ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2020, том 494, № 1, с. 91–96

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ

УДК 551+556

ОЦЕНКА ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАСУШЛИВОСТИ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЮЖНОГО УРАЛА В ПЕРИОД 1960–2019 гг. С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ

© 2020 г. Д. Ю. Васильев[1,2,*], В. В. Водопьянов[1],
член-корреспондент РАН В. А. Семенов[2,3], академик РАН А. А. Чибилев[4]

Поступило 01.07.2020 г.
После доработки 03.07.2020 г.
Принято к публикации 03.07.2020 г.

Выполнен статистический анализ экстремальных эпизодов засушливости и увлажненности для территории Южного Урала. Базой для расчетов послужили данные среднесуточной температуры воздуха и суточных сумм атмосферных осадков по 11 станциям за период 1960–2019 гг. На основе станционных наблюдений и вычисленных количественных показателей были исследованы пространственно-временные характеристики летних засух. Установлено, что за последние 19 лет частота проявления засух на территории Южного Урала увеличивается, при этом максимальное распространение явления происходит в июле месяце.

Ключевые слова: атмосферные осадки, температура воздуха, экстремальная засуха, экстремальная увлажненность, климатическая изменчивость

DOI: 10.31857/S2686739720090212

Глобальные климатические изменения за последние несколько десятилетий привели к дисбалансу гидротермических условий в природных экосистемах во многих регионах Земли. Как следствие такого дисбаланса засухи [1], вызванные недостатком влаги, становятся все более частыми [2]. С увеличением интенсивности, частоты и продолжительности засух такая тенденция стала одной из самых серьезных проблем для многих стран мира [3–5]. Согласно официальной статистке Всемирной метеорологической организации (https://public.wmo.int/ru), гидрометеорологические катастрофы составляют 70% всех стихийных бедствий, при этом на засухи приходится половина всех этих бедствий. Рост числа и продолжительности засух приводит к существенному изменению в пространственно-временном распределении увлажненности территорий. Целью настоящего исследования является изучение пространственно-временных тенденций изменения засушливости на примере Южного Урала.

При анализе пространственно-временной специфики засух/увлажненности может использоваться большое количество показателей, которые обычно делятся на две группы: однофакторные и многофакторные. Первые характеризуют динамику засух на основе одного основного фактора, который, как правило, является атмосферными осадками, а вторые учитывают большее количество физических параметров, когда помимо атмосферных осадков также учитываются данные по испарению, температуры воздуха, влажности почвы и т.д.

В гидрометеорологической практике наиболее часто используются следующие индексы засушливости, индекс атмосферной засушливости или индекс Педя S [6], представляющий собой разность стандартизированных значений аномалий температуры воздуха t и атмосферных осадков P:

$$S = T/\sigma(T) - \Delta P/\sigma(P), \quad (1)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение средних значений температуры и осадков.

Гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) или индекс Селянинова [7], в общем виде вычисляется как отношение сумм осадков R, к сумме активных температур T (показатель, характеризующий период активной вегетации сельско-

[1]Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия
[2]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия
[3]Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия
[4]Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, Оренбург, Россия
*E-mail: vasilevdy@ugatu.su

Таблица 1. Основные характеристики используемой наблюдательной сети

Метеорологическая станция (синоптический индекс)	Географические координаты		Высота метеоплощадки, м
Янаул (28419)	56°16' с.ш.	54°58' в.д.	98
Кушнаренково (28624)	55°05' с.ш.	55°20' в.д.	98
Аксаково (28719)	54°01' с.ш.	54°08' в.д.	358
Уфа (28722)	54°42' с.ш.	54°48' в.д.	104
Тукан (28823)	53°50' с.ш.	57°29' в.д.	551
Стерлитамак (28825)	53°36' с.ш.	55°56' в.д.	136
Сорочинск (35011)	52°26' с.ш.	53°08' в.д.	102
Зилаир (35026)	52°14' с.ш.	57°27' в.д.	522
Оренбург (35121)	51°45' с.ш.	55°06' в.д.	109
Акбулак (35127)	51°01' с.ш.	55°38' в.д.	143
Домбаровский (35223)	50°47' с.ш.	59°32' в.д.	276

