

УДК 551.502.4

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО ИНДЕКСА ОСАДКОВ (SPI)**Салмин А.С., Асауляк И.Ф., Белолюбцев А.И.***ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Москва, e-mail: adotsalmin@gmail.com, irasaulak@mail.ru, belolyubcev@mail.ru*

Стандартизированный индекс осадков (SPI) – это простой и в то же время гибкий инструмент для идентификации засушливых и переувлажненных периодов. Данный индекс не зависит от географического положения и может применяться в различных временных масштабах. Цель настоящей работы заключается в проведении статистического анализа временных рядов показателя одномесячного SPI для Ростовской области за период 1990–2020 гг. Для достижения поставленной цели были решены задачи по реализации программы для расчета SPI, формированию базы данных осадков и оценке описательной статистики временных рядов индекса для исследуемого региона. Обнаружены статистически значимые отрицательные тренды, динамики межгодовой изменчивости стандартизированного индекса осадков, с помощью непараметрического метода теста Манна – Кендалла. Учитывая современные тенденции глобального изменения климата, исследуемый период был разбит на три десятилетия, и по результатам сравнительного анализа описательной статистики период с 2010 по 2020 г. оказался самым засушливым, а в 2020 г. сформировалась катастрофическая засуха, вызванная антициклональным режимом погоды. Наибольшая увлажненность наблюдалась в период с 2000 по 2010 г., также на этом временном отрезке зафиксировано наибольшее число экстремальных ситуаций, связанных как с засухой, так и с избыточным увлажнением. При анализе трендов изменчивости SPI по месяцам было выявлено, что большая часть полученных тенденций не проходят критерий достоверности ($p\text{-value} \leq 0,05$), за исключением августа, где отмечены наибольший темп отрицательных изменений индекса с каждым годом.

Ключевые слова: стандартизированный индекс осадков, SPI, Ростовская область, засуха, тест Манна–Кендалла, Python

ANALYSING TIME SERIES OF STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI)**Salmin A.S., Asaulyak I.F., Belolyubtsev A.I.***Russian State Agrarian University – MAA named after K.A. Timiryazev, Moscow, e-mail: adotsalmin@gmail.com, irasaulak@mail.ru, belolyubcev@mail.ru*

The Standardized Precipitation Index (SPI) is a simple and flexible tool for identifying dry and wet periods. This index does not depend on the geographical location, and can be applied at different time scales. The purpose of this work is to provide a statistical analysis of the time series of the one-month SPI indicator for the Rostov region for the period 1990–2020. To achieve this goal, the tasks of implementing a program for calculating SPI, forming a precipitation database, and evaluating the descriptive statistics of the time series of the index for the studied region were solved. This research contains statistical analysis of time series of the one-month SPI values for Rostov region over a period of 1990–2020. With the help of nonparametric method Mann-Kendall test statistically significant trends in dynamics of interannual standardized precipitation index volatility were identified. Taking into account the current trends of global climate change, the researched period was split into 3 terms, and, based on the results of descriptive statistics comparative analysis, the period of 2010–2020 appeared to be the droughtiest, but in 2020, the extreme drought was formed, caused by an anticyclonic weather regime. According to the volatility trends analysis, monthly SPI showed that the majority of tendencies identified do not pass the validation criterion ($p\text{-value} \leq 0.05$), apart from August, when the fastest pace of the negative index changes from year to year was registered.

Keywords: standardized precipitation index, SPI, Rostov region, meteorological drought, test Mann-Kendall, Python

Стандартизированный индекс осадков (SPI – Standardized Precipitation Index) представляет собой количественную оценку влагообеспеченности исследуемой территории. С помощью данной оценки возможно проводить мониторинг и прогнозирование продолжительности, интенсивности атмосферной засухи, в том числе дождливых периодов. Индекс был разработан в 1993 г. американскими учеными Макки, Доускен, Клайст для количественной меры воздействия дефицита осадков на различные водные ресурсы [1]. В 2011 г. ВМО принял Линкольнскую декларацию по индексам засухи, рекомендуемую всем метеорологиче-

ским и гидрологическим службам использовать показатель SPI. Индекс приобрел большую популярность и активно используется в оперативной и исследовательской гидрометеорологической практике в более чем 70 странах мира [2]. Стоит отметить, что показатель SPI активно применяется в отечественных агрометеорологических исследованиях для прогноза урожайности и оценки метеорологических условий вегетационного периода сельскохозяйственных культур [3, 4].

