

ГЕОГРАФИЯ ЗА РУБЕЖОМ

УДК 914/919:551.582.2

DOI: 10.15372/GIPR20220115

Р. ЖАМАЛ*, С. Ж. ХАДИ**, М. ТОМБУЛ*

*Эскишехирский технический университет, 444 10 26, Эскишехир,
Тедебашаши, пр. Университе, 69, Турция, rashajm2@gmail.com, mtombul@eskisehir.edu.tr

**Тикритский университет,
34001, Тикрит, Ирак, sinan.jasim@yahoo.com

ТРЕНД СТАНДАРТИЗОВАННОГО ИНДЕКСА ОСАДКОВ И ЭВАПОТРАНСПИРАЦИИ (SPEI)
НА ТЕРРИТОРИИ ТУРЦИИ

Рассматриваются тренды засух на территории Турции, обусловленные изменением климата. В связи с этим важное значение имеет прогноз периодов засухи, представляющих собой один из основных негативных побочных эффектов изменения климата. Использовались данные индикаторов засух согласно SPEI (стандартизованный индекс осадков и эвапотранспирации) за период 1901–2015 гг.; значения получены с интервалом 1, 3, 6 и 12 месяцев. Данные были подвергнуты нескольким статистическим тестам: тесту Манна–Кендалла для определения направления и значимости тренда, тесту Тейла–Сена для оценки коэффициента наклона тренда и тесту Петтитта–Манна–Уитни для определения наиболее вероятного года изменения тренда. Исследуемый период был разделен на два интервала (1901–1981 и 1982–2015 гг.), выполнено их сравнение. Для выделения пространственных характеристик из полученных результатов использовалась программа ГИС. Делается вывод, что Турция в основном разделена на две зоны в отношении трендов засух, причем большая их часть — это тренды в направлении повышения увлажнения в северных районах, в то время как тренды в сторону уменьшения увлажнения наблюдаются в южных районах. Более значимым до 1981 г. был тренд в направлении засушливых периодов, однако начиная с 1981 г. ситуация изменилась с наступлением тренда в направлении избыточного увлажнения, за исключением юго-восточных районов Турции, где сохранился тренд к засухам.

Ключевые слова: засухи, изменение климата, коэффициент наклона тренда, средняя месячная температура воздуха, сумма атмосферных осадков.

R. JAMAL*, S.J. HADI**, M. TOMBUL*

*Eskisehir Technical University, 444 10 26, Eskisehir, Tepebashi, Universite pr., 69, Turkey,
rashajm2@gmail.com, mtombul@eskisehir.edu.tr

**University of Tikrit,
34001, Tikrit, Iraq, sinan.jasim@yahoo.com

TREND OF STANDARDIZED PRECIPITATION AND EVAPOTRANSPIRATION INDEX (SPEI)
OVER TURKEY

The paper examines drought trends in Turkey due to climate change. Therefore, forecasting periods of drought, which is one of the major negative side effects of climate change, is essential. The authors used data from drought indicators according to the SPEI (Standardized Precipitation and Evotranspiration Index) for the period between 1901 and 2015. Values obtained at intervals of 1, 3, 6 and 12 months. The data was subjected to several statistical tests: the Mann–Kendall test to determine the direction and significance of the trend, the Theil–Sen estimator to assess the trend slope coefficient, and the Pettitt-test to determine the most probable year of change. The period under study was divided into two intervals (1901–1981 and 1982–2015), and their comparison was performed. A GIS program was used to isolate spatial characteristics from the results obtained. It was

concluded that Turkey is mainly divided into two zones of drought, most of which is an increase in moisture in the northern regions, while a decrease in moisture is observed in the southern regions. The trend towards dry periods was more significant until 1981, but since 1981 the situation has changed due to the onset of the trend towards excess moisture, with the exception of southeastern Turkey, where the trend towards droughts persisted.

Key words: *droughts, climate change, trend slope coefficient, monthly mean air temperature, amount of precipitation.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отсутствует конкретное определение засухи. Под этим явлением, в частности, подразумевается период, когда количество атмосферных осадков ниже средних статистических показателей для региона, испытывающего дефицит влаги для сельскохозяйственной и экономической деятельности или для окружающей среды [1]. Засуху можно определить как период длительного отсутствия или недостатка атмосферных осадков, что наносит значительный урон сельскохозяйственным культурам и приводит к снижению урожая [1]. Все климатические зоны подвержены засухам независимо от величины среднего годового количества осадков. Засухи оказывают влияние на источники поверхностных и подземных вод, наносят ущерб сельскохозяйственным культурам, приводят к потере водно-болотных угодий, увеличению частоты лесных пожаров, недостатку водообеспеченности, негативно влияют на здоровье населения и способствуют переселению сельских жителей в города [2].

