

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-144-152>

УДК 551.58

Сравнительный анализ показателей засушливости для оценки засух в сельскохозяйственных районах Северной Евразии

С.В. Емелина^{1,2}, В.М. Хан^{1,2}

*¹Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия;*

*²Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука
Российской академии наук, г. Москва, Россия
tkachukzn@gmail.com*

Анализируются два подхода к оценке засушливых условий: широко используемый в отечественной агрометеорологической практике гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) и стандартизированный индекс осадков и испаряемости (SPEI). Дается оценка повторяемости экстремальных засух в сельскохозяйственных районах Европейской территории России и Средней Азии в 1991–2020 гг. Приводятся результаты сопоставления временных рядов индексов с влагозапасами в почве. Статистика засух по ГТК и по индексу SPEI за исследуемый период демонстрирует похожие результаты, но индекс SPEI в среднем имеет незначительно более высокие коэффициенты корреляции с данными наблюдений, чем ГТК. Даны рекомендации по использованию индексов ГТК и SPEI в оперативной прогностической и исследовательской практике в работе Северо-Евразийского климатического центра.

Ключевые слова: показатели засушливости, стандартизированный индекс осадков и испаряемости, SPEI, гидротермический коэффициент, ГТК.

Comparative analysis of drought indices to assess drought conditions in agricultural regions of Northern Eurasia

S. V. Emelina^{1,2}, V. M. Khan^{1,2}

¹Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia;

*²Marchuk Institute of Numerical Mathematics
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
tkachukzn@gmail.com*

The paper analyzes two approaches to assessing drought conditions: the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC) widely used in Russian agrometeorological practice and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). The study evaluates the frequency of extreme droughts in agricultural regions of the European part of Russia and Central Asia from 1991 to 2020. The results of a comparison of the time series of these indices with observed soil moisture data are presented. Statistical analysis of droughts based on HTC and SPEI over the study period demonstrates similar results. However, SPEI generally exhibits slightly higher correlation coefficients with observational data than HTC. Recommendations are provided for the operational and research use of HTC and SPEI indices by the North Eurasian Climate Centre.

Keywords: drought indices, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), hydrothermal coefficient (HTC)

Введение

В связи с изменением климата и последствиями его изменений все больше внимания уделяется вопросам развития специализированного прогнозирования для различных секторов экономики. Именно засухи являются наиболее сложными распространенными гидроклиматическими опасностями, которые приводят к экономическим проблемам и финансовым рискам. Засухи в совокупности затрагивают большее количество людей, чем любые другие последствия, связанные с изменениями климата [1].

Для количественной оценки ключевых характеристик засух, включая их частоту, продолжительность, интенсивность и пространственную выраженность, широко применяются индексы засушливости [9, 11, 12]. Однако в настоящее время в исследовательской и оперативной практике не существует единого количественного показателя засухи. Каждый используемый показатель рассматривает ситуацию с засушливыми условиями с определенной точки зрения [7].

Цель данной работы заключается в сопоставлении методик определения интенсивности засух по двум одобренным Всемирной метеорологической организацией показателям засушливости – стандартизированному индексу осадков и испаряемости (SPEI) и гидротермическому коэффициенту Г.К. Селянинова (ГТК) для территории Северной Евразии.

Материалы и методы

В ФГБУ «Гидрометцентр России» для оперативного мониторинга атмосферных засух используются два подхода: количество осадков в % нормы [4] и гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) [12].

Гидротермический коэффициент увлажнения Г.К. Селянинова представляет собой соотношение суммы осадков за период со среднесуточными температурами выше 10 °С к сумме осадков за этот же период:

$$\text{ГТК} = \frac{\Sigma R_{>10}}{0,1 \Sigma T_{>10}}, \quad (1)$$

где $\Sigma R_{>10}$ – сумма осадков за период со среднесуточными температурами выше 10 °С; $\Sigma T_{>10}$ – сумма среднесуточных температур за период со среднесуточными температурами выше 10 °С.

