

АГРОНОМИЯ

4.1.1. Общее земледелие и растениеводство

Научная статья
УДК 633.853.494:632.934
<https://doi.org/10.28983/asj.y2025i8pp5-11>

Анализ засушливости территории Центрального Предкавказья на основе стандартизированного индекса осадков

Сергей Анатольевич Антонов, Сергей Владимирович Перегудов, Татьяна Владимировна Волошенкова
Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр, Ставропольский край, г. Михайловск, Россия
e-mail: tvoloshenkova@yandex.ru

Аннотация. Представлен анализ засушливости территории Центрального Предкавказья, проведенный с помощью стандартизированного индекса осадков (SPI), для дальнейшей разработки мероприятий по адаптации сельскохозяйственного производства к изменяющимся климатическим условиям. По многолетним данным осадков, полученным на 16 метеостанциях Ставропольского края, определены значения SPI и проанализированы различные периоды (1961–1990 и 1991–2020 гг.) увлажненности территории исследуемого региона. Установлено, что в последние 30 лет сократилась продолжительность слабовыраженных засух. При этом увеличились периоды других типов дефицита влаги и так называемых «оптимальных», то есть близких к норме условий. Продолжительность экстремальных засух (при расчете в целом за год) возросла в 2,06 раза. Прослеживается тенденция к усилению их интенсивности. Анализ по сезонам года показал, что продолжительность экстремальных засух увеличилась в зимний период в 1,43, весенний – в 2,91, летний – в 3,91, осенний – в 1,38 раза. Использование SPI позволяет учитывать долгосрочные изменения в осадках. Анализ скользящих 10-летних средних значений стандартизированного индекса осадков по многолетним месячным данным свидетельствует о цикличности во внутривековых колебаниях увлажнения на территории Ставропольского края с продолжительностью цикла около 60 лет (30 – засушливых и 30 – более влажных). С 2018 г. начался новый период засушливости, что требует разработки эффективных стратегий адаптации сельскохозяйственного производства к изменению климатических условий.

Ключевые слова: стандартизированный индекс осадков, засух, продолжительность и интенсивность засух, экстремальные засухи, цикличность увлажнения

Для цитирования: Антонов С. А., Перегудов С. В., Волошенкова Т. В. Анализ засушливости территории Центрального Предкавказья на основе стандартизированного индекса осадков // Аграрный научный журнал. 2025. № 8. С. 5–11. <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i8pp5-11>.

AGRONOMY

Original article

Analysis of aridity of the Central Ciscaucasia territory based on a standardized precipitation index

Sergey A. Antonov, Sergey V. Peregudov, Tat'yana V. Voloshenkova
North Caucasus Federal Scientific Agrarian Center, Stavropol region, Mikhailovsk, Russia
e-mail: tvoloshenkova@yandex.ru

Abstract. The aim of the study is to analyze the aridity of the Central Ciscaucasia territory using the standardized precipitation index (SPI) for further development of measures to adapt agricultural production to changing climate conditions. According to long-term precipitation data obtained at 16 weather stations of the Stavropol Territory SPI values were determined and various periods (1961-1990 and 1991-2020) of moisture content of the territory of the studied region were analyzed. It has been established that the duration of mild droughts has decreased over the last 30 years. At the same time, periods of other types of moisture deficiency and so-called “optimal”, that





is, conditions close to normal, have increased. The duration of extreme droughts (when calculated for the whole year) has increased by 2.06 times. There is a tendency to increase their intensity. The analysis by seasons showed that the duration of extreme droughts has increased in winter by 1.43, in spring – by 2.91, in summer – by 3.91, in summer – by 1.38 times. Using SPI allows you to take into account long-term changes in precipitation. The analysis of the moving 10-year average values of the standardized precipitation index based on long-term monthly data indicates the cyclicity in intraseasonal fluctuations of moisture in the Stavropol Territory with the cycle duration of about 60 years (30 – arid and 30 – wetter). Since 2018, a new period of aridity has begun, which requires the development of effective strategies for adapting agricultural production to changing climate conditions.