При классификации засух выделяют следующие категории: метеорологические, гидрологические, сельскохозяйственные, социально-экономические и экологические (недавно введенное понятие) [3]. Разработан целый ряд индикаторов метеорологических засух, например SPI (Standardized Precipitation Index — стандартизованный индекс осадков), который легко вычисляется и реализуется в силу его простоты, поскольку для этого требуются только данные об осадках [4]. Также известен индекс PDSI (Palmer Drought Severity Index — индекс суровости засух Палмера), который был впервые использован в 1960-х гг. Индекс PDSI использовался в течение многих лет и все еще применяется в некоторых случаях [4]. Индекс Z Палмера, полученный на основе PDSI, используется для определения окончания периода засухи [4]. Индекс площади засухи DAI (Drought Area Index) в основном используется для муссонных осадков в Индии [4].

Анализ засух осуществлялся в разных странах для определения различных типов засухи. Наиболее широко используемым индексом засухи был стандартизованный индекс осадков (SPI). В 2010 г. был разработан новый усовершенствованный индекс — SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index — стандартизованный индекс осадков и эвапотранспирации) — с включением данных о температуре воздуха, значительный рост которой наблюдается в течение последних 100 лет [5], а не только данных об осадках, как в случае с SPI. Для индекса SPEI, в отличие от SPI, требуются данные о средних месячных температурах воздуха и сумме атмосферных осадков [4]. Для определения различных типов засух учеными многих стран проводились обширные исследования с использованием индексов засух. В Турции в ряде случаев использовали индекс SPI.

В работе [6] рассмотрена степень уязвимости территории Турции в отношении засух в контексте частоты их повторяемости и регионального распределения с использованием стандартного индекса осадков (SPI) на временных интервалах в 3, 6, 12 и 24 месяца за период 1951–2001 гг. Сделан вывод, что степень уязвимости остается постоянной в различных временных масштабах, причем для юго-восточных и восточных районов Турции характерны умеренные сельскохозяйственные засухи, в то время как прибрежные районы подвержены умеренным гидрологическим засухам. Также для прибрежных и внутренних районов отмечена тенденция к сильным засухам. В работе [7] с учетом метеорологических данных исследованы изменения климата Турции и выполнен анализ данных с использованием нескольких статистических методов для определения закономерностей распределения атмосферных осадков и температуры приземного слоя воздуха.

На основе сравнения трендов за два периода (1950–1980 и 1981–2010 гг.) выявлены их изменения. Авторы обнаружили рост температуры после 1980 г., причем количество атмосферных осадков претерпело значительное изменение после 1980 г. в сторону их увеличения в северных и восточных районах и в сторону уменьшения — в западных, центральных и южных. Длительные пространственно-временные изменения температуры и осадков на территории Турции также рассматривались в работе [8] на основе ежемесячных данных из массива данных CRU TS V3.23 по 81 узлу сетки за период 1901–2014 гг. Авторы сделали вывод, что тренд годовых сумм осадков был статистически значимым согласно результатам теста Манна–Кендалла, а наиболее вероятным годом изменения был

1969 г., причем в рядах средней годовой температуры воздуха также наблюдался значимый положительный тренд на всей территории Турции, а наиболее вероятным годом изменения был 1993 г. Индексы SPEI и VCI использовались одновременно при анализе метеорологических засух в Турции.

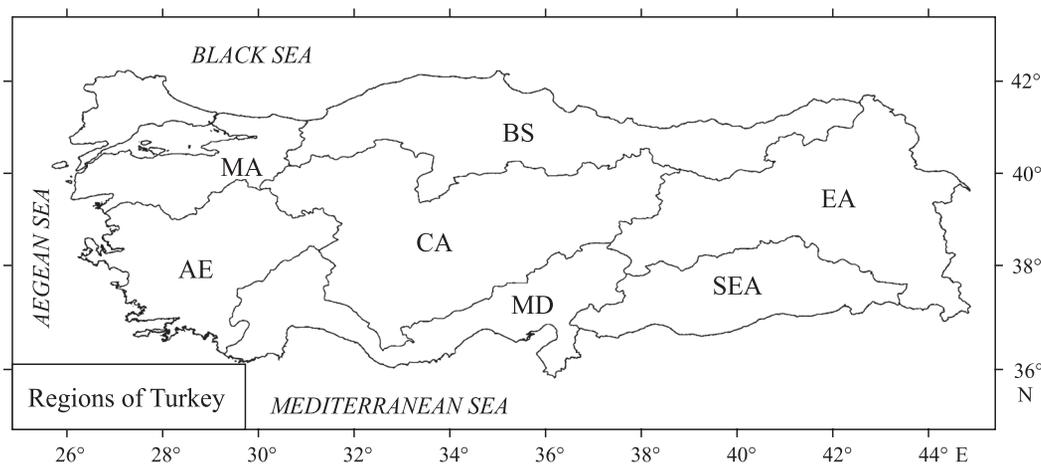
В работе [9] исследованы пространственно-временные вариации метеорологических и сельскохозяйственных засух за 1982–2015 гг., индексы SPEI были получены из базы данных SPEI v2.5, а сведения о почвенно-растительном покрове были взяты из базы данных CORINE. В работе [10] протестирован индекс SPI для различных климатических регионов и исследовано его потенциальное использование в качестве средства мониторинга засух в Турции. В литературе отсутствуют исследования о применении SPEI как индикатора, используемого в анализе тренда засух, поэтому цель настоящей работы — анализ тренда индекса SPEI на территории Турции за 1901–2015 гг. Этот период разделен на два интервала (1901–1981 и 1982–2015 гг.) ввиду предположения, что скорость изменения климата возросла после промышленной революции в Турции.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Район исследования включает всю территорию Турции, расположенную между 42–36° с. ш. и 45–26° в. д. в субтропическом регионе земного шара (см. рисунок). Регионы Турции различаются по климату ввиду неоднородного рельефа местности. Максимальное количество осадков в Турции приходится на зимний период. Средняя многолетняя годовая сумма осадков варьирует от 580 до 1300 мм на побережье Эгейского и Средиземного морей, а в восточной части побережья Черного моря, где дожди идут круглый год, достигает 2200 мм [11]. Средняя годовая температура воздуха в Центральной Анатолии изменяется от 8 до 12 °С, в то время как в прибрежных районах Черного и Мраморного морей, в центральной части побережья Эгейского моря и в материковой части вдоль Средиземного моря — от 12 до 16 °С; в прибрежных районах Эгейского и Средиземного морей и во всех районах Юго-Восточной Анатолии — от 16 до 20 °С [12].