ГТК выражается в долях единицы, при этом чем ниже его значение, тем ниже влагообеспеченность территории, ГТК, равный 1, соответствует балансу выпадающих осадков и испаряемости.

Целесообразность использования ГТК обусловлена не только удобством применения в автоматизированных расчетах на основе регулярно

поступающих декадных агрометтелеграмм и возможностью классифицировать засухи по интенсивности (сильная, средняя и слабая), но и достаточно тесной связью с урожайностью основных сельскохозяйственных культур во многих районах, что позволяет использовать его в прогностических целях [3, 6]. При этом в [7] упоминается, что методика определения интенсивности засухи по ГТК позволяет сравнивать соотношение тепла и влаги в различных географических точках между собой, но при определении засухи ее градации меняются в зависимости от зональности увлажнения и месяцев вегетационного сезона.

Однако подходы к оценке засушливых условий постоянно модернизируются, и в настоящее время большую популярность приобрел стандартизированный индекс осадков и испаряемости SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) [8]. Этот показатель учитывает влияние потенциального суммарного испарения на интенсивность засухи, при этом многомерный характер индекса позволяет выделять типы засухи и их влияние на различные системы. Для расчета SPEI используются данные по водному балансу (разность между осадками и потенциальной эвапотранспирацией), что обеспечивает более надежную оценку интенсивности засухи, чем при использовании только осадков. Баланс рассчитывается в различных временных масштабах, а полученные разности суммарных осадков и эвапотранспирации (наиболее близко соответствующей их распределению) приводятся к лог-логистическому распределению вероятностей:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{D - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}, \quad (2)$$

где D – разность между осадками и потенциальной эвапотранспирацией; α , β , γ – параметры масштаба, формы и расположения, которые оцениваются по выборке D .

При расчете SPEI важна оценка логарифмических параметров, поскольку это позволяет проводить мониторинг засухи по значениям индекса в пространстве и времени. Для этого необходимо, чтобы пространственные ряды SPEI в разных точках имели одинаковое среднее значение и стандартное отклонение; то же самое применимо к временным рядам SPEI, рассчитанным для одной точки. Значения индекса SPEI ниже нуля характеризуют условия увлажнения как засушливые. В данной работе проведено сопоставление индексов ГТК и SPEI.

В табл. 1 представлены критерии для оценки интенсивности засух, для индекса ГТК приведены показатели из [5], для индекса SPEI – из [7].

Для расчетов исторических рядов показателей засушливости использовались данные реанализа ERA5 [10] по температуре воздуха на 2 м, максимальной и минимальной температуре воздуха и осадков с пространственным разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ и временным разрешением 6 часов, которые были сформированы в среднесуточные архивы за период с 1991 по 2020 год. Исследование проводилось для сельскохозяйственных районов Северной Евразии ($35\text{--}75^\circ$ с. ш., $20\text{--}180^\circ$ в. д.), включая ЕТР.

Таблица 1. Критерии интенсивности засух по индексам SPEI и ГТК
Table 1. Drought intensity criteria based on SPEI and HTC indices

Классификация засух по интенсивности	SPEI	ГТК
Очень сильная (экстремальная) засуха	$SPEI \leq -2$	$ГТК \leq 0,3$
Сильная засуха	$-2 < SPEI \leq -1,5$	$0,3 < ГТК \leq 0,6$
Слабая засуха	$-1,5 < SPEI \leq -1$	$0,6 < ГТК \leq 0,8$
Умеренное или достаточное увлажнение	$-1 < SPEI \leq 0$	$ГТК \geq 0,81$

В большинстве исследований показана информативность показателей засушливости на основе их сопоставления друг с другом, в [5] был применен более объективный подход: было проведено сопоставление индексов ГТК и SPI с урожайностью зерновых и зернобобовых культур, при этом частные коэффициенты корреляции урожайности с ГТК и SPI весьма близки по значениям. В данной работе в качестве критерия для информативности показателей засушливости предлагается использовать архив данных по почвенным влагозапасам, предоставленный агрометеорологическим отделом Гидрометцентра России. Данный архив – это набор временных рядов по влагосодержанию в почвенном слое глубиной 100 см с апреля по август, измеряемых на агрометеорологических станциях и осредненных по 18 субъектам России: по Орловской, Липецкой, Тамбовской, Курской, Белгородской, Воронежской, Ульяновской, Пензенской, Самарской, Саратовской, Оренбургской, Волгоградской, Ростовской, Астраханской областям, Калмыкии, Башкирии, а также по Краснодарскому и Ставропольскому краям.

