

ГИДРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

HYDROLOGY AND CLIMATOLOGY

УДК 551.509.331

Арушанов М.Л., Эшмуратова Г.Ш.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Ташкент, Узбекистан**МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОЙ ЗАСУШЛИВОСТИ НА ОСНОВЕ РАСЧЁТА
МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНДЕКСА SPI НА ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА**

Аннотация. В статье рассмотрена возможность использования индекса засушливости SPI в целях его мониторинга на предмет оценки риска возникновения на территории Узбекистана засушливых периодов. Проведен статистический анализ засушливости и увлажненности на территории Узбекистана в различные месяцы года, сезона, полугодия и года. В качестве количественной меры интенсивности засушливости и увлажненности использовался индекс SPI, рассчитанный за период с 1954 по 2018 годы. Вычисление этого индекса было модифицировано, что, с одной стороны, значительно упрощает вычислительную процедуру, с другой стороны, исключает некоторую некорректность в использовании гамма-функции (при нулевой вероятности осадков гамма-функция не определена). Показано, что модифицированный (в рамках вычислительного процесса) индекс SPI, его пространственное распределение, как функция времени года, хорошо согласуется с агроклиматическим районированием территории Узбекистана, что позволяет использовать индекс засушливости SPI в целях проведения мониторинга колебаний влажностных и засушливых периодов. Информация о таких колебаниях позволяет подойти к решению задачи прогноза месячной, сезонной, полугодовой, годовой и на вегетационный период засухи.

Ключевые слова: реанализы, осадки, гамма-функция, кумулятивная вероятность, полиномиальная аппроксимация, индекс засушливости SPI.

Arushanov M.L., Eshmuratova G.Sh.

Research Hydrometeorological Institute, Tashkent, Uzbekistan

**MONITORING OF ATMOSPHERIC DRYITY BASED ON THE CALCULATION OF
THE MODIFIED SPI INDEX ON THE TERRITORY OF UZBEKISTAN**

Abstract. The article considers the possibility of using the SPI aridity index for the purpose of its monitoring in order to assess the risk of dry periods on the territory of Uzbekistan. A statistical analysis of aridity and humidity in the territory of Uzbekistan was carried out in different months of the year, season, half year and year. As a quantitative measure of the intensity of aridity and moisture, the SPI index was used, calculated for the period from 1954 to 2018. The calculation of this index has been modified, which, on the one hand, greatly simplifies the computational procedure, on the other hand, eliminates some incorrectness in the use of the gamma function (when the probability of precipitation is zero, the gamma function is not defined). It is shown that the modified (within the framework of the computational process) SPI index, its spatial distribution, as a function of the season, is in good agreement with the agro-climatic zoning of the territory of Uzbekistan, which makes it possible to use the SPI aridity index in order to monitor fluctuations in humidity and dry periods. Information about such fluctuations makes it possible to approach the solution of the problem of forecasting monthly, seasonal, semi-annual, annual and growing season droughts.

Key words: *reanalyzes, precipitation, gamma function, cumulative probability, polynomial approximation, dryness index SPI.*

Введение и постановка проблемы. Являясь естественной составляющей климата, атмосферная засушливость в своём экстремальном проявлении, называемом засухой, может происходить в любой части планеты [8]. В глобальном масштабе атмосферная засуха случается в той или иной географической области ежегодно и по своей сути относится к категории природных опасных явлений, оказывая негативное влияние на различные секторы экономики. Из всех существующих опасных метеорологических явлений засуха наиболее «удобное» явление с точки зрения проведения его мониторинга, поскольку наступление собственно засухи требует продолжительного времени, что позволяет проследивать динамику количества выпавших осадков, динамику температуры и др.

Смягчение следствий явления «засуха» возможно при прослеживании потенциально опасных факторов на определённых временных масштабах при наличии системы заблаговременного предупреждения о засухе – мониторинга и прогноза.