Данные о климатических вариациях за период с 1901 по 2015 г. получены из базы регулярно обновляемых ежемесячных данных CRU TS 3.24.01 (CRU — отдел климатических исследований в составе Университета Восточной Англии). Для указанного выше периода CRU TS содержит большое количество переменных величин, таких как суммы атмосферных осадков, средняя суточная, средняя месячная, максимальная и минимальная температуры. Данные о месячных суммах осадков и потенциальной эвапотранспирации из массива данных CRU TS применялись при расчете SPEI.

В настоящем исследовании использованы данные версии 2.5 SPEI с пространственным разрешением 0,5° по широте и долготе (<http://spei.csic.es/>). Для расчета потенциального испарения применялось уравнение Пенмана–Монтейта [13]. На территории Турции выделено 323 узла сетки с данными, причем в каждой точке для каждого месяца рассчитано 1-, 3-, 6- и 12-месячное значение SPEI за 1901–2015 гг.



Регионы Турции, по [7].

Регионы: BS — Черноморский, EA — Восточная Анатолия, SEA — Юго-Восточная Анатолия, CA — Центральная Анатолия, MD — Средиземноморский, AE — Эгейский, MA — Мраморноморский.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выполнении трендового анализа 1-, 3-, 6- и 12-месячные значения были подвергнуты тестам Манна–Кендалла и Тейла–Сена, при этом значение угла наклона рассчитывалось за соответствующий период. Тест Петтитта проводился за 1901–2015 гг. В соответствии с рекомендацией, данной в работе [8], исследуемый период был разделен на два интервала (1901–1981 гг. и 1982–2015 гг.).

Стандартизованный индекс осадков и эвапотранспирации (SPEI). Процедуры, используемые для оценки SPEI, аналогичны применяемым при расчете SPI. Кроме того, для оценки SPEI используется климатический баланс, который нивелирует разницу между осадками и испарением, в отличие от использования только осадков в качестве исходных данных при расчете SPI [14]:

$$D_i = P_i - \text{PET}_i, \quad (1)$$

где D_i — количество осадков для данного месяца, P_i — количество осадков для конкретного месяца, PET_i — потенциальная эвапотранспирация для того же месяца.

Согласно [5], логарифмически-логистическое распределение является оптимальным для анализируемых данных. Функция плотности вероятности логарифмически-логистического распределения переменной величины:

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

где α , β , γ — параметры масштаба, формы и происхождения соответственно при $\gamma > D < \infty$ [14].

Согласно логарифмически-логистическому распределению для переменной величины D функция распределения плотности:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{D - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1}. \quad (3)$$

С помощью $F(x)$ индекс SPEI можно рассчитать следующим образом:

$$\text{SPEI} = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}, \quad (4)$$

где $W = -\ln(P)$, при $P \leq 0,5$ $P = 1 - F(D)$ — вероятность превышения конкретного значения D . При значении $P \geq 0,5$ значение P заменяется на $1 - P$, а значение SPEI инверсируется. Постоянные следующие: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$, $d_3 = 0,001308$ [5, 14].

Тест Манна–Кендалла. Этот непараметрический тест (критерий) был создан Г. Манном для проверки значимости коэффициента τ (тау) М. Кендалла [15]. Статистика S Манна–Кендалла рассчитывается следующим образом:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(Tx_j - x_i), \quad (5)$$

$$\text{sign}(T_j - T_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } x_j - x_i > 0, \\ 0 & \text{if } x_j - x_i = 0, \\ -1 & \text{if } x_j - x_i < 0, \end{cases} \quad (6)$$

где T_j и T_i — годовые значения для года j и i соответственно, $j > i$.