Keywords: standardized precipitation index, droughts, duration and intensity of droughts, extreme droughts, cyclic humidification

For citation: Antonov S. A., Peregudov S. V., Voloshenkova T. V. Analysis of aridity of the Central Ciscaucasia territory based on a standardized precipitation index. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2025;(8):5–11. (In Russ.). <https://doi.org/10.28983/asj.y2025i8pp5-11>.

Введение. Глобальные климатические изменения приводят к росту вероятности проявления различных неблагоприятных явлений, как на планетарном, так и на региональном уровнях [2, 17]. Изменение климата отнесено ФАО ООН к одному из основных факторов угрозы почвам, поскольку главными его проявлениями являются пыльные бури, ливни и засухи [15]. Засуха является важным абиотическим фактором, который непосредственно влияет на продуктивность агроэкосистем и продовольственную обеспеченность России [4]. Ключевыми факторами, определяющими возникновение атмосферных засух и увеличение засушливости климата в целом, являются дефицит осадков и повышенные температуры воздуха [5, 6].

Сельскохозяйственные регионы южной части степной зоны страны, включая Центральное Предкавказье (в частности, Ставропольский край), являются особенно уязвимыми с точки зрения аридизации, из-за роста температур воздуха и недостатка влаги [10]. Многолетние наблюдения (1961–2020 гг.) свидетельствуют о том, что на территории края в 85 % лет минимум на одной метеостанции отмечается одномесячная засуха. Но бывают и пятимесячные засухи, преимущественно в восточных районах [1].

В связи с этим важна оценка риска снижения урожайности сельскохозяйственных культур. Во многих странах и регионах мира, в том числе и России, для этого используются различные индексы и методы анализа [13]. В нашей стране одним из наиболее популярных индексов для оценки засушливости является гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК) [10]. Он позволяет проводить оценку обеспеченности территории влагой в теплый период года.

В настоящее время как альтернатива ГТК все большую популярность набирает стандартизированный индекс осадков (Standardized Precipitation Index – SPI), предложенный Т. В. McKee, N. J. Doesken и J. Kleist в 1993 г., который позволяет проводить наблюдения и анализ засушливости как теплых периодов года, так и холодных [12]. Всемирной метеорологической организацией (ВМО) стандартизированный индекс осадков был выделен в качестве отправной точки для мониторинга метеорологических засух. Он широко применяется региональными и национальными метеорологическими и гидрологическими учреждениями более чем в 70 странах. Это свидетельствует о широком признании и использовании индекса SPI в международном масштабе [12].

Несмотря на то, что в настоящее время разработаны как модификации данного индекса, так и другие комплексные модели, SPI остается общепринятым в мире за счет простоты расчета и интерпретации результатов [9]. В качестве исходных данных для его определения используется только параметр осадков.

Многими исследованиями подтверждено, что при сравнении нескольких индексов засушливости SPI в теплый период года показал наивысшую корреляцию с гидротермическим коэффициентом Селянинова, что свидетельствует о возможности использования данного индекса для наблюдений и в холодный период года [9, 16].

Цель исследования – анализ засушливости территории Центрального Предкавказья с помощью стандартизированного индекса осадков для дальнейшей разработки мероприятий по адаптации сельскохозяйственного производства к изменяющимся климатическим условиям.

Материалы и методы. Стандартизированный индекс осадков представляет собой количественную оценку уровня влагообеспеченности исследуемой территории, что позволяет проводить мониторинг, прогнозирование продолжительности и интенсивности атмосферной засухи, вклю-

чая также дождливые периоды. В качестве исходных данных по осадкам использовали материалы Ставропольского ЦГМС и ИАС Агроклимат по всем 16 метеостанциям края за 1961–2020 гг. [7].