В научных исследованиях и практической работе метеорологических организаций в целях количественной оценки степени засушливости определённого периода года (месячного, сезонного, полугодового, годового) применяются индексы засушливости [2,4,7-10,14,15] – удобные количественные показатели, характеризующие степень засушливости в тех или иных физико-климатических условиях. Обзор их использования в метеорологических исследованиях и практической работе приведён в работах [9,10]. Начиная с работы [14], в агрометеорологических исследованиях для мониторинга засух широко используется стандартизированный индекс осадков SPI (*The Standardized Precipitation Index*), рекомендованный Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО). По сути, индекс SPI – это преобразованная величина количества осадков, имеющая нормальное распределение. Индекс засушливости представляет собой параметр, характеризующий вектор динамики атмосферных процессов, направленный в сторону развития влажностных периодов ($SPI > 0$), либо засух ($SPI < 0$) или близких к норме состояний атмосферы ($SPI \approx 0$). В климатических условиях Узбекистана с резко континентальным климатом, усугубляющимся наблюдаемой тенденцией роста глобальной температуры, этот индекс имеет особо важное значение, прежде всего, с позиций аграрного сектора.

В целях мониторинга явления «засуха» нами рассматривается индекс засушливости SPI [14,15], позволяющий определять интенсивность, географическую область, время наступления и завершения процесса засушливости. В данной статье это явление рассматривается с точки зрения климатической засушливости на территории Узбекистана по расчётным значениям среднемесячных, сезонных, полугодовых, годовых SPI и его климатических значений за вегетационный период по 65-летней выборке об осадках (1954-2018 гг.). Отметим, что в данной работе не ставилась задача исследования динамики индекса SPI в связи с наблюдаемым глобальным положительным трендом температуры, а только задача выявления по индексу SPI влажностных и засушливых географических областей на территории Узбекистана и их мониторинг.

Изученность проблемы. Изменения глобального и регионального климата, вызванные изменением циркуляционных режимов атмосферы, проявляются в изменении частоты засушливых сезонов, что прямо влияет на показатели аграрного сектора. Этот факт не остался без внимания Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), которая констатировала, что наблюдаемые тренды глобальных климатических параметров указывают на возможность значительных изменений параметров климата и биосферы Земли. Засуха и чрезмерное увлажнение являются объектами детальных исследований учёных ближнего и дальнего зарубежья.

Климатические прогнозы демонстрируют глобальное потепление и увеличение площади засушливых областей, которые уже сегодня покрывают до 1/5 от всей поверхности земли. В связи с этим наибольшее внимание уделено изучению динамики засушливых зон на основе проведения оперативного мониторинга индексов засушливости, что позволяет принимать правильные стратегические и управленческие решения, так как опустынивание земель и продолжительные засухи напрямую влияют на экономико-социальную сферу.

Цель и задачи работы связаны с разработкой технологии мониторинга атмосферной засухи на территории Узбекистана, определением времени наступления и завершения процесса засушливости.

Материалы и методы. Для построения кумулятивной вероятности $H(p)$ использовались временные ряды реанализов ERA5 [12] среднемесячных осадков с шагом сетки $2,5 \times 2,5^\circ$ с 1954 по 2018 годы для территории, ограниченной широтами $37,5 - 47,5^\circ$ с. ш. и долготами $55 - 75^\circ$ в. д.

Метод расчета индекса SPI. Стремление получения индекса засушливости в стандартизованном виде приводит к выражению трансформированной кумулятивной вероятности [14]

$$H(p) = q + (1 - q) * G(p), \quad (1)$$

где q – вероятности нулевых осадков, а

$$G(p) = \int_0^p g(p) dp = \frac{1}{\beta^a \Gamma(a)} \int_0^p p^{(a)} \exp\left(-\frac{p}{\beta}\right) dp. \quad (2)$$

В (2) $G(p)$ – кумулятивная функция распределения вероятностей, $\Gamma(a)$ – гамма-функция, a, β – параметры масштаба и формы. С учётом (2) собственно индекс SPI вычисляется на основании соотношения [5,8]

$$SPI = \mp \left[\frac{1}{(k - H(p))^2} * \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]. \quad (3)$$

В (3) $t = 1/[(k - H(p))^2]$, знак « \leftarrow » для $0 < H(p) \leq 0,5$; знак « \rightarrow » для $0,5 < H(p) < 1$; $k=0$ при $0 < H(p) \leq 0,5$ и $k=1$ при $0,5 < H(p) < 1$; $c_i, d_j = \text{const}$ – расчётные коэффициенты.