SPI является простым и гибким инструментом для идентификации засухи или избыточной влагообеспеченности. Индекс

не зависит от географического положения, что придает ему свойство пространственной инвариантности и распределенности, а лаг временного ряда сумм осадков, на основе которых рассчитывается стандартизированный индекс, может принимать значения от месяца и более. По мере увеличения временного лага SPI слабее реагирует на краткосрочные изменения количества осадков, и циклы положительных (влажных условий) и отрицательных (засушливых условий) значений становятся более заметными [5]. Важно отметить, что для получения адекватных значений индекса временной ряд должен охватывать минимум 30 лет наблюдений. В рамках исследования используется одномесячный SPI, поскольку он отражает краткосрочные условия увлажнения, которые являются ключевыми во время вегетационного периода сельскохозяйственных культур, и сильнее коррелирует с атмосферными и почвенными типами засух [2].

Целью настоящей работы является анализ временных рядов одномесячного SPI в Ростовской области за период с 1990 по 2020 г. В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:

- 1) сформировать базу данных месячных сумм осадков для Ростовской области за исследуемый период;
- 2) реализовать программу для автоматического расчета SPI по значениям осадков;
- 3) провести оценку трендов динамики межгодовой изменчивости SPI и в разрезе каждого месяца.

Материалы и методы исследования

Основным методом исследования является вариационный анализ, а для оценки статистической значимости трендов использовался непараметрический метод теста трендов Манна – Кендала. В дополнение к этому для сглаживания временных рядов использовался биномиальный фильтр.

В качестве района исследования выступает Ростовская область. Она расположена в южной части Восточно-Европейской равнины, между 50-й и 46-й параллелями северной широты, занимая площадь 100,8 тыс. км², что составляет около 0,6% территории России. Регион вытянут в меридиональном направлении на 470 км и в широтном на 455 км. Климат области умеренно континентальный, и при этом континуальность возрастает с запада на восток. Подстилающая поверхность представлена преимущественно равнинами. При средней высоте

над уровнем моря 125 м отсутствуют существенные различия в уровнях высот, тем самым не оказывая особого влияния на движение воздушных масс. Атмосферная циркуляция обусловлена влиянием в теплое время от тропиками азорского и в холодное азиатского барического максимума, а также время от времени происходящими в широтном направлении циклоническими возмущениями. Среднее годовое количество осадков – 423 мм, оно уменьшается с юго-запада на восток и юго-восток от 550 до 300 мм [6].

Для проведения статистического анализа использовались данные за период с 1990 по 2020 г. с шести наземных гидрометеорологических станций (ГМС), имеющих следующие синоптические индексы: 34432, 34646, 34730, 34720, 34740, 34759. Данная метеорологическая информация была получена из архива гидрометеорологического банка данных АЙСОРИ [7], и также были предоставлены дополнительные сведения по осадкам от сотрудников ВНИИСХМ. С целью автоматизированного расчета параметра SPI для Ростовской области, в рамках данного исследования, авторами была написана программа на языке Python версии 3.6.8, с использованием библиотек для научных вычислений: NumPy, Matplotlib, Geopandas. Верификация расчета индекса SPI проводилась путем сравнения результатов, полученных по программе, созданной Научным центром по смягчению последствий засухи (NDMC) [8], и получаемых по программе, написанной авторами. Сравнительный анализ показал отсутствие расхождений, и в дальнейшем использовалась программа, реализованная авторами настоящей работы. Исходный код программы выложен в открытый доступ [9].

Расчет и интерпретация показателя SPI

При расчете индекса единственным исходным параметром является сумма осадков. С одной стороны, такой подход упрощает процедуру расчета индекса и делает его универсальным с точки зрения анализа сухих и влажных периодов. С другой стороны, в отсутствие учета таких параметров, как температура и дефицит влажности воздуха, значения индекса могут быть неверно интерпретированы при оценке атмосферной засухи для определенных климатических сценариев, поскольку данное явление по своей сути является результатом комбинации термического и влажностного режима [10].

В основе SPI лежит положение, согласно которому влагообеспеченность террито-

рии рассматривается с позиции нормализованных (стандартизированных) данных об осадках. Однако в большинстве случаев распределение сумм осадков, накопленных за период от 12 месяцев и менее, не соответствует нормальному, и для решения данной проблемы, которая возникает для расчета SPI, используется аппроксимация частотного распределения осадков через функцию плотности вероятности гамма-распределения [11]. Стоит отметить, что эмпирическое распределение данных об осадках не ограничивается приближением гамма-функции. Существует ряд других статистических распределений, которые в зависимости от района исследования или временного масштаба превосходят аппроксимацию гамма-распределением, и среди них выделяют распределение Пуассона, логнормальное, и в некоторых случаях распределение Гаусса без дополнительных преобразований [12]. В настоящей работе используется двухпараметрическое гамма-распределение.