хозяйственных культур) уменьшенное в 10 раз, за идентичные периоды времени:

$$\text{ГТК} = R\big/0.1\sum T. \quad (2)$$

Индекс Палмера (Palmer Drought Severity Index или PDSI) [8], итоговая формула для вычисления значений этого индекса имеет следующий вид:

$$PDSI_i = 0.897PDSI_{i-1} + Z_i/3, \quad (3)$$

где i – временной интервал, как правило, месяц; Z – индекс аномалии влажности Палмера, который рассчитывается как:

$$Z = Kd. \quad (4)$$

K – весовой климатический показатель, d – параметр, представляющий собой разность между значениями сумм атмосферных осадков и уравнением водного баланса.

Стандартизированный индекс осадков (Standardized Precipitation Index – SPI), вычисление которого состоит в том, что данные по атмосферным осадкам трансформируются в нормальное (гауссово) распределение, где среднее значение индекса в рассматриваемый временной период равно нулю, а среднеквадратичное отклонение – единице [9].

Вычисление индексов осуществлялось с использованием среднесуточных данных по приземной температуре и суточных сумм атмосферных осадков за период 1960–2019 гг., полученных из единого государственного фонда ФГБУ “ВНИГМИ-МЦД” Росгидромета (http://www.meteorf.ru), по 11 метеорологическим станциям, расположенным на территории Южного Урала. Основные характеристики используемой в работе станционной сети представлены в табл. 1. Сопутствующие вычислительные процедуры по индексам засушливости были реализованы в [10]; после чего были сформированы массивы данных индексов засушливости для территории Южного Урала [11] и осреднены по искомой площади аналогично тому, как это было сделано в [12, 13].

В качестве основного результата исследования можно отметить аридизацию территории Южного Урала за последние десятилетия. При анализе всех четырех индексов засушливости в летний сезон отчетливо проявляются два наиболее ярких случая экстремальной засухи в 1975 и 2010 гг. На рис. 1 бордовым цветом обозначены периоды экстремальной засушливости, синим – области экстремальной влажности. Главными причинами этих катастрофических событий были блокирующие антициклоны, под влиянием которых на территории Южного Урала наблюдалась жаркая и сухая погода, а также предшествующая аномально холодная зима, глубокое промерзание почвы и, как следствие, бóльшая часть выпавших атмосферных осадков зимне-весеннего периода трансформировалась в речной сток, что и усугубило начавшуюся засуху. Наблюдающиеся в последние 19 лет продолжительные засушливые периоды связаны с изменением во внутригодовом распределении атмосферных осадков, а именно увеличением доли осадков осенне-зимнего сезона по сравнению с осадками весенне-летнего периода.

Для пространственной оценки всех четырех индексов была произведена площадная визуализация, представленная на рис. 2. Очевидно сходство ареала распространения засушливых и переувлажненных областей на Южном Урале по всем четырем индексам. Переувлажненными являются горнолесная область и некоторые части лесостепной зоны, а более засушливые – это бóльшая часть лесостепной и степная зоны, а также Зауралье. Такое распространение ареалов засушливости/увлажненности объясняется физико-географическими особенностями территории Южного

Урала, прежде всего барьерным эффектом Уральских гор, наличием крупных возвышенностей, а также в целом широтной поясности на Земле.

При объективном анализе важно установить, какой из четырех вычисленных индексов наиболее лучше подходит для исследуемой территории. Для этого был произведен сравнительный и корреляционный анализы; результаты последнего представлены в табл. 2. Наибольшее значение коэффициента линейной корреляции Пирсона отмечено у ГТК (индекс Селянинова) со всеми тремя остальными индексами засушливости. Сравнительный анализ заключался в сопоставлении экстремальных значений индексов засушливости и инструментальных данных приземной метеорологии и дал схожие с корреляционным анализом результаты. Поэтому дальнейший частотно-временной анализ производился только по индексу Селянинова. Сам частотно-временной анализ осуществлялся на базе вычисления основных статистических характеристик и вейвлет-преобразования (рис. 3), аналогично работам [14, 15].