Выражение (2) включает трансформированную кумулятивную функцию, вычисляемую на основе гаммы функции. При рассмотрении временных рядов осадков, последняя не определена для $p = 0$ и $q = P(x = 0) > 0$, что влечёт за собой определённые «неудобства» при расчёте гамма-функции. Кроме того, на этапе промежуточных вычислений, может возникнуть проблема с верхним пределом представления действительных чисел при вычислении выражения β^a . Все эти «неудобства» легко обходятся, минуя в целом рассмотрение гамма-функции, единожды вычислив коэффициенты c_i, d_j . Действительно, в формуле (3) кумулятивную вероятность $H(p)$ для общего количества осадков, включая $p = 0$, при котором гамма-функция неопределенна, можно получить на основе эмпирического распределения $\hat{H}(p)$, которое с требуемой точностью аппроксимируется полиномом 3-ей степени. Таким образом, выражение (1) можно представить без потери точности в виде

$$\hat{H}(p) = q + (1 - g) \cdot (A_0 + A_1 + A_2^2 + A_3^3) \quad (4)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – коэффициенты полинома. В работе [1] была выполнена оценка модифицированного уравнения (1), которая показала совпадения результатов вычисления SPI до третьего знака, вычисленного по формуле (3) с использованием гамма-функции и по формуле (4) на основе полинома 3-ей степени.

Результаты и их обсуждение. Прежде чем перейти к анализу результатов пространственного распределения SPI по территории Узбекистана и сопредельных стран отметим следующее.

Потенциально опасные факторы, способствующие возникновению атмосферной засухи, на фоне синоптических процессов определяются локальными особенностями географической области, которая характеризуется разнообразием ландшафтов. Характерные ландшафты территории Узбекистана представлены пустынями, степями, горными массивами. Выделяются четыре ярко выраженных ландшафта [11]: пустыни и равнины (чуль), предгорья и холмы (адыр), горы (тау), высокогорья (джайлау). В свою очередь, эти ландшафты на основе агроклиматического районирования делятся на 12 агроклиматических округов (рис. 1) [3]. В целом это разнообразие может быть обобщено как равнинные и подгорно-горные области, которые при установившихся циркуляционных процессах определяют степень риска потенциально опасных факторов возникновения засухи.

На рис. 2 представлено пространственное климатическое распределение среднемесячных значений индекса засушливости SPI, а на рис. 3 – сезонное, полугодовое, годовое и за вегетационный период на территории Узбекистана и сопредельных стран. Как следует из рис. 2,3 наиболее засушливые месяцы в климатическом отношении приходятся на июнь-октябрь и летний сезон, что полностью согласуется с многолетними наблюдениями [3]. При этом в осенний сезон и второе полугодие выделяются области засушливости, захватывающие Нижнеамударьинский и Приаральский агроклиматические округа с отрицательным максимумом SPI в Нижнеамударьинском (SPI = -0.25). Наибольшая климатическая засушливость характерна для Устюртского агроклиматического округа в марте месяце, а в летний сезон здесь отмечается относительно других округов повышенная влажность.

Как следует из полученных распределений SPI и агроклиматического районирования территории Узбекистана, в целом можно отметить их хорошее согласие, откуда следует его достаточная информативность в отношении оценки риска засушливости в той или иной географической области. Последнее указывает на то, что SPI может быть успешно использован в задаче мониторинга засушливости.

