Spatiotemporal changes in global aridity in terms of multiple aridity indices: An assessment based on the CRU data // *Atmos. Res.* 2022. Vol. 268. Art. 105998.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105998>

Contemporary Climate Aridization of the Lower Don Basin

V. V. Kulygin^{a,*}, L. V. Dashkevich^a, and A. V. Parfenova^a

^a*Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences (SSC RAS), Rostov-on-Don, Russia*

*e-mail: kulygin@ssc-ras.ru

The article provides an assessment of changes in the aridization and continentality of the climate in the Lower Don basin over a period of more than 60 years. Three indices were considered: Ivanov moisture coefficient, the hydrothermal coefficient of G.T. Selyaninov, the index of climate continentality according to S.P. Khromov, the calculation of which was performed for meteorological stations in the region. The trends of annual surface air temperature, relative humidity, evaporation and annual precipitation were obtained for the basic climatic periods of 1961–1990, 1991–2020 and for 1961–2024. A slight decrease in the continentality of the climate in the southeast of the region was revealed. The dynamics of the dry/wet zones area distribution was estimated by the moisture and hydrothermal coefficients for the periods under consideration. Peculiarities in the interannual distribution of such zones were noted. An increase of the dry zones area in the modern period by 6–8% was revealed. An assessment is given for one of the driest years for the period under consideration (2024). Among other driest years, 1962, 2007 and 2020 were highlighted with significant areas of poor moisture zone; and 1998 with a large part of the dry zone according to the hydrothermal coefficient. The wettest years according to both indices were 1977, 1980, 1997. According to the difference integral curves of the moisture and the hydrothermal coefficients, the periods of increasing dryness and wetness in the region was identified. Currently, the Lower Don basin is in a dry period, while there is a decrease in the continentality of the climate, associated with the predominance of warm winters in recent years.

Keywords: Ivanov moisture coefficient, hydrothermal coefficient, index of continentality, Lower Don basin

REFERENCES

- Bezuglova O.S., Iliinskaya I.N., Zakrutkin V.E., Nazarenko O.G., Litvinov Yu.A., Gaevaya E.A., Mezhenkov A.A., Zhumbey A.I. Dynamics of land degradation in Rostov oblast. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2022, vol. 86, no. 1, pp. 41–54. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587556622010034>
- Borisov A.A. *Klimaty SSSR* [Climates of the USSR]. Moscow: Izd-vo Min. prosveshcheniya, 1959. 275 p.
- Cherenkova E.A. Seasonal precipitation in the East European plain during the periods of warm and cool anomalies of the North Atlantic surface temperature. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2017, no. 5, pp. 72–81. (In Russ.).
<https://doi.org/10.7868/S0373244417050061>
- Cherenkova E.A. The role of atmospheric circulation changes in the increasing frequency of summer droughts in European Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, vol. 48, pp. 765–777.
<https://doi.org/10.3103/S1068373923090042>
- Cherenkova E.A., Shumova N.A. Evaporation in quantitative climate indicators. *Arid Ecosyst.*, 2007, vol. 13, no. 33–34, pp. 55–67. (In Russ.).
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2011 god* [Report on the Peculiarities of the Climate in the Russian Federation for 2011]. Moscow: Rosgidromet Publ., 2012. 83 p.
- Drovovozova T.I., Kirilenko A.A. Meteorological factors impact on the quality of natural water facilities on the territory of the Bagaevskaya irrigation system. *Ekol. Vodn. Khoz.*, 2021, vol. 3, no. 4, pp. 1–13. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31774/2658-7890-2021-3-4-1-13>
- Gudko V.N., Usatov A.V., Azarin K.V. Analysis of hydrothermal conditions in the Rostov region in the period 1960–2019. *Arid Ecosyst.*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 337–342.
<https://doi.org/10.1134/S2079096121040156>
- Gudko V.N., Usatov A.V., Azarin K.V. The seasonal and annual dynamics of hydrothermal conditions in the eastern natural and agricultural zone of the Rostov region in 1961–2020. *Arid Ecosyst.*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 148–153.
<https://doi.org/10.1134/S2079096123020075>