Стандартизированный индекс осадков (SPI) рассчитывали по следующей формуле [9]:

$$SPI = \frac{x - x_m}{\sigma}, \quad (1)$$

где x – количество осадков по данным метеостанции за расчетный период, мм; x_m – среднее количество осадков, мм; σ – стандартное отклонение.

Для интерпретации данных применяли общепринятую классификацию, в которой положительные значения SPI указывают на избыток осадков, тогда как отрицательные значения свидетельствуют о дефиците осадков [13] (см. таблицу).

Классификация данных SPI

Classification of SPI data

Уровень увлажнения	Значение SPI
Экстремально влажно	2,0 и более
Очень влажно	1,5...1,99
Умеренно влажно	1,0...1,49
Близко к норме	-0,99...-0,99
Умеренная засуха	-1,0...-1,49
Сильная засуха	-1,5... -1,99
Экстремальная засуха	-2 и менее

При определении данного индекса может быть задан параметр периода расчета – 1, 3, 6, 9 или 12 месяцев [9]. В нашем исследовании использовали 12-месячный период.

Благодаря большой популярности расчет SPI был автоматизирован. В настоящее время доступны как онлайн сервисы, так и компьютерные программы открытого доступа. В нашей работе для определения стандартизированного индекса осадков использовали свободно распространяемую программу SPI Generator v1.7.6, разработанную National Drought Mitigation Center [14].

Для статистической обработки полученных материалов применяли программный комплекс Excel (Microsoft Corporation, USA), с помощью которого были рассчитаны скользящие 10-летние средние значения и построены схемы.

Результаты исследований. По данным многолетнего ряда осадков (1961–2020 гг.), были получены значения стандартизированного индекса осадков и построена гистограмма распределения различных периодов увлажненности территории Ставропольского края (рисунок 1).

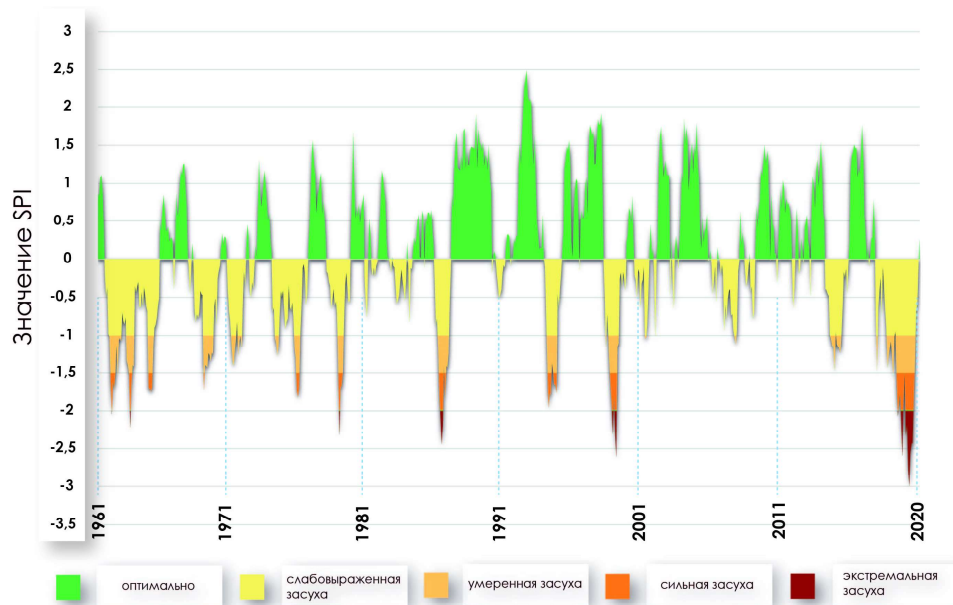


Рисунок 1 – Изменение стандартизированного индекса осадков (SPI) (1961–2020 гг.)