Стоит отметить, что результаты по Калмыкии и Астраханской области не вошли в настоящее исследование, так как из-за пропусков временные ряды не позволяли получить статистически значимые результаты. Архив составлен с 1958 года, однако в настоящей работе был рассмотрен временной период с 1991 по 2020 г. для сопоставления необходимой информации с индексами засушливости, рассчитанными по данным реанализа.

Результаты и обсуждение

На первом этапе была проанализирована и сопоставлена повторяемость экстремальных засух на территории Средней Азии и на юге ЕТР. На рис. 1 приведена повторяемость экстремальной засухи (в %) по данным ГТК (рис. 1а) и SPEI (рис. 1б) за период 1991–2020 гг. Согласно данным табл. 1, засуха по ГТК – это значения индекса ниже 0,3, для SPEI – ниже -2. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что экстремальные засухи по оценке ГТК случаются чаще, чем по оценкам SPEI. За период

1991–2020 гг. по данным ГТК на территории Средней Азии и сельскохозяйственных регионов России повторяемость засух завышена на 5–15 %.

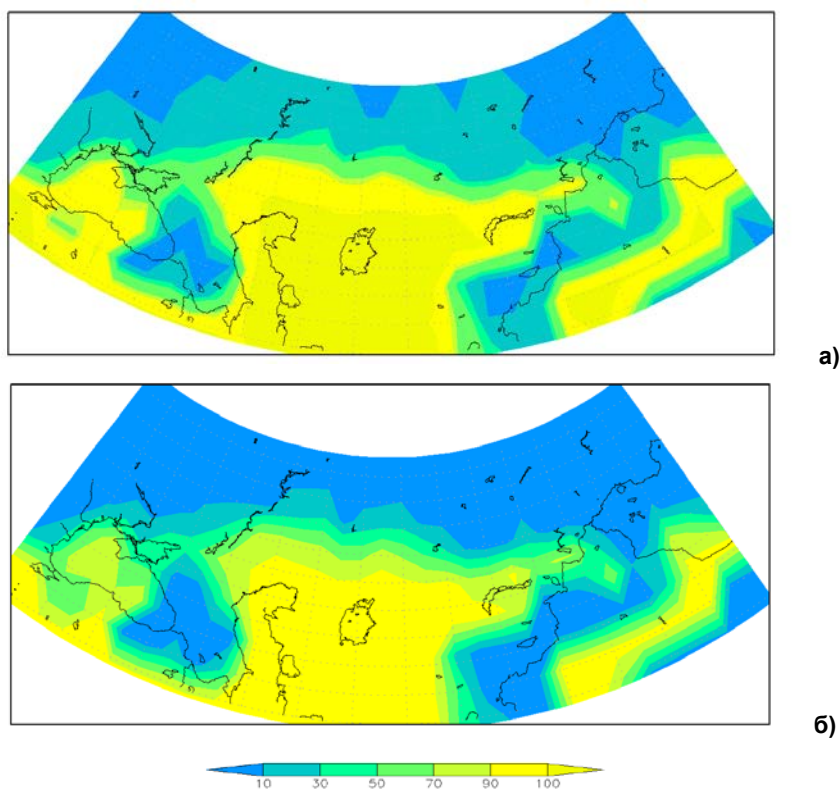


Рис. 1. Повторяемость экстремальной засухи (в %) на юге ЕТР и на территории Средней Азии по данным ГТК (а) и SPEI (б) в период 1991–2020 гг.