Среднее значение и дисперсия S , согласно [16], выглядят следующим образом:

$$E(S) = 0, \quad (7)$$

$$V_0(S) = n(n-1)(n+5), \quad (8)$$

где n — количество наблюдений.

Стандартизованная переменная Манна–Кендалла Z (МК-Z) определяется с помощью формулы

$$Z_S = \begin{cases} \frac{s-1}{\sigma} & \text{при } s > 0, \\ 0 & \text{при } s = 0, \\ \frac{s+1}{\sigma} & \text{при } s < 0, \end{cases} \quad (9)$$

Значимость тренда оценивается с помощью Z_S . Эта тестовая статистика используется для тестирования нулевой гипотезы (H_0). Если $|Z_S| > Z\alpha/2$, где α — выбранный уровень значимости, то нулевая гипотеза несостоятельна, так что тренд значимый.

Метод наклона Тейла–Сена. Непараметрический метод Тейла–Сена применяется для определения наклона тренда [17, 18]. Метод используется в случаях, когда тренд можно считать линейным — $f(t)$:

$$f(t) = Qt + B, \quad (10)$$

где Q — тангенс угла наклона, а B — постоянная величина.

Для получения оценки наклона Q в уравнении (6) рассчитываются наклоны всех пар значений данных:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, \quad (11)$$

где $j > k$.

Если имеется n значений величины x_j во временной серии, то получаем $N = n(n - 1)/2$ оценок наклона Q_i . Однако оценка наклона Тейла–Сена является средней величиной этих N значений Q_i . Тогда N значений Q_i ранжируются от наименьших до наибольших, при этом оценка Сена следующая:

$$Q = Q_{\left[\frac{N+1}{2}\right]}, \text{ если } N \text{ нечетное,}$$

$$\text{или } Q = \frac{1}{2} \left(Q_{\left[\frac{N}{2}\right]} + Q_{\left[\frac{N+2}{2}\right]} \right), \text{ если } N \text{ четное.} \quad (12)$$

Тест Петтитта–Манна–Уитни. Непараметрический подход, согласно [19], применяется для определения точки изменения в серии непрерывных гидрологических или климатических данных. При этом тестируется гипотеза H_0 (отсутствие изменения) по гипотезе H_a (изменение) для определения конкретного момента времени (t), когда переменные величины начинают уменьшаться или увеличиваться. В адекватном непараметрическом тесте для определения изменения используется версия двух выборок Манна–Уитни:

$$D_{ij} = \text{sign}(x_j - x_i), \quad (13)$$

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } x_j - x_i > 0, \\ 0 & \text{if } x_j - x_i = 0, \\ -1 & \text{if } x_j - x_i < 0, \end{cases} \quad (14)$$

$$U_{i,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T D_{ij}, \quad (15)$$

где $U_{i,T}$ эквивалентно статистике Манна–Уитни для двух выборок x_1, \dots, x_i и x_{i+1}, \dots, x_T принадлежат той же совокупности.

Затем $U_{i,T}$ проверяется в отношении значений величины t при $1 \leq t < T$. Наиболее вероятным является при максимальном значении of $U_{i,T}$:

$$K_T = \max_{1 \leq t \leq T} |U_{i,T}|. \quad (16)$$

Вероятность точки изменения определяется по формуле

$$p \cong \exp\left(\frac{-6K_T^2}{T^3 + T^2}\right). \quad (17)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Трендовый анализ SPEI за 1901–2015 гг. Тренд 1-месячного SPEI оказался значимым при $p < 0,05$ с отрицательными величинами МК-Z для всего региона Юго-Восточной Анатолии и юго-восточных и центральных районов Восточной Анатолии. Максимальные отрицательные значения приходятся на

южные районы Юго-Восточной Анатолии. В западных и некоторых центральных районах Юго-Восточной Анатолии, восточных районах Средиземноморского региона и северных районах Восточной Анатолии тренд значим при $p < 0,05$ с положительными величинами МК-Z, где максимальные положительные значения МК-Z приходятся на Черноморский регион. Для других районов наблюдаются незначимые величины. Значения наклона Тейла–Сена, рассчитанные для соответствующего периода, плавно возрастают (как отрицательные, так и положительные) при приближении к юго-восточным и северо-западным районам Турции, где максимальное отрицательное значение равно $-0,00045$ для южной части Юго-Восточной Анатолии, а максимальное положительное равно $0,00025$ для северных районов Черноморского региона.