Figure 1 – Change in the Standardized Precipitation Index (SPI) (1961–2020)





Анализ полученных данных указывает на то, что в изучаемом временном интервале четко прослеживается тенденция ужесточения засух. Растет количество экстремальных засух, их продолжительность и интенсивность. В начале исследуемого периода минимальные значения SPI снижались до $-2,04$, что соответствует пограничному значению между сильной и экстремальной засухой. К 2020 г. они опустились ниже в 1,47 раза – до $-2,99$, что соответствует исключительно экстремальной засухе.

Следует отметить, что при условии наличия достаточных запасов влаги в почве или доступа к источникам искусственного орошения периоды краткосрочной засухи, даже с учетом низких показателей индекса, могут не иметь большого негативного эффекта в долгосрочной перспективе. В таких случаях растения могут выживать и развиваться, несмотря на отрицательные значения SPI. Однако если периоды даже краткосрочных экстремальных значений SPI накладываются на продолжительные периоды засушливости, то это может привести к атмосферной и почвенной засухам, последствиями которых будут серьезные проблемы для сельского хозяйства.

Для более детального анализа значений стандартизованного индекса осадков период наблюдения разделили на многолетние климатические нормы. Согласно рекомендациям Всемирной метеорологической организации (ВМО), в качестве многолетней климатической нормы рекомендуется использовать временной период не менее 30 лет [3]. В наших исследованиях были выделены два периода – 1961–1990 и 1991–2020 гг. (рисунок 2).

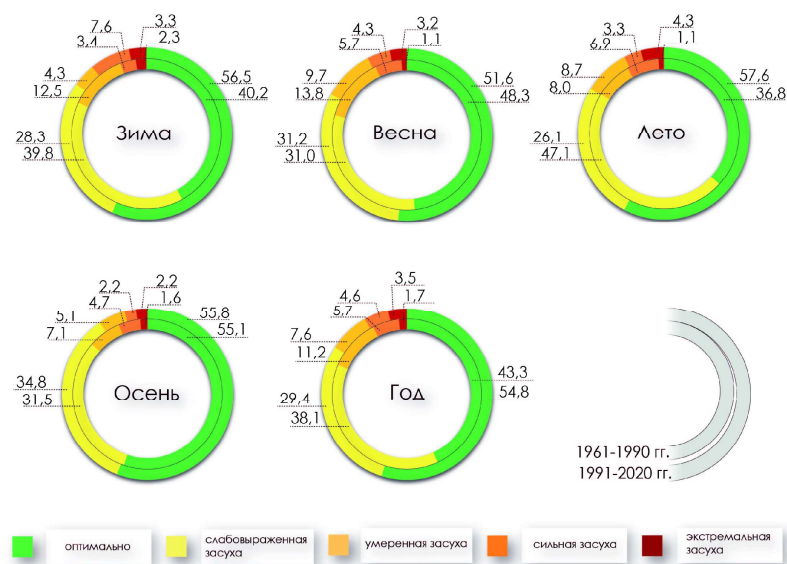


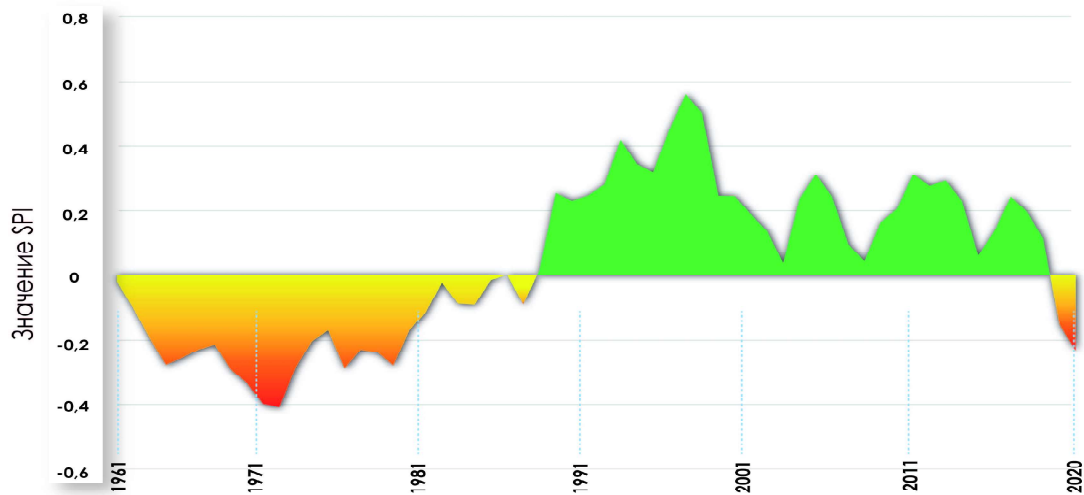
Рисунок 2 – Продолжительность периодов засух различной интенсивности, %, в рамках климатических норм 1961–1990 и 1991–2020 гг.