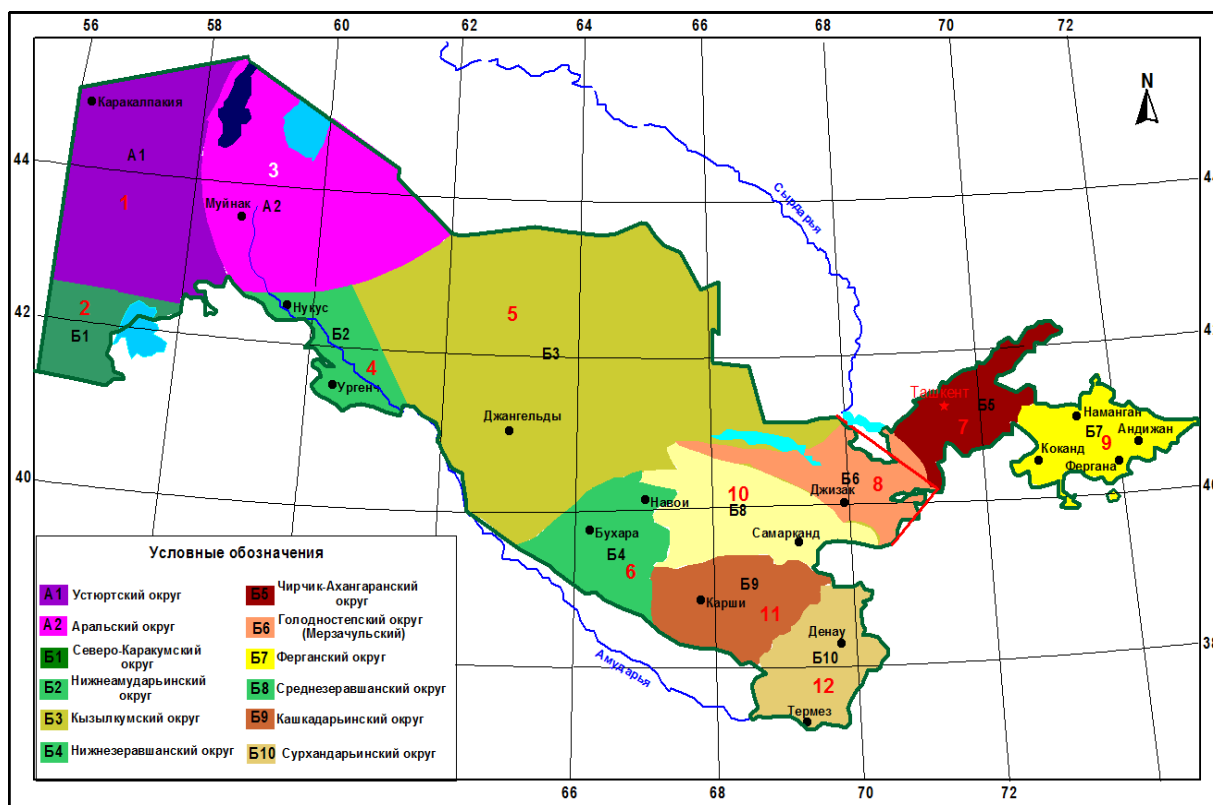


Рис. 1. Агроклиматическое районирование территории Узбекистана

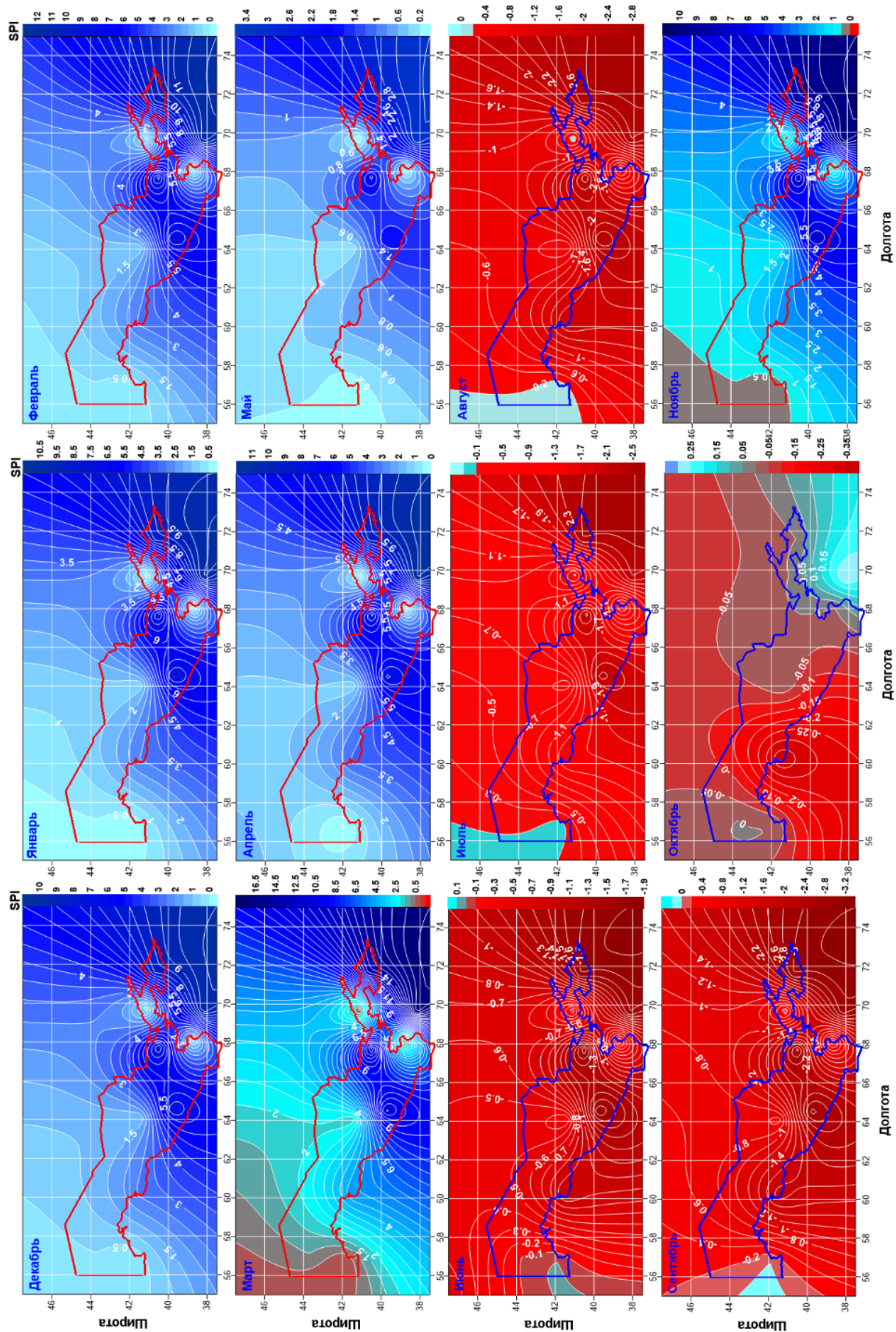


Рис. 2. Климатическое пространственное распределение среднемесячных значений индекса SPI