Тренд 3-месячного SPEI (сезонная оценка) оказался значимым при $p < 0,05$ с отрицательными величинами МК-Z для большинства районов Юго-Восточной Анатолии, юго-восточной и центральной частей Восточной Анатолии, южной части Средиземноморского региона, где максимальные отрицательные значения МК-Z приходятся на Юго-Восточную Анатолию. Для большей части Мраморноморского региона, а также для восточной и западной частей Центральной Анатолии тренд значим при $p < 0,05$ с положительными величинами МК-Z. Максимальные положительные значения МК-Z приходятся на северо-западные районы Черноморского и восточные районы Мраморноморского региона. Значения наклона Тейла–Сена, рассчитанные для соответствующего периода, плавно возрастают (как отрицательные, так и положительные) при приближении к юго-восточной и северо-западной частям страны, где максимальное отрицательное значение равно $-0,00045$ для южных районов Юго-Восточной Анатолии, а максимальное положительное составляет $0,00035$ для Черноморского и Мраморноморского регионов.

Тренд 6-месячного SPEI (сезонная – среднесрочная оценка) значим при $p < 0,05$ с отрицательными величинами МК-Z для Юго-Восточной Анатолии, центральных районов Средиземноморского региона, южных районов Центральной Анатолии, центральных и юго-восточных районов Восточной Анатолии. В то же время в Мраморноморском регионе, на большей части Черноморского, в северных районах Эгейского региона и в восточных и западных районах Центральной Анатолии наблюдается значимый тренд при $p < 0,05$ с положительными величинами МК-Z. Значения наклона Тейла–Сена плавно возрастают (как отрицательные, так и положительные) при приближении к юго-восточным и северо-западным районам страны, где максимальное отрицательное значение равно $-0,0055$ для южных районов Восточной Анатолии, а максимальное положительное составляет $0,0005$ для северо-восточных районов Центральной Анатолии и для южной части Черноморского региона.

Тренд 12-месячного SPEI (годовая шкала, долгосрочная оценка) значим при $p < 0,05$ с отрицательными величинами МК-Z для всей территории Юго-Восточной Анатолии, средней и юго-восточной частей Восточной Анатолии, южной части Восточной Анатолии и южной части Эгейского региона. Для Мраморноморского, Черноморского регионов, северной части Эгейского региона, восточной и северо-западной частей Центральной Анатолии тренд значим при $p < 0,05$ с положительными значениями МК-Z, где максимальные положительные величины приходятся на Черноморский регион.

Значения наклона Тейла–Сена варьируют от $-0,00075$ в южной части Средиземноморского региона до $0,00075$ в Черноморском. Это согласуется с результатами, изложенными в работе [8]: за 1901–2014 гг. в южных районах Турции имел место нисходящий тренд осадков, в то время как на севере тренд возрастал, особенно в западном направлении. В работе [8] представлен анализ осадков, выполненный с помощью тех же самых методов (тесты Манна–Кендалла, Тейла–Сена и Петтитта–Манна–Уитни); сделан вывод, что отрицательные тренды характерны для Юго-Восточной Анатолии и Средиземноморского региона, положительные — для Черноморского и Мраморноморского регионов. В Центральной и Восточной Анатолии и в Эгейском регионе имеют место тренды как отрицательные, так и положительные. Максимальный возрастающий тренд отмечается в Мраморноморском регионе и Юго-Восточной Анатолии.

В западной части Турции линия, разделяющая районы с положительным и отрицательным трендом, смещается на север при переходе с 1- на 12-месячный временной масштаб SPEI, в то время как на крайнем западе Эгейского и Мраморноморского регионов линия смещается на запад с увеличением временного масштаба SPEI. Однако в восточной части страны было отмечено, что линия, разделяющая районы с положительным и отрицательным трендом, смещается на юг при переходе с 1- на 3- и 6-месячный временной масштаб SPEI, а в случае 12-месячного SPEI она смещается на север.

Согласно тесту Петтитта–Манна–Уитни, наиболее вероятным годом изменения для 1-месячных SPEI является 1953 г. на отметке (сетке) 27; за ним следует 1925 г. на отметке 18. Для 3-месячных SPEI наиболее выраженный год изменения — 1953 г. (то же, что и для 1-месячных SPEI) на отмет-

Таблица 1

Результаты теста Петтитта по данным тестирования тренда SPEI за период 1901–2015 гг.