Таким образом, SPI вычисляется путем подгонки функции плотности вероятности к частотному распределению месячных сумм осадков, при этом вероятности значений индекса нормально распределены, следовательно, среднее значение SPI для исследуемой территории в рассматриваемый период равно нулю, а среднеквадратическое отклонение – единице. При таком подходе значения индекса представляют собой число стандартных отклонений от средней суммы осадков, соответственно, появляется возможность одинаковым образом оценивать сухие и влажные периоды: положительные значения указывают на объем осадков выше среднего, а отрицательные – на дефицит осадков.

В настоящей работе реализация алгоритма расчета одномесячного SPI сведена к нескольким этапам. На первом этапе строится частотное распределение сумм осадков и вычисляется функция плотности вероятности (ФПВ) гамма-распределения, которая наилучшим образом аппроксимирует распределение фактических значений. Такая процедура проводится итерационно для каждой ГМС с выбранным временным лагом:

$$g_{\alpha,\beta}(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}},$$

$$\alpha > 0, \beta > 0, x \geq 0, \quad (1)$$

где α – параметр, отвечающий за асимметричность (форму) ФПВ гамма-распреде-

ления, β – параметр масштаба, определяющий горизонтальное растяжение-сжатие кривой распределения, x – сумма месячных осадков, $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера:

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx. \quad (2)$$

Для подгонки функции гамма-распределения требуется провести оценку α , β . В работе [13] был предложен оптимальный способ нахождения оценок этих параметров с помощью аппроксимации на основе метода максимального правдоподобия:

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{X}}{\alpha}, \quad (4)$$

где для n наблюдений

$$A = \ln(\bar{X}) - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (5)$$

Пример построения частотного распределения сумм осадков за июнь для Ростовской области продемонстрирован на рис. 1.

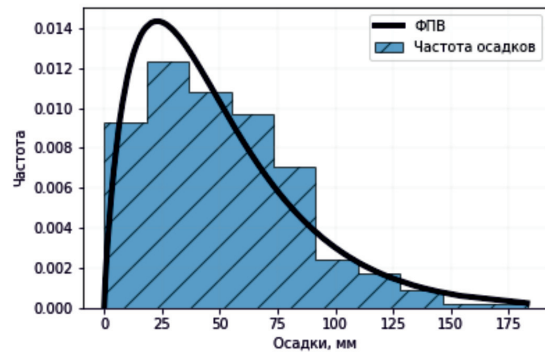


Рис. 1. Аппроксимация гамма-функцией частотного распределения осадков за июнь для Ростовской области полученных с ГМС за 1990–2020 гг.

На следующем этапе ФПВ гамма-распределения трансформируется в кумулятивную функцию распределения:

$$G_{\alpha,\beta}(x) = \int_0^x g_{\alpha,\beta}(x) dx. \quad (6)$$

Поскольку гамма-распределение не определено для $x = 0$ и $q = P(x = 0) > 0$, где $P(x = 0) =$

вероятность нулевых осадков, то следует произвести поправку для кумулятивной функции распределения на вероятность нулевых осадков:

$$H(x) = q + (1 - q)G_{\alpha, \beta}(x). \quad (7)$$

Последним шагом в алгоритме расчета индекса является процедура по приведению месячных сумм осадков к значениям SPI, за счет трансформации кумулятивной функции в распределение Гаусса. Процесс оценки индекса через накопленную вероятность и преобразование эмпирической функции в нормальную функцию распределения вероятности проиллюстрированы на рис. 2.

Используя рассчитанные значения индекса SPI, можно дать функциональное и качественное определение засухи или переувлажненности для различных временных масштабов. Авторы, разработавшие индекс,

выделили критерии для определения типа увлажнения, представленные в табл. 1.

Статистический анализ временных рядов SPI

Анализ временных рядов стандартизованного индекса осадков базировался на определении следующих статистических характеристик: медиана, перцентили, эксцесс, асимметрия, СКО и размах. На фоне современных тенденций глобального изменения климата было принято решение разделить исследуемый период на три десятилетия: I – период 1990–2000 гг., II – отрезок с 2000 по 2010 г. и III – временной период, охватывающий 2010–2020 гг. Для каждого временного отрезка рассчитывались перечисленные выше характеристики. Результаты расчетных статистических параметров представлены в табл. 2.