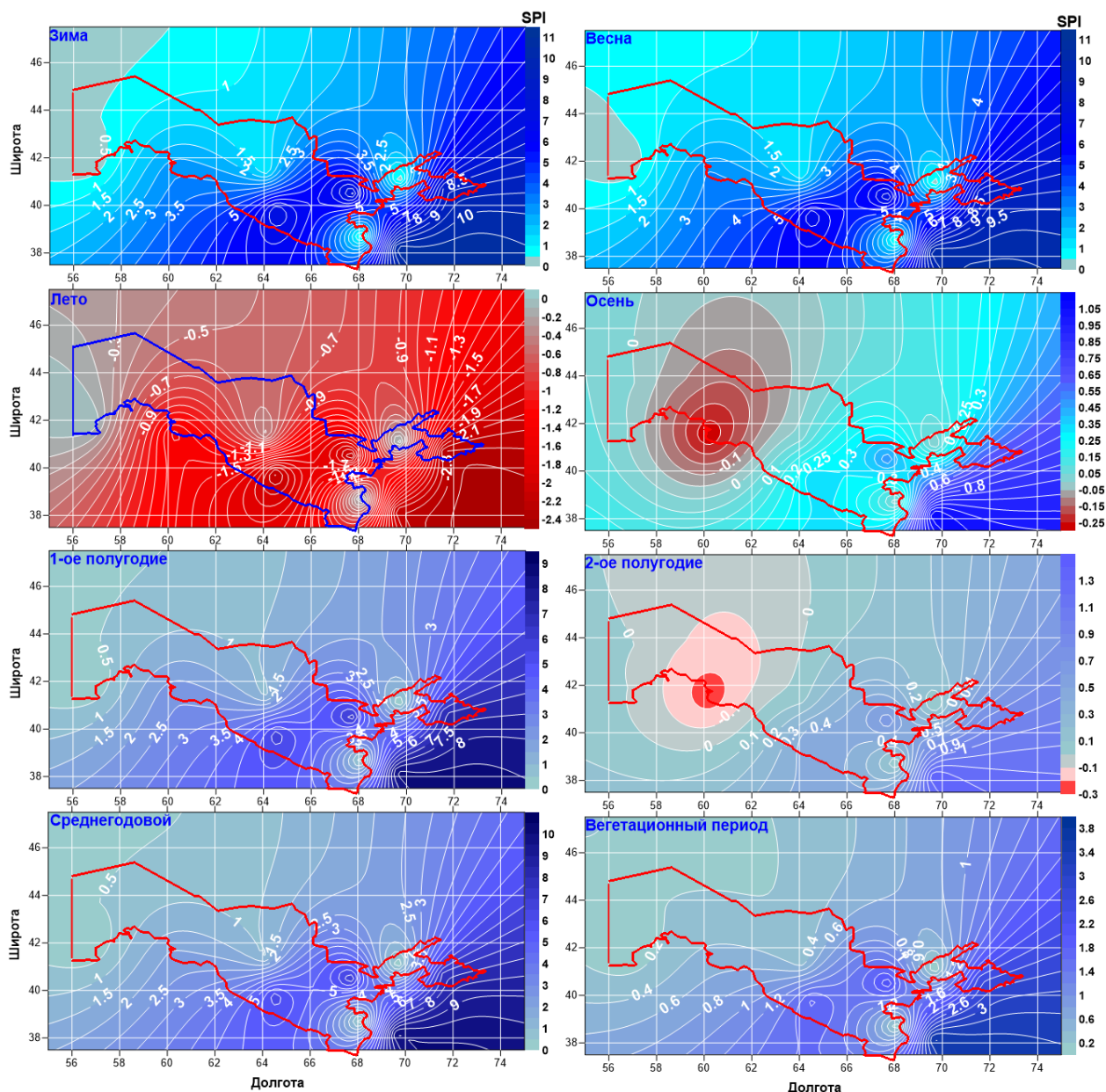


Рис. 3. Климатическое пространственное распределение сезонных, полугодовых, годовых и за вегетационный период значений индекса SPI

Выводы. Модификация кумулятивной вероятности в выражение индекса засушливости SPI путём замены гамма-функции полиномом 3-ей степени значительно упрощает вычислительный процесс и устанавливает математическую корректность выражения. Индекс засушливости SPI в силу его информативности может быть использован в решении задачи мониторинга засушливости на территории Узбекистана. Создание системы мониторинга колебаний влажностных и засушливых периодов позволяет корректно подойти к решению задачи прогноза месячной, сезонной, полугодовой, годовой и на вегетационный период засухи.

Использованная литература:

1. Арушанов М.Л., Рахматова Н.И. Простой метод расчёта индекса засушливости SPI на основе аппроксимации кубическим полиномом эмпирической функции частоты распределения осадков // Географическая наука Узбекистана и России: общие проблемы, потенциал и перспективы сотрудничества / Отв. ред. Ф.Х. Хикматов и А.Г. Дружинин. Материалы Международной научно-практической конференции. Ташкент, 2019. С. 44-47.

2. Иванов Н.Н. Показатель биологической эффективности климата // Известия ВГО, 1962. т. 94, №1. С. 65-70.
3. Исследование по оценке проблем засухи и моделей мониторинга засух в Центральной Азии. Ташкент: Центр по чрезвычайным ситуациям и снижению риска стихийных бедствий, 2020. 57 с.
4. Педь Д.А. О показателе влажности и избыточного увлажнения // Труды ГМЦ СССР. 1975. № 156. С. 19-38.
5. Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Оценка рисков возникновения чрезвычайных ситуаций // XI научно-практическая конференция. 5–6 октября 2011. Доклады и выступления. Москва: Центр «Антистихия», 2012. С. 230–236.
6. Садыков А.С., Акрамов З.М. Атлас Узбекистана. Ташкент, 2011. 124 с.
7. Селянинов Г.Т. О сельскохозяйственной оценке климата // Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928. № 2. С. 165-177.
8. Справочник по показателям и индексам засушливости. ВМО: Комплексная программа борьбы с засухой (КПБЗ). 2016. 53 с.
9. Уткузова Д.Н., Вильфанд Р.М., Хан В.М., Ганиева Е.С. Синоптический анализ экстремальной засушливости и увлажнённости на территории Российской Федерации // Биосфера. 2015. Т. 7. № 1. С. 50-60.
10. Уткузова Д.Н., Хан В.М., Вильфанд Р.М. Статистический анализ эпизодов экстремальной засушливости и увлажнённости на территории РФ // Оптика атмосферы и океана. 2015. Том 28. № 1 (312). С. 66–75.
11. Чуб В.Е. Изменение климата и его влияние на гидрометеорологические процессы, агроклиматические и водные ресурсы Республики Узбекистан. Ташкент: НИГМИ, 2007. 132 с.
12. Электронный ресурс: Реанализы ERA5. Электронный доступ: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era20cdaily/levtype=sfc/type=an/>
13. Guttman N.B. (1999), Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 35 (2), pp. 311–322.
14. McKee T.B., Doesken N.J. and Kleist J. (1993), The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Preprints, 8th Conference on applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, Ca*, pp. 179-184.
15. Standardized Precipitation Index (2012), *User Guide, WMO*, vol. 1090, 18 p.