1-месячные				3-месячные				6-месячные				12-месячные			
год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер
1953	27	1939	5	1953	27	1946	4	1968	26	1976	3	1968	42	1929	3
1925	18	1999	5	1993	23	1959	4	1953	25	1978	3	1925	27	1936	3
1933	15	1917	4	1961	21	1924	3	1993	20	1983	3	1961	18	1942	3
1993	15	1946	4	1925	18	1939	3	1961	19	1984	3	1934	17	1955	3
1945	14	1950	4	1927	17	1973	3	1920	17	2007	3	1946	15	1971	3
1992	14	1974	4	1968	16	1977	3	1925	14	1933	2	1917	14	1918	2
1927	13	1994	4	1945	13	1917	2	1934	13	1939	2	1920	14	1922	2
2007	11	1931	3	1923	11	1922	2	1945	13	1940	2	1952	12	1924	2
1926	10	1952	3	1934	11	1931	2	1956	12	1943	2	1953	12	1954	2
1963	9	1980	3	1992	11	1940	2	1923	11	1948	2	1930	10	1959	2
1983	9	1920	2	2007	9	1951	2	1946	9	1960	2	1956	8	1964	2
1985	9	1930	2	1936	8	1964	2	1973	9	1963	2	2000	8	1972	2
1923	8	1947	2	1956	8	1965	2	1927	8	1969	2	1948	6	1980	2
1924	8	1959	2	1974	7	1970	2	1952	8	1970	2	1973	6	1990	2
1936	8	1964	2	1985	7	1981	2	1930	7	1971	2	1981	6	2007	2
1958	8	1965	2	2000	7	1983	2	1941	7	1975	2	1983	6	1928	1
1928	6	1967	2	1920	6	1987	2	1985	7	1981	2	1945	5	1931	1
1934	6	1973	2	1930	6	1989	2	1936	6	1989	2	1951	5	1932	1
1940	6	1975	2	1950	6	1943	1	1917	5	1924	1	1969	5	1937	1
1941	6	1977	2	1952	6	1966	1	1999	5	1929	1	1985	5	1939	1
1951	6	1984	2	1960	6	1972	1	2000	5	1947	1	1993	5	1940	1
1956	6	2000	2	1963	6	1975	1	1922	4	1959	1	1923	4	1947	1
1960	6	1935	1	1999	6	1976	1	1951	4	1966	1	1941	4	1957	1
1961	6	1966	1	1933	5	1980	1	1964	4	1967	1	1975	4	1963	1
1968	6	1969	1	1949	5	1984	1	1977	4	1972	1	1978	4	1965	1
1922	5	1979	1	1941	4	1991	1	1931	3	1980	1	1982	4	1967	1
		1995	1			2003	1	1949	3	1982	1	1984	4	1977	1
								1965	3	1990	1	1994	4	1986	1
										1995	1			1995	1

ке 27. Далее следует 1993 г. на отметке 23, и это согласуется с выводом авторов [8] о наиболее вероятном годе изменения годового тренда температуры. Для 6-месячных SPEI наиболее выраженным годом изменения является 1968 г. на отметке 26, аналогично 3-месячным SPEI для 1953 г. на отметке 25; затем следует 1993 г. на отметке 23, и это согласуется с выводом, сделанным в работе [8], о наиболее вероятном годе изменения годового тренда температуры. Для 12-месячных SPEI — то же, что и для 6-месячных SPEI; 1968 г. — наиболее выраженный год изменения на отметке 42, о чем также сообщалось в работе [8], где утверждалось, что 1969 г. — наиболее выраженный год изменения для годового тренда осадков. То же имеет место для 1-месячных SPEI — 1925 г. на отметке 27 и 1961 г. на отметке 18 (табл. 1).

Трендовый анализ SPEI за период 1901–1981 гг. Тренд 1-месячного SPEI (месячная временная шкала). Значимые положительные величины МК-Z отмечены в Черноморском и восточной части Мраморноморского регионов, в то время как значимые отрицательные наблюдаются в Юго-Восточной Анатолии и в юго-восточной части Восточной Анатолии. Другие районы характеризуются незначительными величинами МК-Z. Максимальное отрицательное значение наклона Тейла–Сена, рассчитанное для рассматриваемого периода, равно $-0,0006$ в южной части Юго-Восточной Анатолии, а максимальное положительное составляет $0,00035$ в северной части Черноморского региона. Доверительный уровень всех значений МК-Z равен $0,05$.

Тренд 3-месячного SPEI (сезонная оценка). Значимые положительные величины МК-Z зафиксированы в западной и центральной частях Черноморского и Мраморноморского регионов и в северной части Эгейского, в то время как значимые отрицательные величины МК-Z отмечены в восточной части Восточной Анатолии, южной части Юго-Восточной Анатолии и в южной части Средиземно-

морского региона. Другие районы характеризуются незначительными величинами МК-Z. Как и в случае с 1-месячными SPEI, максимальное отрицательное значение наклона Тейла–Сена равно $-0,0004$ в восточной части Восточной Анатолии и $-0,00035$ в южной части Юго-Восточной Анатолии, а максимальное положительное значение равно $0,00055$ в северной части Черноморского региона. Доверительный уровень всех значений МК-Z равен $0,05$.

Тренд 6-месячного SPEI (сезонная – среднесрочная оценка). Значимые положительные величины МК-Z наблюдаются в Мраморноморском, северной части Эгейского и в крайних восточных районах Черноморского региона, в то время как значимые отрицательные величины зафиксированы в центральной части Черноморского региона, северной части Центральной Анатолии, восточной части Средиземноморского региона и на востоке Восточной Анатолии. Как и в случае с 3-месячными SPEI, максимальное отрицательное значение наклона Тейла–Сена равно $-0,00055$ в восточной части Восточной Анатолии и в южной части Средиземноморского региона, в то время как максимальное положительное равно $0,0007$ в северной части Черноморского региона. Доверительный уровень всех значений МК-Z равен $0,05$.