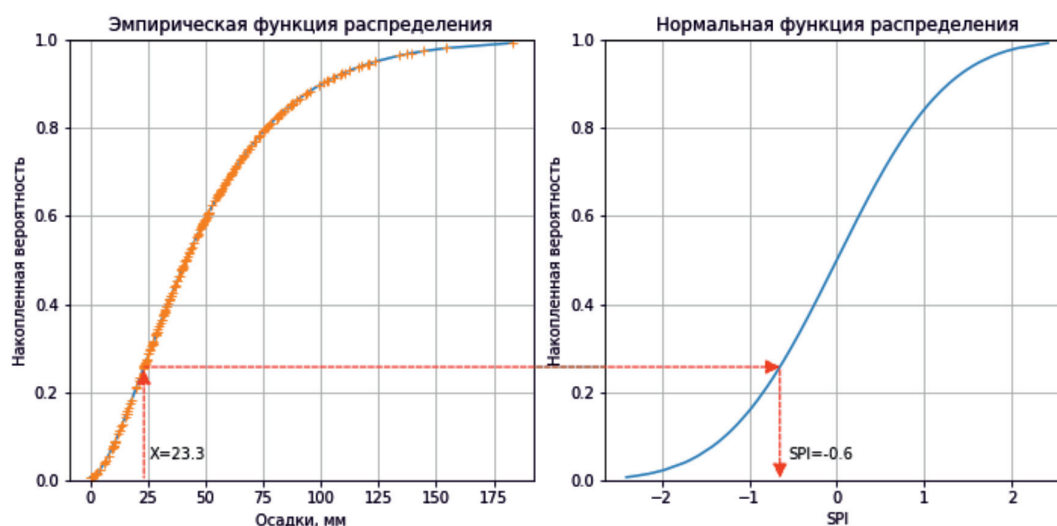


Рис. 2. Трансформация сумм осадков за июнь в значения одномесячного SPI для Ростовской области

Таблица 1

Критерии увлаженности по SPI и соответствующие им вероятности

Значение SPI	Категория	Вероятность, %
2,00 и более	Экстремальное увлажнение	2,3
от 1,5 до 1,99	Сильное увлажнение	4,4
от 1,00 до 1,49	Умеренное увлажнение	9,2
от 0,0 до 0,99	Мягкое увлажнение	34,1
от 0,0 до -0,99	Слабая засушливость	34,1
от -1,00 до -1,49	Умеренная засушливость	9,2
от -1,5 до -1,99	Серьезная засуха	4,4
-2,00 и менее	Экстремальная засуха	2,3

Таблица 2

Результаты расчетов статистических характеристик

Период	25-й процентиль	Медиана	75-й процентиль	СКО	Макс		Мин		Асимметрия	Экссесс
					год	год				
1	2	3	4	5	6		7		8	9
I	-0,58	0,06	0,75	0,95	2,9	1997	-3,58	1993	-0,17	-0,03
II	-0,67	0,19	0,83	1,13	2,65	2000	-3,51	2003	-0,33	0,1
III	-0,73	-0,09	0,63	1,01	2,8	2013	-3,67	2020	-0,31	0,21

В рамках рассматриваемых десятилетий в Ростовской области происходит смещение значений одномесячного SPI в сторону отрицательной области, т.е. к градации слабой засухи. На это указывает наличие тенденций уменьшения 25-го перцентиля в течение 30 лет. Однако коэффициент асимметрии во всех отрезках времени остается левосторонним, а эксцесс незначительно повышается, что говорит о преобладании месяцев с мягким увлажнением над слабо засушливыми по критериям увлажнённости SPI.

В первое десятилетие наблюдается абсолютный максимум SPI, что в терминах индекса интерпретируется как экстремальное увлажнение, которое отмечено в 1997 г., и наряду с этим была также отмечена экстремальная засуха в 1993 г. Асимметрия, эксцесс и медиана ближе всего находятся к нулю, следовательно, для этого отрезка времени характерна сбалансированность засушливых и увлажненных ситуаций. Во втором десятилетии обнаруживается наибольшая встречаемость месяцев с достаточной влагообеспеченностью, это подтверждается отрицательным значением асимметрии, положительным эксцессом и медианой выше нуля. Для этого периода также характерно наибольшее число экстремальных ситуаций, связанных и с засухой, и с увлажнением, об этом свидетельствует максимальное значение СКО среди рассматриваемых периодов, а также большой межквартильный размах. В третьем десятилетии по медиане, т.е. в 50% месяцев, наблюдаются значения ниже нуля, следовательно, влагообеспеченность месяцев несколько ниже относительно двух других десятилетий. Несмотря на то, что медиана отрицательная, ситуации мягкой и умеренной увлажненности преобладают над засушливыми условиями, поскольку величина эксцесса выше нуля, а асимметрия левосторонняя. Тем не менее в этом десятилетии, 25-й процентиль находится близко к градации умеренной засушливости, что говорит об усиленной интенсивности экстремальных ситуаций, связанных с засухой,