Figure 2 – The duration of periods of droughts of varying intensity, %, within the framework of climatic norms 1961–1990 and 1991–2020

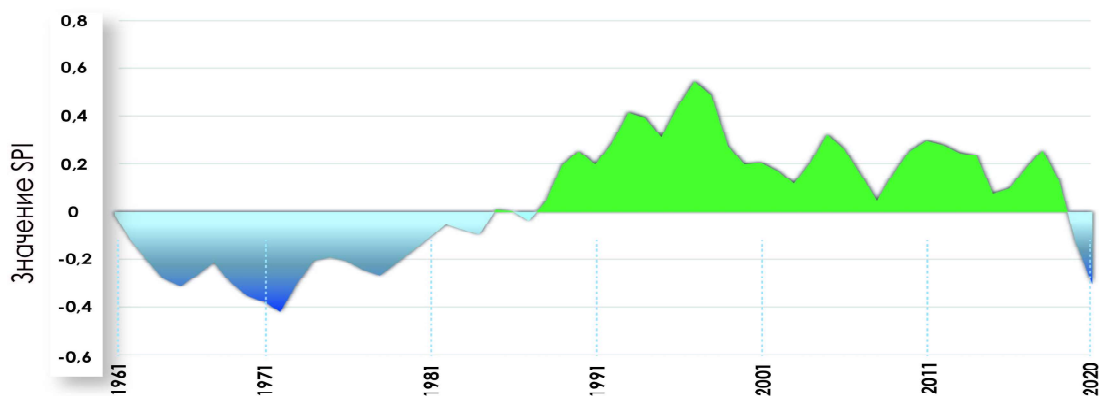
При сравнении значений SPI в эти периоды установлено, что в последние 30 лет сократилась продолжительность слабовыраженных засух (в целом за год). При этом увеличились периоды других типов дефицита влаги и так называемых «оптимальных», то есть близких к норме условий. Вместе с этим в 2,06 раза возросла продолжительность экстремальных засух. Если рассматривать сезоны года отдельно, то различные типы засух проявлялись неоднозначно.

Так, в зимний период наблюдали наибольший прирост продолжительности сильных засух – на 4,2 %, или в 2,34 раза. Количество экстремальных засух при этом возросло в 1,43 раза. В другие сезоны года продолжительность сильных засух несколько уменьшилась, зато экстремальных – увеличилась, в весенний период – в 2,91, в летний – в 3,91, в осенний – в 1,38 раза. Это создает серьезные риски при выращивании как озимых, так и яровых культур.