Тренд 12-месячного SPEI (годовая временная шкала). Значимые положительные величины МК-Z наблюдаются в западных районах Турции, значимые отрицательные – в Центральной Турции (центральных районах Черноморского региона, в Центральной Анатолии и Средиземноморском регионе) и в восточных районах Восточной Анатолии. Максимальное отрицательное значение теста наклона Тейла–Сена равно $-0,0009$ в восточной части Восточной Анатолии, в то время как максимальное положительное составляет $0,00095$ в восточной части Мраморноморского региона.

Согласно тесту Петтитта–Манна–Уитни, наиболее вероятный год изменения для 1-месячных SPEI не зафиксирован как отдельный доминирующий год на отметках, тем не менее наиболее выраженным годом изменения является 1927 г. на отметке 28, за ним следуют 1924 и 1925 гг. на отметке 24. Для 3-месячных SPEI наиболее выраженным годом изменения является 1953 г. на отметке 29, за ним следуют 1925 и 1927 гг. на отметке 28. Для 6-месячных SPEI наиболее выраженным годом является 1925 г. на отметке 51, за ним следует 1953 г. на отметке 24. Для 12-месячных SPEI наиболее выраженным годом изменения является 1925 г. на отметке 48, далее – 1934 г. на отметке 32. Доверительный уровень всех значений МК-Z равен $0,05$ (табл. 2).

Таблица 2

Результаты теста Петтитта по данным тестирования тренда SPEI за период 1901–1981 гг.

1-месячные				3-месячные				6-месячные				12-месячные			
год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер
1927	28	1961	6	1953	29	1956	4	1925	51	1929	3	1925	48	1918	3
1924	24	1931	5	1925	28	1959	4	1953	24	1932	3	1934	32	1910	2
1925	24	1939	5	1927	28	1926	3	1934	23	1942	3	1917	23	1922	2
1945	22	1960	5	1924	24	1947	3	1920	21	1967	3	1961	20	1924	2
1933	20	1917	4	1934	18	1951	3	1923	20	1909	2	1946	18	1928	2
1953	19	1964	4	1923	17	1939	2	1961	19	1910	2	1920	17	1949	2
1936	12	1968	4	1945	14	1940	2	1927	14	1931	2	1968	14	1954	2
1923	11	1947	3	1920	12	1942	2	1946	13	1933	2	1930	12	1955	2
1926	10	1956	3	1961	12	1943	2	1930	12	1950	2	1953	12	1959	2
1920	9	1930	2	1936	11	1963	2	1936	12	1958	2	1936	11	1960	2
1922	9	1949	2	1941	11	1965	2	1917	11	1940	1	1956	11	1969	2
1941	9	1951	2	1922	9	1967	2	1945	9	1943	1	1929	10	1908	1
1946	8	1965	2	1933	9	1910	1	1956	9	1960	1	1952	9	1914	1
1952	8	1967	2	1946	9	1918	1	1941	8	1963	1	1923	8	1931	1
1928	7	1910	1	1949	9	1935	1	1951	8	1971	1	1941	7	1933	1
1934	7	1929	1	1960	8	1937	1	1968	8			1939	6	1937	1
1940	7	1935	1	1950	7	1955	1	1952	7			1947	6	1938	1
1950	7	1959	1	1968	7	1958	1	1922	6			1951	6	1940	1
1958	7	1962	1	1917	6	1962	1	1947	6			1932	5	1950	1
1963	7	1970	1	1930	6	1964	1	1949	6			1942	5	1964	1
1942	6	1972	1	1931	4	1966	1	1959	4			1948	5	1967	1
1943	6			1952	4	1973	1	1924	3			1945	4	1974	1

Трендовый анализ SPEI за период 1982–2015 гг. *Тренд 1-месячного SPEI (месячная временная шкала).* Значимые положительные величины МК-Z наблюдаются в западной части Мраморноморского региона, в юго-восточной части Центральной Анатолии и в северной части Средиземноморского региона, в то время как в остальных регионах величины незначимы. Тест наклона Тейла–Сена показал, что для большинства районов характерен положительный наклон тренда, причем максимальное положительное значение, рассчитанное для рассматриваемого периода, равно +0,0021 в западной части Эгейского региона, в то время как отрицательный наклон охватывает область от Южной Анатолии до центра Юго-Восточной Анатолии и от центра Восточной Анатолии до ее северной части; максимальное отрицательное значение равно –0,0012 в Юго-Восточной Анатолии. Доверительный уровень всех значений МК-Z равен 0,05.

Тренд 3-месячного SPEI (сезонная оценка). Значимые положительные величины МК-Z наблюдаются в Мраморноморском и Эгейском регионах, в большинстве районов Центральной Анатолии, Средиземноморском регионе и в северной части Восточной Анатолии; для остальных регионов они незначимы. Тест наклона Сена показал, что максимальное отрицательное значение составляет –0,0016 в Северо-Восточной Анатолии, а максимальное положительное — 0,0038 на западе Мраморноморского региона. Доверительный уровень всех значений МК-Z равен 0,05.