при сравнении с периодами I и II. Следует отметить, что в III периоде отмечается наибольший размах индекса, который обусловлен наличием абсолютного минимума за исследуемый период с 1990 по 2020 г. Значение индекса составило -3,67, что в его терминах указывает на экстремальную засуху. Данный минимум был получен в марте 2020 г. из-за антициклонального режима погоды, отчасти связанного с влиянием сменяющихся отрогов восточного гребня азорского и западного гребня сибирского максимума [14]. 2020 год стал самым сухим за всю историю метеонаблюдений в Ростовской области, в большей степени катастрофическая засуха образовалась за счёт блокирующих антициклонов, зафиксированных на юге Восточно-Европейской равнины. В качестве примера на рис. 3 продемонстрировано пространственное распределение стандартизованного индекса осадков в марте за 2020 г., совместно со среднемесячной температурой воздуха за аналогичный период. Следует отметить, что распределения SPI и среднемесячной температуры воздуха имеют выраженный меридиональный пространственный тренд. Таким образом, очаги экстремальной засушливости вполне могут совпадать с очагами барических образований, однако для проверки такой гипотезы следует проводить дополнительные исследования синоптических ситуаций, что не предусмотрено в рамках настоящего исследования.

Для анализа тенденций изменения одномесячного SPI в Ростовской области, в разрезе каждого месяца были проанализированы временные ряды значений и проведена оценка их трендов. Оценка тенденции проводилась с помощью непараметрического способа теста трендов Манна – Кендалла. Достаточным порогом статистической значимости тренда считался уровень $p\text{-value} = 0,05$ (величина ошибки 5%). Временные ряды характеристик SPI анализировались с помощью диаграммы («ящик с усами») и гистограммы параметров трендов, изображенных на рис. 4.

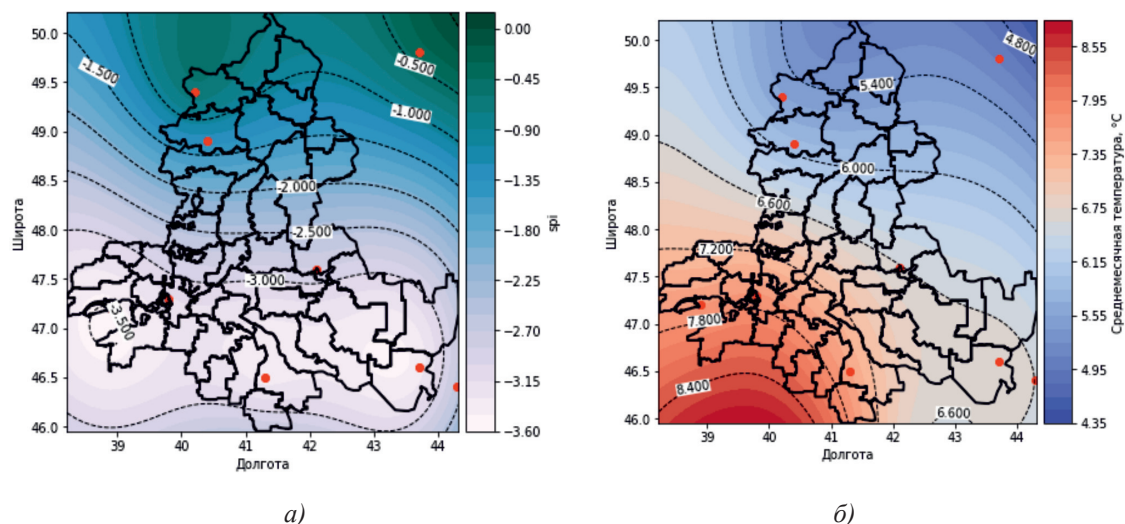


Рис. 3. Пространственное распределение индекса SPI (а) и среднемесячной температуры воздуха (б) в марте 2020 г.