Доминирующим и статистически значимым циклом на представленном временном интервале является квазидесятилетняя гармоника, что наглядно показано на периодограмме индекса – глобальный спектр мощности анализируемого сигнала (рис. 3б). С учетом этого результата, в целях выявления тенденции вариации ГТК, дальнейшие сравнения изменчивости производились по десятилетиям. В нашем случае, 60-летний ряд данных индекса Селянинова был разделен на шесть квазидесятилетних периодов (I – 1960–1970 гг., II – 1971–1980 гг., III – 1981–1990 гг., IV – 1991–2000 гг., V – 2001–2010 гг. и VI – 2011–2019 гг.). Затем на основе общепринятой в гидрометеорологической практике градации ГТК [7], представленной в табл. 3, было произведено ранжирование вычисленных значений индекса Селянинова. При этом отбирались значения ГТК, равные 0.6, и менее – эквивалентные экстремально засушливым условиям, по летнему сезону в целом и по отдельным трем теплым месяцам. Результаты этого отбора представлены в виде диаграмм на рис. 4. Из данных на рис. 4 видно, что для территории

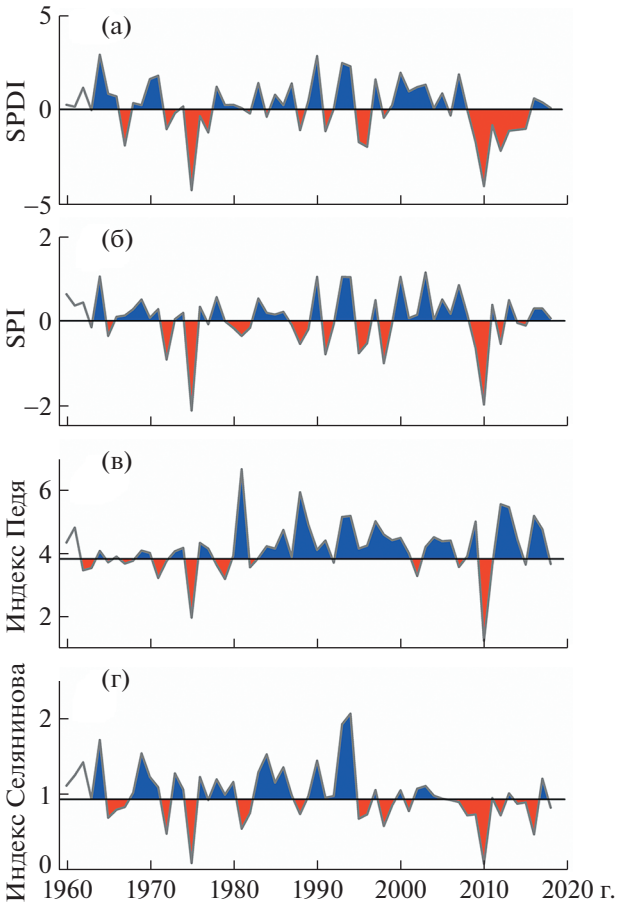

Рис. 1. Периоды засух (красные) и увлажненности (синие) на Южном Урале за 1960–2019 гг.: SPDI (а), SPI (б), индекс Педя (в) и индекс Селянинова (г).

Южного Урала отмечается уменьшение засушливости в июне, августе и рост засушливости в июле. В целом за летний сезон наблюдается тенденция увеличения количества происходящих засух.

В заключение отметим, что проведенный пространственно-временной анализ с использованием индексов засушливости Селянинова, Педя, SPI и PDSI позволил произвести комплексную

Таблица 2. Корреляционный анализ временных серий индексов засушливости за 1960–2019 гг.