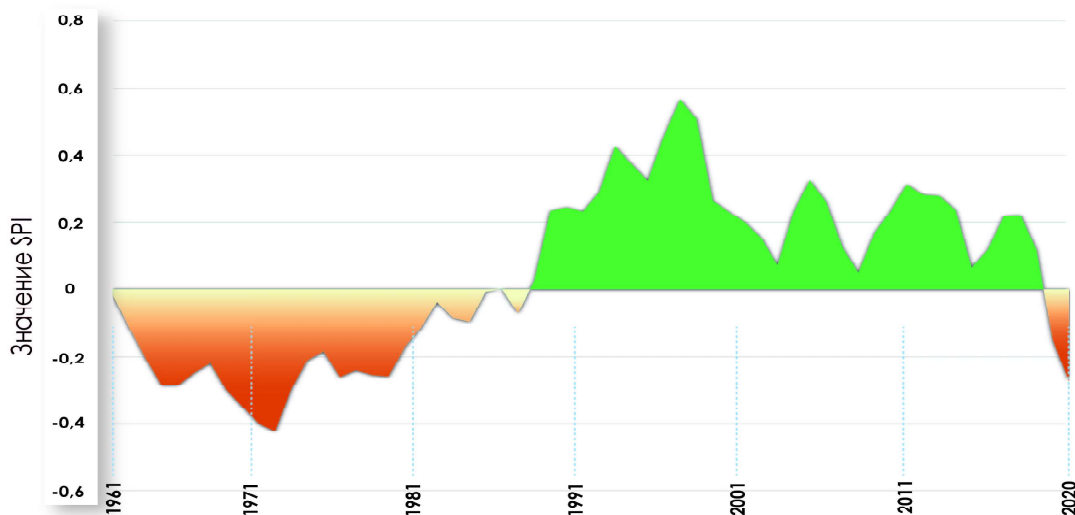
Расчет скользящих 10-летних средних значений стандартизованного индекса осадков по многолетним месячным данным позволил проанализировать динамику индекса SPI с 1961 по 2020 г. отдельно за теплый и холодный периоды года, а также в целом за год (рисунок 3).



A



B



B

*Рисунок 3 – Скользящие 10-летние средние значения SPI за 1961–2020 гг.
(A – теплый период года, Б – холодный период года, В – в целом за год)*

*Figure 3 – Moving 10-year average SPI values for 1961–2020
(A – the warm period of the year, B – the cold period of the year, C – the whole year)*





Несмотря на сильные межгодовые колебания индекса SPI (см. рисунок 1), при сглаживании его значений с помощью 10-летних скользящих средних четко прослеживались периоды засухливости (с 1958 по 1988 г.) и увлажненности (с 1988 по 2018 г.) территории Ставропольского края. Эта закономерность характерна как для теплого, так и для холодного сезонов года. На основании полученных данных можно сделать вывод о цикличности во внутривековых колебаниях увлажнения на территории Ставропольского края. Продолжительность цикла при этом составляет около 60 лет, 30 лет засушливых и 30 – более влажных.

Аналогичные результаты были получены несколько ранее А.Н. Сажиним с соавторами [8] в исследованиях, проведенных на территории Нижнего Поволжья. Ими также было выявлено чередование периодов увлажнения и засухливости с периодичностью около 60–70 лет. Это связано с цикличностью изменений общей циркуляции атмосферы, обусловленной сменой эпох зонального и меридионального переноса воздушных масс над атлантико-европейским сектором Евразии.

С учетом полученных данных можно говорить о наступлении очередного 60-летнего цикла на территории Ставропольского края. Новый засушливый период, очевидно, должен продлиться с 2018 по 2048 г. и его проявления мы можем наблюдать уже в режиме реального времени. Проведенные ранее исследования позволили установить, что в 2016–2020 гг. по сравнению с 2006–2010 гг. увеличилась доля восточных ветров, особенно в крайне засушливой и засушливой зонах края, соответственно в 1,59–2,12 и 1,65–2,12 раза. Отмечали также сокращение количества осадков на 10 и 6 %, а к 2032 г. прогнозируется уменьшение еще на 23 и 21 мм [10].

С учетом неблагоприятного прогноза по увлажнению необходимо предусмотреть целый комплекс мер по адаптации сельскохозяйственного производства к ужесточающимся климатическим условиям. В него должны входить восстановление систем защитных лесных насаждений, применение почвосберегающих систем земледелия, корректировка структуры посевных площадей, селекция и использование более засухоустойчивых и жаростойких сортов выращиваемых культур и другие мероприятия, то есть в целом – внедрение адаптивно-ландшафтного подхода в сельское хозяйство.