References:

1. Arushanov M.L., Rakhmatova N.I. (2019), A simple method for calculating the aridity index SPI based on cubic polynomial approximation of the empirical function of precipitation distribution frequency, *Geographical science of Uzbekistan and Russia: common problems, potential and prospects for cooperation / Ed. by F.Kh. Khikmatov and A.G. Druzhinin. Materials of the International scientific-practical conference*. Tashkent, pp. 44-47. (In Russ.).
2. Ivanov N.N. (1962), The indicator of the biological effectiveness of the climate, *Izvestia of the VGO*, vol. 94, No. 1, pp. 65-70. (In Russ.).
3. *Study on the assessment of drought problems and drought monitoring models in Central Asia* (2020), Tashkent, 57 p. (In Russ.).
4. Ped D.A. (1975), On indicators of humidity and excessive moisture, *Proceedings of State Medical Center of the USSR*, No. 156, pp. 19-38. (In Russ.).
5. Problems of forecasting emergency situations. Risk assessment emergency situations (2012), *XI scientific-practical conference. October 5-6, 2011. Reports and speeches*, Moscow, pp. 230-236. (In Russ.).
6. Sadykov A.S., Akramov Z.M. (2011), *Atlas of Uzbekistan*, Tashkent, 124 p. (In Russ.).
7. Selyaninov G.T. (1928), On the agricultural climate assessment, *Proceedings on agricultural meteorology*, No. 2, pp. 165-177. (In Russ.).
8. *Handbook of indicators and indices of aridity* (2016), WMO: Integrated Drought Management Program (IDMP), 53 p. (In Russ.).
9. Utkuzova D.N., Vilfand R.M., Khan V.M., Ganieva E.S. (2015), Synoptic analysis extreme aridity and humidity on the territory of the Russian Federation, *Biosphere*, vol. 7, No. 1, pp. 50-60. (In Russ.).

10. Utkuzova D.N., Khan V.M., Vilfand R.M. (2015), Statistical analysis of episodes of extreme aridity and humidity on the territory of the Russian Federation, *Optics of the atmosphere and the ocean*, Vol. 28, No. 1 (312), pp. 66–75. (In Russ.).
11. Chub V.E. (2007), *Climate change and its impact on hydrometeorological processes, agro-climatic and water resources of the Republic of Uzbekistan*, Tashkent, 132 p. (In Russ.).
12. Electronic resource: ERA5 reanalyzes. Electronic access: http://apps.ecmwf.int/datasets/data/era20_cdaily/levtype=sfc/type=an/
13. Guttman N.B. (1999), Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 35 (2), pp. 311–322.
14. McKee T.B., Doesken N.J. and Kleist J. (1993), The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Preprints, 8th Conference on applied Climatology, 17-22 January*, Anaheim, Ca, pp. 179-184.
15. *Standardized Precipitation Index* (2012), User Guide, WMO, vol. 1090, 18 p.

Сведения об авторах:

Арушанов Михаил Львович – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), доктор географических наук, профессор. E-mail: mikl-arushanov@rambler.ru.

Эшмуратова Гулчехра Шавкатовна – Научно-исследовательский гидрометеорологический институт (Ташкент, Узбекистан), базовый докторант.

Information about the authors:

Arushanov Mikhail – Research Hydrometeorological Institute (Tashkent, Uzbekistan), Doctor of geographical sciences, Professor. E-mail: mikl-arushanov@rambler.ru.

Eshmuratova Gulchekhra – Research Hydrometeorological Institute (Tashkent, Uzbekistan), basic doctoral student.

Для цитирования:

Арушанов М.Л., Эшмуратова Г.Ш. Мониторинг атмосферной засушливости на основе расчёта модифицированного индекса SPI на территории Узбекистана // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2022. № 3-4. С. 50-57.

For citation:

Arushanov M.L., Eshmuratova G.Sh. (2022), Monitoring of atmospheric dryity based on the calculation of the modified SPI index on the territory of Uzbekistan, *Central Asian Journal of Geographical Researches*, No. 3-4. pp. 50-57. (In Russ.).