Индекс	Селянинова	Педя	SPI	PDSI
Селянинова	**1**	0.33	**0.79**	**0.69**
Педя	0.33	**1**	0.32	0.22
SPI	**0.79**	0.32	**1**	**0.80**
PDSI	**0.69**	0.22	**0.80**	**1**

*Жирным шрифтом выделены статистически значимые величины линейного коэффициента корреляции Пирсона r на уровне $p = 0.001$, при $n = 60$.

Таблица 3. Классификация засух на основе значений индекса Селянинова [7]

Тип засухи	ГТК
Избыточное увлажнение или зона дренажа	более 1.3
Обеспеченное увлажнение	1.0–1.3
Засушливая	0.7–1.0
Сухого земледелия	0.5–0.7
Ирригации	менее 0.5

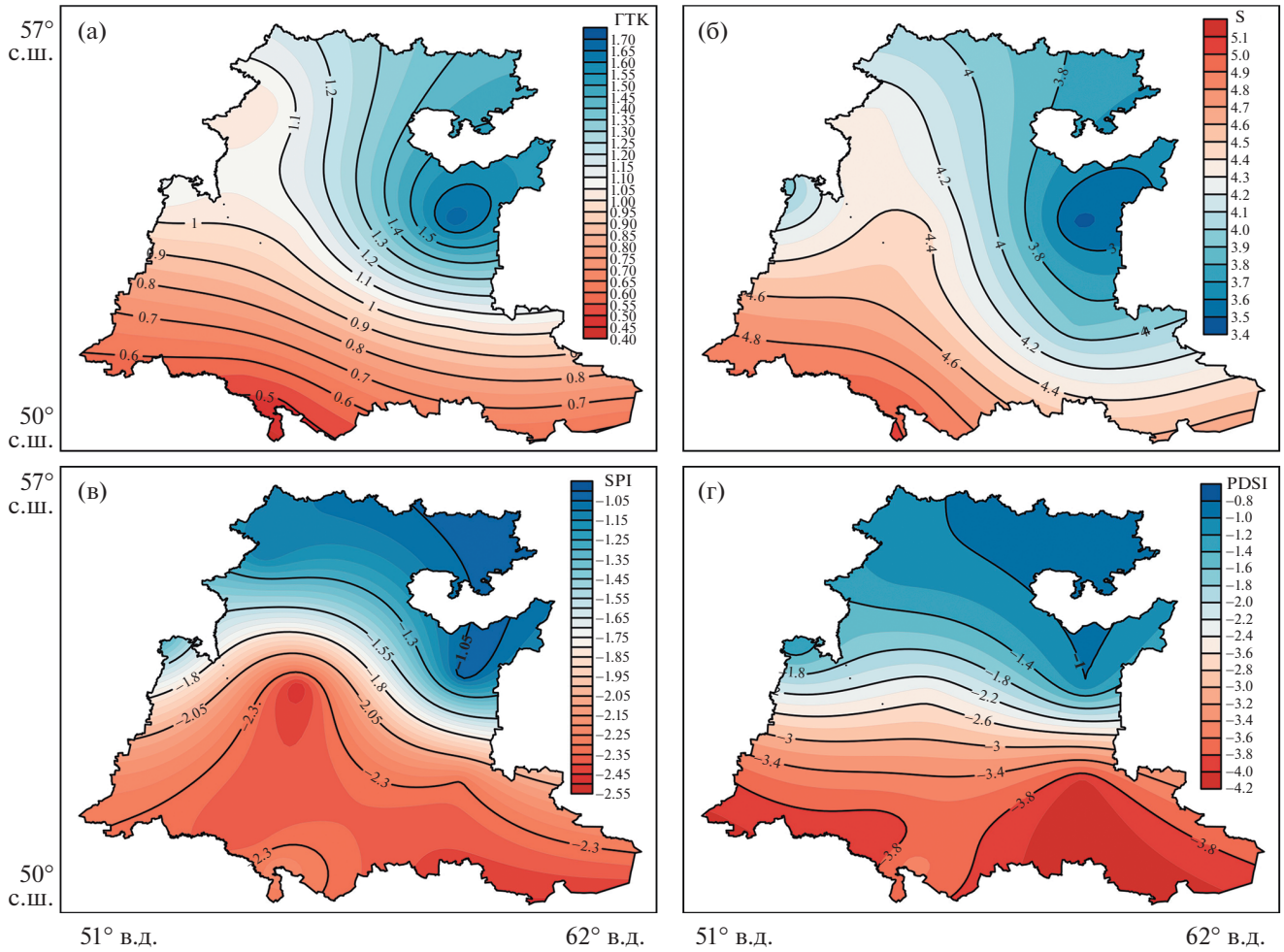

Рис. 2. Пространственное распределение индексов засушливости за 1960–2019 гг.: индекс Селянинова (а), индекс Педя (б), SPI (в) и SPDI (г).

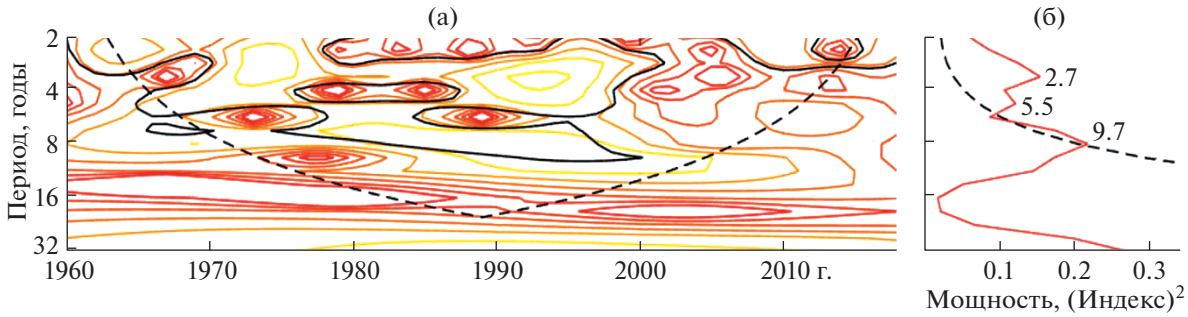