- Ionova E.V., Likhovidova V.A., Lobunskaya I.A. Drought and hydrothermal humidity factor as one of the criteria to estimate its intensity degree (literature review). *Zern. Khoz. Ross.*, 2019, no. 6, pp. 18–22. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31367/2079-8725-2019-66-6-18-22>
- Ivanov N.N. Humidity zones of the globe. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr. Geofiz.*, 1941, no. 3, pp. 261–288. (In Russ.).
- Ivanov N.N. Determination of the values of volatility. *Izv. VGO*, 1954, vol. 86, no. 2, pp. 189–196. (In Russ.).
- Khromov S.P. *Meteorologiya i klimatologiya dlya geograficheskikh fakul'tetov* [Meteorology and Climatology for Geographical Faculties]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1983. 456 p.
- Kononova N.K. Changes in the northern hemisphere atmospheric circulation in the 20th–21st centuries and their consequences for climate. *Fund. Priklad. Klimat.*, 2015, vol. 1, pp. 133–162. (In Russ.).
- Kotlyarov D.A. An analysis of climate continentality index for Russia's North-East. *Vestn. Balt. Fed. Univ. Kanta, Ser.: Yestestv. Nauki*, 2024, no. 1, pp. 92–103. (In Russ.).
<https://doi.org/10.5922/gikbfu-2024-1-6>
- Luković J., Burić D., Mihajlović J., Pejović M. Spatial and temporal variations of aridity-humidity indices in Montenegro. *Theor. Appl. Climatol.*, 2024, vol. 155, pp. 4553–4566.
<https://doi.org/10.1007/s00704-024-04893-y>
- Matishov G.G., Dashkevich L.V., Kirillova E.E. Cyclicity of climate in the sea of Azov region: the Holocene and the current period (19th to 21st centuries). *Dokl. Earth Sci.*, 2021, vol. 498, no. 1, pp. 436–440.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X21050093>
- Natsional'nyi doklad "Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnye meropriyatiya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo)". Tom 3 [National Report "Global Climate and Soil Cover of Russia: Drought Manifestations, Prevention, Control, Mitigation and Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)". Vol. 3]. Moscow: Izd-vo MBA, 2021. 700 p.
- Parfenova A.V., Kulygin V.V. Dynamics of dust storms in the Low Don basin. *Ekol. Ekon. Inform.: Sist. Analiz Model. Ekol. Econ. Sist.*, 2023, no. 8, pp. 103–109. (In Russ.).
- <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2023-1-8-103-109>
- Prirodnye usloviya i estestvennye resursy Rostovskoi oblasti* [Natural Conditions and Natural Resources of the Rostov Region]. Rostov-on-Don: Bataiskoe knizhnoe izd-vo, 2002. 432 p.
- Selyaninov G.T. On agricultural climate assessment. In *Trudy po sel'skokhozyaistvennoi meteorologii. Vyp. 20* [Works on Agricultural Meteorology. Vol. 20]. Leningrad: Inst. Opytnoi Agronomii, 1928, pp. 165–177. (In Russ.).
- Semenova I.G. A role of blocking processes in forming of droughts in Ukraine. *Tr. Glavn. Geofiz. Observ. Voeikova*, 2013, no. 569, pp. 124–136. (In Russ.).
- Sidorenkov N.S., Orlov I.A. Atmospheric circulation epochs and climate changes. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2008, vol. 33, no. 9, pp. 553–559.
<https://doi.org/10.3103/S1068373908090021>
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Third Assessment Report on Climate Changes and Their Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Kattsov V.M., Ed. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022. 676 p.
- Ullah S., You Q., Sachindra D.A., Nowosad M., Ullah W., Bhatti A.S., Jin Z., Ali A. Spatiotemporal changes in global aridity in terms of multiple aridity indices: An assessment based on the CRU data. *Atmos. Res.*, 2022, vol. 268, art. 105998.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105998>
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: secular trends and links to droughts. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020a, no. 2, pp. 207–217. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Characteristics of spring–summer drought in dry and wet periods in the south of European Russia. *Arid Ecosyst.*, 2020b, vol. 10, no. 4, pp. 322–328.
<https://doi.org/10.1134/S2079096120040216>
- Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Role of spring–summer drought in the dynamics of aridization of arid lands in European Russia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2022, vol. 86, no. 1, pp. 98–108. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2587556622010137>