Fig. 1. Frequency of extreme drought (in %) in the south of the European part of Russia and in the territory of Central Asia according to the State Customs Committee (a) and the SPEI (б) in the period 1991–2020.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции между аномалиями влагозапасов почвы на глубине 100 см и показателями засушливости SPEI и ГТК для летних условий в период 1991–2020 гг. для субъектов России, где на агрометеорологических станциях ведутся измерения запасов влаги на разных уровнях. Почти все полученные коэффициенты корреляции являются статистически значимы при $p < 0,05$. Исключение – Оренбургская область, для которой значения r составляют 0,29 для индекса SPEI, 0,24 для индекса ГТК (они выделены курсивом в таблице). Наибольшие значения выделены жирным шрифтом: для Ростовской области SPEI = 0,78, ГТК = 0,78. Средние значения по всем регионам практически идентичны (0,60 для SPEI и 0,61 для ГТК).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между аномалиями влагозапасов почвы и показателями засушливости SPEI и ГТК для летних условий в период 1991–2020 гг.

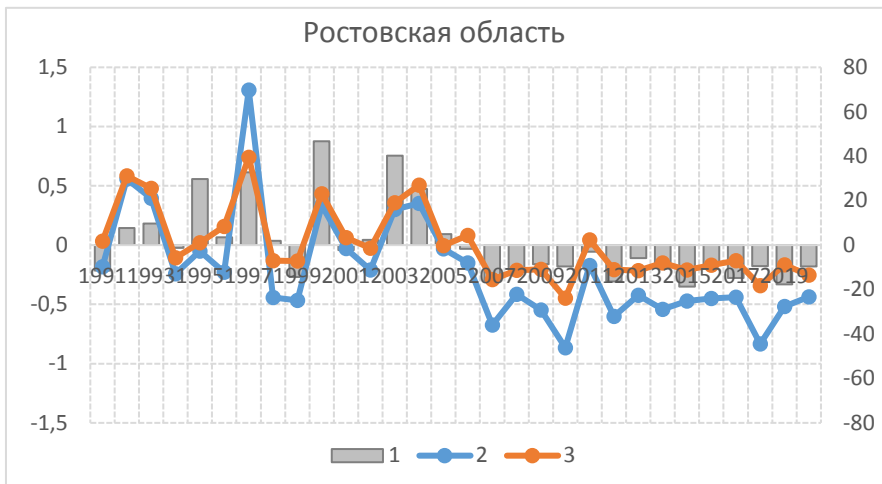
Table 2. Correlation coefficients between soil moisture anomalies and SPEI and ГТК aridity indices for summer conditions in the period 1991–2020

Субъект РФ	r (SPEI и ВЗ)	r (ГТК и ВЗ)	r (SPEI и ГТК)
Орловская	0,59 (0,51-0,66)	0,57 (0,49-0,64)	0,92 (0,90-0,94)
Воронежская	0,67 (0,60-0,73)	0,64 (0,56-0,70)	0,95 (0,93-0,96)
Липецкая	0,56 (0,48-0,63)	0,53 (0,45-0,60)	0,96 (0,95-0,97)
Тамбовская	0,60 (0,52-0,67)	0,61 (0,53-0,68)	0,94 (0,92-0,95)
Курская	0,61 (0,53-0,68)	0,64 (0,56-0,70)	0,68 (0,60-0,75)
Белгородская	0,70 (0,63-0,76)	0,62 (0,54-0,69)	0,92 (0,90-0,94)
Ульяновская	0,67 (0,60-0,73)	0,68 (0,61-0,74)	0,93 (0,91-0,95)
Пензенская	0,62 (0,54-0,69)	0,64 (0,56-0,71)	0,96 (0,95-0,97)
Самарская	0,66 (0,59-0,72)	0,68 (0,61-0,74)	0,95 (0,94-0,96)
Саратовская	0,41 (0,31-0,50)	0,49 (0,39-0,57)	0,92 (0,90-0,94)
Оренбургская	0,29 (0,18-0,39)	0,24 (0,13-0,34)	0,97 (0,96-0,98)
Волгоградская	0,56 (0,47-0,64)	0,47 (0,38-0,55)	0,90 (0,87-0,92)
Ростовская	0,78 (0,72-0,83)	0,78 (0,72-0,83)	0,96 (0,95-0,97)
Краснодарский край	0,45 (0,35-0,54)	0,54 (0,45-0,62)	0,92 (0,90-0,94)
Ставропольский край	0,57 (0,49-0,64)	0,55 (0,47-0,62)	0,93 (0,91-0,95)
Башкирия	0,63 (0,55-0,70)	0,56 (0,48-0,63)	0,95 (0,94-0,96)
Средний	0,59 (0,51-0,66)	0,58 (0,50-0,65)	0,92 (0,90-0,94)