Рис. 3. Вейвлет анализ индекса Селянинова (ГТК): (а) локальный спектр, (б) спектр мощности. Пунктирной линией обозначена граница 95% статистической значимости и соответствующий конус влияния.

оценку в динамике увлажненности территории Южного Урала. Благодаря установленной высокой тесной связи ГТК с другими индексами засушливости, можно заключить, что ГТК можно использовать для решения задач анализа засух и увлажнения, а также для прогноза климатических изменений. Проведенный анализ показал, что индекс Селянинова адекватно представляет засушливость и увлажненность для территории Южного Урала в 1960–2019 гг. Установлено, что за последние девятнадцать лет число засух в июле месяце и за лето в целом увеличилось, в то время

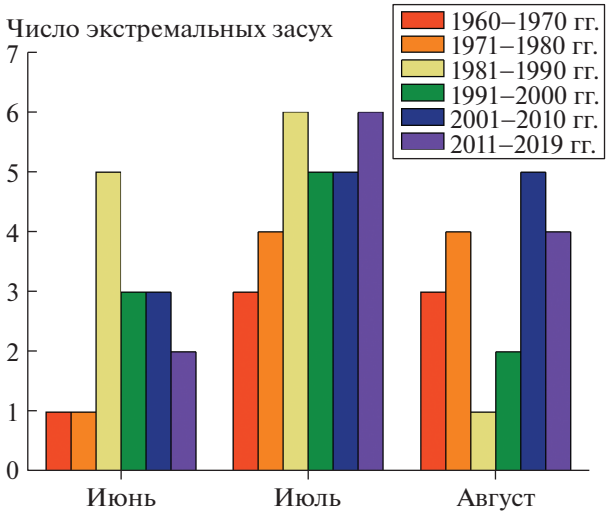

Рис. 4. Гистограммы экстремальных засух летнего сезона по отдельным месяцам и выделенным климатическим периодам на Южном Урале.