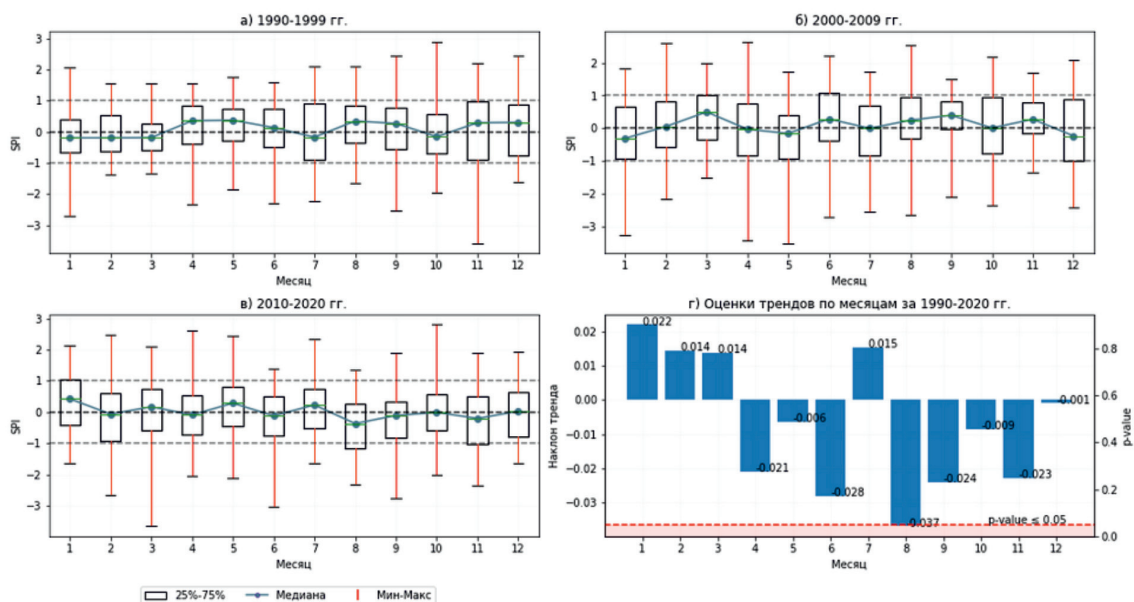


Рис. 4. Диаграммы характеристик временных рядов SPI и их оценки трендов. На гистограмме (г) красной областью заштрихованы значения p-value ниже или равное 0,05

На диаграммах типа «ящики с усами» представлены: медиана, 25-й и 75-й проценти, абсолютные максимумы и минимумы. Как видно из рис. 4, каждая из трех диаграмм (а, б, в) характеризуется своей уникальной кривой, которая аппроксимирует медианные значения индекса SPI и проходящую несколько раз через нулевую горизонталь, что говорит о неустойчивом уровне увлажнения в Ростовской области.

В период 1990–2000 гг. наиболее сильная засуха отмечена в январе и ноябре.

Значения индекса в этих месяцах опускались ниже -2.5 , что соответствует градации «экстремальная засуха», а в более чем 50% лет возникала слабая засушливость. Абсолютный максимум значения SPI наблюдался в октябре, и, согласно классификации индекса, условия в этот период были «экстремально влажными». Отмечены месяцы, в которые были зафиксированы экстремальные ситуации в виде засухи и избыточного увлажнения, среди таких месяцев выделяются январь, июль, сентябрь и ноябрь.

В большинстве случаев в данном десятилетии доминируют ситуации со слабым увлажнением и слабой засухой. Во II периоде наблюдается большая интенсивность как засушливых условий, так и дождливых периодов, это выражается в виде больших амплитуд значений SPI, зафиксированных в январе, апреле, мае, и августе. Январь в этом десятилетии снова опустился ниже -2,5, и наряду с ним отметились апрель и май. Значения индекса в эти месяцы находились ниже отметки -3. Экстремальное увлажнение отмечалось в августе и также в апреле. В целом ситуация с увлажненностью более динамична в сравнении с I и III периодами – здесь в семи месяцах максимумы и минимумы находятся выше 2 и ниже -2 соответственно. Во временном отрезке с 2010 по 2020 г. отмечается наиболее сильная засуха, зафиксированная в марте. Август в рамках десятилетия оказался наиболее насыщен отрицательными значениями индекса, а 25-й перцентиль опустился ниже -1, что в терминах индекса интерпретируется «слабая засуха». Фактически август в 25% лет является недостаточно обеспеченным влагой. Аналогичная ситуация наблюдается в сентябре и ноябре. Особенностью третьего десятилетия является то, что в большинстве месяцев наблюдался дефицит атмосферных осадков.

Особый интерес вызывает график на рис. 4, г, параметров трендов, полученных в разрезе каждого месяца для SPI в Ростовской области, за период с 1990 по 2020 г.

В первые три месяца года по графику трендов отмечены положительные тенденции индекса SPI, но вероятность значимости роста значений составила от 20 до 40%. Большинство месяцев имеет отрицательный коэффициент наклона, и наибольший из них зафиксирован в августе в Ростовской области. Здесь статистическая значимость тренда составила 98,3% ($p\text{-value} = 0,017$), индекс с каждым годом в период с 1990 по 2020 г. уменьшается на 0,037 единицы, и за 30 лет значение SPI в августе снизилось на 0,92 значения. Стоит отметить отрицательный тренд в июне и сентябре, значимость которых не превышает 70%. С агрономической точки зрения данные месяцы являются наиболее ценными, поскольку в Ростовской области в эти периоды происходят уборка и сев соответственно. Следовательно, данные темпы отрицательных изменений индекса могут повлиять на сроки проведения уборочной и посевной кампаний. Анализ трендов месячных значений индекса позволяет сделать вывод, что большая часть выявленных тенденций не проходят критерий достоверности по $p\text{-value} \leq 0,05$.