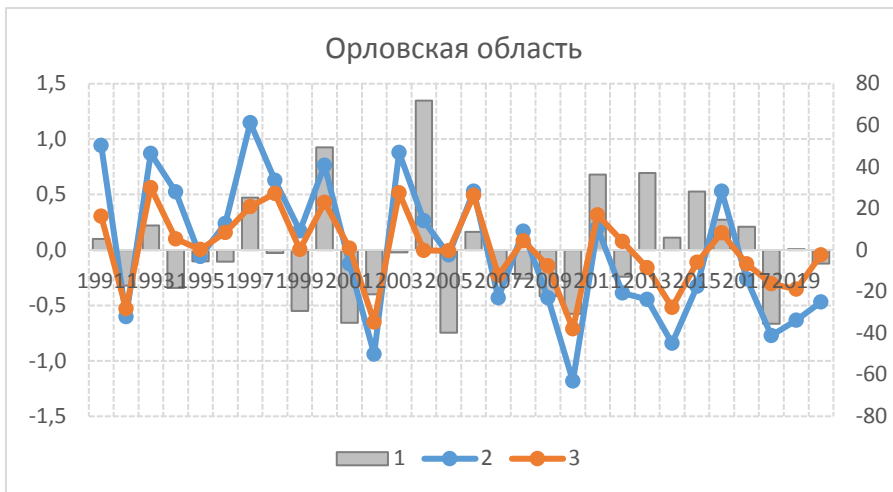
Примечание. курсивом выделены статистические не значимые результаты на p -value < 0,05, жирным выделены максимальные коэффициенты корреляции в скобках указан доверительный интервал.

Также можно отметить высокую корреляционную связь между самими показателями SPEI и ГТК (средний R равен 0,92, максимальный 0,96, минимальный 0,68). Полученные результаты высокой согласованности индексов хорошо согласуются с выводами, опубликованными в [2, 7].

На рис. 2 изображены временной ход аномалий влагозапасов в почве в 100 см слое, аномалий SPEI и ГТК в Ростовской (а) и в Орловской (б) областях летом за период 1991–2020 гг. Следует выделить выраженную синхронность между всеми исследуемыми показателями, особенно заметную в экстремально засушливые годы (например, в 2018 и особенно в 2010 гг. Также наблюдается тенденция к усилению засушливых условий в последнее десятилетие (2011–2020 гг.), причем в Ростовской области она проявляется ярче, чем в Орловской области.



а)



б)

Рис. 2. Временной ход аномалий влагозапасов в почве в 100 см слое (1) аномалий SPEI (2) и GTK (3) в Ростовской (а) и в Орловской областях (б) летом за период 1991–2020 гг.

Fig. 2. Dynamics of soil moisture content anomalies in the 100-cm layer (1), SPEI (2) and GTK (3) anomalies in the Rostov (a) and Oryol (б) regions in summer for the period 1991–2020.

Выводы

В статье проанализированы два подхода к оценке засушливых условий: широко используемый в отечественной агрометеорологической практике гидротермический коэффициент Селянинова (GTK) и стандартизованный индекс осадков и испаряемости (SPEI). Проанализирована оценка повторяемости экстремальных засух в сельскохозяйственных районах ЕТР

и Средней Азии в 1991–2020 гг. Показано, что индекс ГТК завышает повторяемость на 5–15 % относительно индекса SPEI.