как аридизация в июне и августе найдена уменьшающейся. Результаты, полученные в данном исследовании, могут быть использованы при валидации климатических моделей и разработке схем долгосрочного прогнозирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность Башкирскому УГМС, Оренбургскому ЦГМС Приволжского УГМС Росгидромета, а также лично В.З. Горохольской и М.С. Утесеновой за предоставленные многолетние данные инструментальных наблюдений по основным метеорологическим характеристикам.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 19–17–00242). Обработка данных и расчет индексов засушливости выполнены в рамках темы Госзадания № 0148–2019–0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дроздов О.А.* Засухи и динамика увлажнений. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 96 с.
2. МГЭИК, 2013: Изменение климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под. ред. Стокера Т.Ф., Куина Д. МГЭИК, Кембридж, Нью Йорк, США. 1535 с.
3. *Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б.* // Известия РАН. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 2. 207–217.
4. *Уткузова Д.Н., Хан В.М., Вильфанд Р.М.* // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 1. С. 66–75.
5. *Li W., Duan L., Wang W., Wu Y., Liu T., Quan Q., Chen X., Yin H., Zhou Q.* // Meteorology and Atmospheric Physics. 2020. https://doi.org/10.1007/s00703-020-00727-4
6. *Педь Д.А.* // Труды Гидрометцентра СССР. 1975. № 156. С. 19–38.
7. *Селянинов Г.Т.* // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. № 20. С. 165–177.
8. *Lloud-Hughes B., Saunders M.A.* // International Journal of Climatology. 2002. V. 22. № 13. P. 1571–1592.
9. Standardized Precipitation Index. User Guide. WMO. 2012. V. 1090. P 18.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020616448. Рос. Федерация. Статистический анализ климатических изменений по индексам засушливости / Д.Ю. Васильев, В.В. Водопьянов, А.К. Костецкий, В.А. Семенов; правообладатель Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – № 2020615528; заявл. 02.06.2020.; зарегистр. 17.06.2020.
11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2020620991. Рос. Федерация. Двумерные массивы индексов засушливости для территории Южного Урала / Д.Ю. Васильев, В.В. Водопьянов, А.К. Костецкий, В.А. Семенов; правообладатель Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – № 2020620866; заявл. 02.06.2020.; зарегистр. 17.06.2020.
12. *Васильев Д.Ю., Бабков О.К., Давлиев И.Р., Семенов В.А., Христодуло О.И.* // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 4. С. 294–302.
13. *Васильев Д.Ю., Великанов Н.В., Водопьянов В.В., Красногорская Н.Н., Семенов В.А., Христодуло О.И.* // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 14–28.
14. *Васильев Д.Ю., Лукманов Р.Л., Ферапонтов Ю.И., Чувыров А.Н.* // ДАН. 2012. Т. 447. № 3. С. 331–334.
15. *Васильев Д.Ю., Павлейчик В.М., Семенов В.А., Сивохип Ж.Т., Чибилев А.А.* // ДАН. 2018. Т. 478. № 5. С. 588–592.

TENDENCIES OF THE ARIDITY FOR THE SOUTHERN URAL REGION IN 1960–2019 BASED ON DIFFERENT ESTIMATES

D. Yu. Vasilev[a,b,#], **Corresponding-Member of the RAS V. A. Semenov**[b,c], **and Academician of the RAS A. A. Chibilev**[d]

[a] *Ufa state aviation technical university, Ufa, Russian Federation*
[b] *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[c] *Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[d] *Steppe Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation*
[#] *E-mail: vasilevdy@ugatu.su*

A statistical analysis of extreme episodes of aridity and humidity for the territory of the Southern Urals was performed. The calculation was based on the average daily air temperature and daily precipitation from 11 stations for the 1960–2019 period. Based on station observations and calculated quality parameters, the spatio-temporal characteristics of the summer droughts were studied. It has been established that the frequency of droughts in the territory of the Southern Urals has increasedover the past 19 years, while the maximum spread of the phenomenon occurs in July.

Keywords: air temperature, precipitation, extreme drought, extreme moisture, climate variability