Заключение. Проведенные исследования подтверждают, что использование стандартизированного индекса осадков (SPI) является эффективным средством мониторинга засухливости. В отличие от традиционного анализа осадков нормализованные значения индекса позволяют сравнивать степень засухливости независимо от природно-климатической зоны и времени года.

На территории Ставропольского края прослеживается тенденция ужесточения экстремальных засух, растет их продолжительность и интенсивность. Продолжительность увеличилась в зимний период в 1,43, весенний – в 2,91, летний – в 3,91, осенний – в 1,38 раза.

Использование SPI позволяет учитывать долгосрочные изменения в осадках. Полученные данные свидетельствуют о цикличности во внутривековых колебаниях увлажнения на территории Ставропольского края с продолжительностью цикла около 60 лет (30 – засушливых и 30 – более влажных). С 2018 г. начался новый период засухливости, что требует разработки эффективных стратегий адаптации сельскохозяйственного производства к изменению климатических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов С. А., Каторгин И. Ю. Картографирование характеристик изменения климата в Ставропольском крае // Интеркарто. Интергис. 2021. Т. 27. № 3. С. 171–182. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-3-26-252-263.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с. ISBN: 978-5-9631-0322-7.
3. Груза Г. В., Раньков Э. Я. Обнаружение изменений климата: состояние, изменчивость и экстремальность климата // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 50–65.
4. Ксенофонтов М. Ю., Ползиков Д. А. К вопросу о влиянии климатических изменений на развитие сельского хозяйства России в долгосрочной перспективе // Проблемы прогнозирования. 2020. № 3 (180). С. 82–92. EDN: FSISNB.
5. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным / А. В. Чернокульский [и др.] // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 7–41. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.
6. Попова В. В., Бокучава Д. Д., Матвеева Т.А. Экстремальная засуха на восточно-европейской равнине в период потепления середины XX столетия: климатические характеристики и аналоги в условиях современного климата // Аридные экосистемы. 2022. Т. 29. № 2(95). С. 3–11. DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-3-11.
7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017664116. Автоматизированная информационная система «АГРО-КЛИМАТ» / Антонов С. А., Барсуков М. Г.; 18.12.2017; заявка № 2017660850 от 26.10.2017.

8. Связь внутривековых изменений увлажнения со сменой циркуляционных эпох и ее отражение в природных процессах атлантико-европейского сектора Евразии / А. Н. Сажин [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2006. № 1. С. 26–34.

9. Справочник по показателям и индексам засушливости // ВМО. 2016. № 1173. 60 с. ISBN 978-92-63-41173-0.

10. Тенденции изменения климата в засушливых районах Ставропольского края / Т. В. Волошенкова [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 11. С. 5–11. DOI: 10.53859/02352451_2023_37_11_5.

11. Черенкова Е. А., Золотокрылин А. Н. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 2. С. 79–84. DOI: 10.21513/2410-8758-2016-2-79-9.

12. Cheval S. The standardized precipitation index an overview // Romanian Journal of Meteorology. 2015. Vol. 12. No. 1–2. P. 17–64.

13. Global integrated drought monitoring and prediction system / Z. Hao et al. // Scientific data. 2014. Vol. 1. No. 1. P. 1–10. DOI: 10.1038/sdata.2014.1.

14. SPI Generator v1.7.6. Available at: <https://drought.unl.edu/monitoring/SPI/SPIProgram.aspx> (Date of application: 15.12.2023).

15. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy. 2015. 650 p. ISBN 978-92-5-109004-6.

16. Taparauskiene L., Laukðevičiūtė V., Maziliauskas A. Comparison of standardized precipitation and Selyaninov hydrothermal drought indices // Rural Development. 2013. P. 486–489.

17. Twentieth-century hydroclimate changes consistent with human influence / K. Marvel et al. // Nature. 2019. Vol. 569. No. 7754. P. 59–65. DOI: 10.1038/s41586-019-1149-8.