Также временные ряды индексов за тот же 30-летний период были сопоставлены с данными наблюдений на агрометеорологических станциях за влагозапасами в почве. При таком подходе статистика засух по ГТК и по индексу SPEI за исследуемый период демонстрирует похожие результаты, но индекс SPEI в среднем имеет незначительно более высокие коэффициенты корреляции с данными наблюдений, чем ГТК. Полученные результаты высокой согласованности индексов хорошо согласуются с выводами, опубликованными в работах других авторов. С учетом простоты расчетов гидротермического коэффициента его целесообразно применять в оперативной практике.

Одним из результатов работы также является архив индекса SPEI, рассчитанный по реанализу ERA5, разрешением $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ на временном масштабе от 1 месяца до сезона, который можно в дальнейшем использовать в исследовательской работе и прогностической практике Северо-Евразийского климатического центра для прогноза засушливых условий на сезонных и межгодовых масштабах времени.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект РНФ № 22-17-00247П в ИВМ РАН.

Список литературы

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научное издание технологий, 2022. 124 с.
2. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Туткова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Известия РАН. Серия географическая. 2020. № 2. С. 207-217.
3. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизированного индекса осадков по спутниковой и наземной информации // Труды ГГО. 2014. Вып. 571. С. 147-161.
4. Лебедева В.М., Страшная А.И. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 216 с.
5. Страшная А.И., Тищенко В.А., Береза О.В., Богомолова Н.А. О возможности использования стандартизированного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 357. С. 81-97.
6. Страшная А.И. Использование показателей увлажнения для оценки засушливости и прогноза урожайности зерновых культур в Поволжском экономическом районе // Труды Гидрометцентра России. 1993. Вып. 327. С. 15-22.
7. Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 2. С. 79-94.
8. Begueria S, Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring // Int. J. Climatol. 2014. Vol. 34. P. 3001-3023.
9. Edwards D.C., McKee T.B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales // Climatology Report 97-2. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, 1997. 155 p.
10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. P. 1999-2049.

11. Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23. P. 1696-1718.

12. WMO-No. 1173. Handbook of Drought Indicators and Indices. Geneva: WMO, 2016. 52 p.

References

1. Tretiy ocenochnyy doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiyskoy Federacii. Obshchee rezyume. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii, 2022, 124 s. [in Russ.].

2. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of Drylands in the European Part of Russia: Secular Trends and Links to Droughts. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*. 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207-217 [in Russ.].

3. Kleschenko A. D., Savitskaya O. V. Estimation of space-time distribution yield of grains and Standardized Precipitation Index on satellite and land information. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*. 2014, vol. 571, pp. 147-161 [in Russ.].

4. Lebedeva V.M., Strashnaya A.I. Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. Tom II. Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kniga 2. Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie. Obninsk, VNIIGMI-MCD, 2012, 216 p. [in Russ.].

5. Strashnaya A.I., Tishtshenko V.A., Berioza O.V., Bogomolova N.A. On the possibility to use the standardized precipitation index for detecting droughts and in the forecasts of the quantitative estimates of the productivity of cereal crops and pulse crops. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*. 2015, vol. 357, pp. 81-97 [in Russ.].

6. Strashnaya A.I. Ispol'zovanie pokazateley uvlazhneniya dlya ocenki zasushlivosti i prognoza urozhaynosti zernovykh kul'tur v Povolzhskom ekonomicheskom rayone. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*. 1993, vol. 327, pp. 15-22 [in Russ.].

7. Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. On the comparability of some quantitative drought indices. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya [Fundamental and Applied Climatology]*. 2016, vol. 2, pp. 79-94 [in Russ.].

8. Beguería S, Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol*. 2014, vol. 34, pp. 3001-3023.

9. Edwards D.C., McKee T.B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report 97-2*. Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, 1997, 155 p.

10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020, vol. 146, pp. 1999-2049.

11. Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*. 2010, vol. 23, pp. 1696-1718.

12. WMO-No. 1173. Handbook of Drought Indicators and Indices. Geneva, WMO, 2016, 52 p.

Поступила 13.11.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 13.11.2025; accepted for publication 26.11.2025.