Для оценки временного профиля распределения одномесячного SPI в Ростовской области проводилось осреднение значений индекса, рассчитанных в каждом пункте наблюдения. В качестве средней распределительной характеристики использовалась медиана, поскольку данный статистический показатель менее чувствителен к сдвигам в наборе числовых данных.

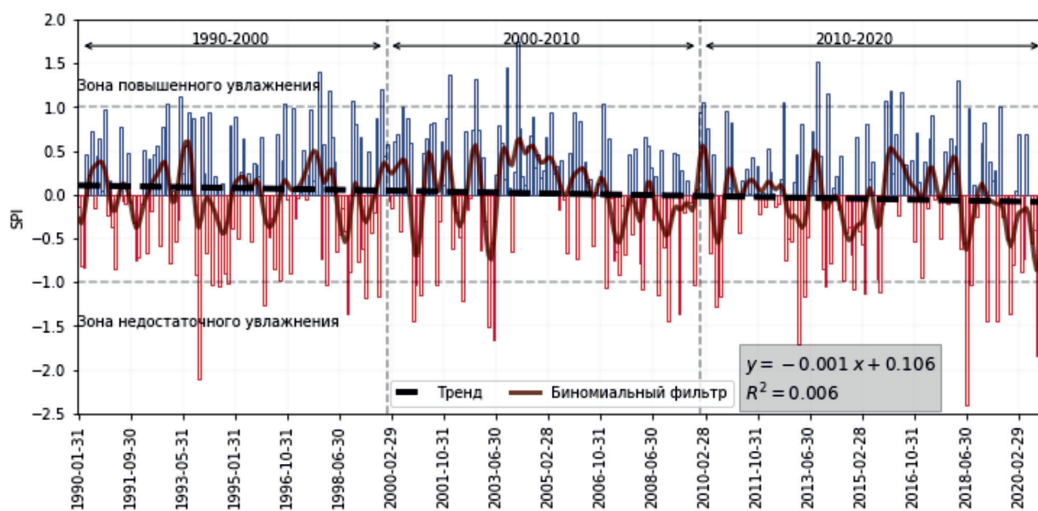


Рис. 5. Динамика межгодовой изменчивости медианы 1-м SPI в Ростовской области за период 1990–2020 гг. Синие столбики обозначают SPI > 0, красные столбики – SPI < 0. Горизонтальные пунктирные линии указывают на пределы, выше или ниже которых наступают аномальные условия. Вертикальные пунктирные линии – границы десятилетий

Сдвиги могут возникать, прежде всего, из-за того, что метеостанции имеют неравномерное распределение по области и наибольшее их количество сосредоточено на юго-западе региона. Исследуя временные ряды, в первую очередь рассматривалась динамика межгодовой изменчивости SPI по Ростовской области. График межгодовой изменчивости представлен на рис. 5.

Для устранения шума и иллюстрации тенденций изменчивости, на график наложена кривая, построенная с помощью биномиального девятиточечного фильтра. Фильтр позволяет проводить сглаживание и усреднение временного ряда [15].

У динамики изменчивости SPI в рамках исследуемого периода присутствует трендовая компонента, указывающая на снижение значений индекса в сторону отрицательной области, при этом скорость снижения индекса незначительная и составляет $-0,001$ единицы в месяц за период с 1990 по 2020 г. Оценка, с помощью непараметрического теста трендов Манна – Кендалла, говорит о наличии слабой значимости найденного тренда, так как p -value находится на уровне 0,08, что немного выше заданного предела в 0,05.

Заключение

Таким образом, в результате проделанной работы была достигнута поставленная цель и выполнены соответствующие для ее достижения задачи. Обнаружены отрицательные тренды межгодовой изменчивости показателя SPI в Ростовской области за период с 1990 по 2020 г. Третье десятилетие в рамках сравнительного анализа описательной статистики оказалось наиболее засушливым. Наибольшие тенденции отрицательных изменений зафиксированы в июне, августе и сентябре со статистической значимостью более 80%. Положительные тренды выявлены с января по март и в июле, но их статистическая значимость составляет менее 20% по методу тестов Манна – Кендалла.

В рамках исследования реализована кроссплатформенная компьютерная программа для расчета стандартизованного индекса осадков и опубликована в свободном доступе. Следующим этапом исследования является оценка закономерностей распределения показателя SPI по Ростовской области, за аналогичный период, написание и интегрирование модуля для решения задачи картирования в программу по расчету SPI.