REFERENCES

1. Antonov S. A., Katorgin I. Yu. Mapping the characteristics of climate change in the Stavropol Territory. *Interkarto. Intergis*. 2021;27(3):171–182. (In Russ.). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-3-26-252-263.

2. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Moscow: Roshydromet; 2014. P. 1008. (In Russ.). ISBN: 978-5-9631-0322-7.

3. Gruza G. V., Rankov E. Ya. Detection of climate change: the state, variability and extremity of climate. *Meteorology and Hydrology*. 2004;(4):50–65. (In Russ.).

4. Ksenofontov M. Yu., Polzikov D. A. On the issue of the impact of climate change on the development of agriculture in Russia in the long term. *Problems of Forecasting*. 2020;3(180):82–92. (In Russ.). EDN: FSISNB.

5. Dangerous atmospheric phenomena of a convective nature in Russia: observed changes according to various data / A.V. Chernokulsky et al. *Meteorology and Hydrology*. 2022;(5):7–41. (In Russ.). DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-27-41.

6. Popova V. V., Bokuchava D. D., Matveeva T. A. Extreme drought on the East European plain during the warming period of the mid-twentieth century: climatic characteristics and analogues in the conditions of modern climate. *Arid Ecosystems*. 2022;29(2)(95):3–11. (In Russ.). DOI: 10.24412/1993-3916-2023-2-3-11.

7. Certificate of registration of the computer program RU 2017664116. Automated information system «AGRO-CLIMATE» / Antonov S. A., Barsukov M. G.; 12.18.2017; application No. 2017660850 dated 10.26.2017. (In Russ.).

8. The connection of intra-century changes in moisture with the change of circulation epochs and its reflection in the natural processes of the Atlantic-European sector of Eurasia / A. N. Sazhin, S. A. Petrov, N. V. Poghosyan, Yu. I. Vasiliev, T. V. Voloshenkova, O. V. Kozina, S. N. Monikov. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The Series is Geographical*. 2006;(1):26–34. (In Russ.).

9. Handbook of indicators and indices of aridity. *WMO*. 2016;(1173):60. (In Russ.). ISBN 978-92-63-41173-0.

10. Trends in climate change in arid areas of the Stavropol Territory / T. V. Voloshenkova, S. A. Antonov, A. A. Kalashnikova, S. V. Peregudov *Achievements of Science and Technology of the Agro-industrial Complex*. 2023;37(11):5–11. (In Russ.). DOI: 10.53859/02352451_2023_37_11_5.

11. Cherenkova E. A., Zolotokrylin A. N. On the comparability of some quantitative indicators of drought. *Fundamental and Applied Climatology*. 2016;(2): 79–84. (In Russ.). DOI: 10.21513/2410-8758-2016-2-79-94.

12. Cheval S. The standardized precipitation index an overview. *Romanian Journal of Meteorology*. 2015;12(1–2):17–64.

13. Global integrated drought monitoring and prediction system / Z. Hao et al. *Scientific Data*. 2014;1(1):1–10. DOI: 10.1038/sdata.2014.1.

14. SPI Generator v1.7.6. Available at: <https://drought.unl.edu/monitoring/SPI/SPIProgram.aspx> (Date of application: 15.12.2023).

15. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy. 2015. 650 p. ISBN 978-92-5-109004-6.

16. Taparauskiene L., Laukðevičiūtė V., Maziliauskas A. Comparison of standardized precipitation and Selyaninov hydrothermal drought indices. *Rural Development*. 2013:486–489.

17. Twentieth-century hydroclimate changes consistent with human influence / K. Marvel et al. *Nature*. 2019;569(7754): 59–65. DOI: 10.1038/s41586-019-1149-8.

Статья поступила в редакцию 13.08.2024; одобрена после рецензирования 25.09.2024; принята к публикации 30.09.2024.

The article was submitted 13.08.2024; approved after reviewing 25.09.2024; accepted for publication 30.09.2024.