Список литературы / References

1. McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology. 1993. Boston. P. 179–184.
2. Свобода М., Хейс М., Вуд Д. Руководство для пользователей стандартизованного индекса осадков // ВМО, Женева. 2012. № 1090. 36 с.
Svoboda M., Hayes M., Wood D. Standardized Precipitation Index User Guide // VMO, Zheneva. 2012. № 1090. 36 p. (in Russian).
3. Страшная А.И., Тищенко В.А., Береза О.В., Богомолова Н.А. О возможности использования стандартизованного индекса осадков для выявления засух и в прогнозах количественной оценки урожайности зерновых и зернобобовых культур // Тр. Гидрометцентра. 2015. № 357. С. 81–97.
Strashnaya A.I., Tishchenko V.A., Bereza O.V., Bogomolova N.A. On the possibility of using a standardized precipitation index to detect droughts and in forecasts for the quantitative assessment of grain and leguminous crop yields // Tr. Gidromettsentra. 2015. № 357. P. 81–97 (in Russian).
4. Клещенко А.Д., Савицкая О.В., Коскин С.А. Оценка средней районной урожайности озимой пшеницы по спутниковой и наземной метеорологической информации // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 103–121.
Kleschenko A.D., Savitskaya O.V., Kosyakin S.A. Evaluation of the average regional yield of winter wheat according to satellite and ground-based meteorological information // Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy. 2020. № 3 (377). P. 103–121 (in Russian).
5. Abebe A.M., Arega B.B. Spatial and temporal drought incidence analysis in the northeastern highlands of Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*. 2020. No. 10. P. 1–17. DOI: 10.1186/s40677-020-0146-4.
6. Хрусталеv Ю.П., Василенко В.Н., Свисюк И.В., Панов В.Д., Ларинова Ю.А. Климат и агроклиматические ресурсы Ростовской области. Ростов-н/Д., 2002. 183 с.
Khrustalev Yu.P., Vasilenko V.N., Svisyuk I.V., Panov V.D., Larionova Yu.A. Climate and agro-climatic resources of the Rostov region. Rostov-n/D., 2002. 183 p. (in Russian).
7. Специализированные массивы для климатических исследований. АИСОРИ. [Электронный ресурс]. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 01.04.2021).
Specialized arrays for climate research. AISORI. [Electronic resource]. URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (date of the application: 01.04.2021) (in Russian).
8. Научный центр по смягчению последствий засухи (NDMC). Пример программы для расчета SPI. [Электронный ресурс]. URL: <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx> (дата обращения: 01.04.2021).
National Drought Mitigation Center (NDMC). Sample program for calculating SPI. [Electronic resource]. URL: <https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx> (date of the application: 01.04.2021) (in Russian).
9. Авторская программа для расчета SPI [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/asalmin/py_spi (дата обращения: 05.04.2021).
Author's program for calculating SPI. [Electronic resource]. URL: https://github.com/asalmin/py_spi (date of the application: 05.04.2021) (in Russian).
10. Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 1. Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. 808 с.
Gringof I.G., Kleschenko A.D. Fundamentals of agricultural meteorology. Volume 1: The need for agricultural crops in agro-meteorological conditions and dangerous weather conditions for agricultural production. Obninsk: FGBU «VNIIGMI-MCD», 2011. 808 p. (in Russian).

11. Benjamin L.H. A drought climatology for Europe. *International journal of Climatology*. 2002. No. 22. P. 1571–1592. DOI: 10.1002/joc.846.
12. Abdul Rauf. Copula based analysis of rainfall severity and case stud. *Theoretical and Applied Climatology*. 2014. No. 115. P. 153–166. DOI: 10.1007/s00704-013-0877-1.
13. Edwards D.C. Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. *Climatology Report No. 97–2*. Department of Atmospheric Science. 1997. No. 634.
14. Основные особенности атмосферной циркуляции и погоды в северном полушарии в марте 2020 года. Гидрометцентр России. [Электронный ресурс]. URL: https://meteoinfo.ru/?option=com_content&view=article&id=17034 (дата обращения: 10.04.2021).
- The main features of atmospheric circulation and weather in the northern hemisphere in March 2020. Hydrometeorological Center of Russia. [Electronic resource]. URL: https://meteoinfo.ru/?option=com_content&view=article&id=17034 (date of the application: 10.04.2021) (in Russian).
15. Лукша В.В. Пространственно-временные изменения годовых расходов воды рек бассейна Припяти // *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2007. № 2. С. 24–29.
- Luksha V.V. Spatiotemporal changes in annual water consumption of rivers in the Pripjat basin // *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2007. No. 2. P. 24–29 (in Russian).