Тренд 6-месячного SPEI (сезонная – среднесрочная оценка). Значимые положительные величины МК-Z оказались идентичными 3-месячным SPEI с возрастающим доминированием во все большем количестве районов (см. рисунок). Тест наклона Тейла–Сена показал, что максимальное отрицательное значение наклона равно –0,0025 в центральной части Юго-Восточной Анатолии, в то время как максимальное положительное значение равно 0,005 в западной части Мраморноморского региона. Доверительный уровень всех значений МК-Z равен 0,05.

Тренд 12-месячного SPEI (годовая временная шкала). Большинство регионов характеризуются значимыми положительными величинами МК-Z, они фиксируются в некоторых районах центральной части Юго-Восточной и Восточной Анатолии. Тест наклона Сена показал, что максимальное отрицательное значение (–0,0036) фиксируется в центре Юго-Восточной Анатолии, а максимальное положительное (0,0057) — в западной части Мраморноморского региона. Доверительный уровень всех значений МК-Z равен 0,05.

Согласно тесту Петтитта–Манна–Уитни, для 1-месячных SPEI наиболее вероятным годом изменения является 2007 г. на отметке 83, за ним следует 1993 г. на отметке 57. Как и в случае с 1-месячными SPEI, 2007 г. — наиболее вероятный год изменения для 3-месячных SPEI на отметке 103. За ним следует 1993 г. на отметке 71. Аналогично ситуации с 1- и 3-месячными SPEI, 2007 г. является наиболее вероятным годом изменения для 6-месячных SPEI на отметке 103. За ним следует 1993 г. на отметке 89. Для 12-месячных SPEI наиболее возможным годом изменения является 1993 г. на отметке 97, за ним следует 2007 г. на отметке 94 (табл. 3). Результаты для периода 1982–2015 гг. согласуются с выводами, сделанными в работе [7], где утверждается, что характер осадков на территории Турции значительно изменился после 1980 г.: их количество уменьшилось в южных и восточных

Таблица 3

Результаты теста Петтитта по данным тестирования тренда SPEI за период 1982–2015 гг.

1-месячные				3-месячные				6-месячные				12-месячные			
год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер	год	номер
2007	83	1990	6	2007	103	1989	4	2007	103	2006	6	1993	97	1987	3
1993	57	1996	5	1993	71	2008	3	1993	89	1994	5	2007	94	2004	2
1992	50	2001	4	1992	23	2004	3	2000	19	2008	4	2000	26	1998	2
2000	17	1997	3	1999	17	1991	3	2005	14	2002	3	2003	12	1991	2
1999	14	1991	3	2006	16	1985	3	1990	12	1995	2	1990	12	1989	2
2005	11	1984	3	1990	13	1984	3	1999	11	1986	1	2005	11	1986	2
2002	11	2010	2	2000	12	2011	2	1985	9	1991	1	1985	10	1984	2
2006	10	1998	2	2005	10	2003	2	1984	7	1992	1	2006	9	1996	1
1994	10	1985	2	1997	7	1996	2	1989	7	1998	1	1997	9	1992	1
2011	7	2009	1	1995	7	1994	2	2010	7	2001	1	1994	9		
1995	7	2004	1	2010	6	1987	2	1997	6	2009	1	2008	8		
1989	7			2002	4	1983	1	2003	6	2011	1	2010	5		
1987	7			2001	4			2004	6			2002	4		

регионах Турции и возросло в центрально-восточных, северных и западных регионах с ростом средней, минимальной и максимальной температуры воздуха после 1980 г.

Сравнение результатов анализа SPEI за различные периоды времени. Сравнение тренда SPEI за периоды 1901–1981 и 1982–2015 гг. показало, что климатический тренд после 1982 г. направлен в сторону увеличения увлажнения. Этот тренд становится более выраженным при переходе от 1- к 12-месячным SPEI. Прибрежные западные районы Мраморноморского региона и Восточной Анатолии, центральная и западная части Средиземноморского региона испытывали увеличение засушливости до 1982 г. После этого года тренд меняется и наблюдается увеличение увлажнения. В Черноморском регионе и Центральной Анатолии до 1982 г. отмечался тренд в сторону увлажнения. В западных районах Восточной Анатолии наблюдалось увеличение увлажнения, в восточных, напротив, фиксировалось увеличение засушливости. Однако после 1982 г. в центральных и юго-восточных районах страны тренд SPEI в сторону повышения засушливости сохраняется, а в восточных и западных районах повышается увлажнение. В Юго-Восточной Анатолии после 1982 г. в основном сохраняется отрицательный тренд SPEI.

Сравнение результатов анализа тренда SPEI за весь рассматриваемый период (1901–2015 гг.) с результатами такового за 1901–1981 гг. показало, что тренд SPEI в период 1901–1981 гг. более выражен по сравнению со всем периодом, особенно при переходе от 1- к 12-месячным SPEI. Тот факт, что за весь рассматриваемый период проявляется менее выраженная тенденция к засухе по сравнению с его первой частью (1901–1981 гг.), объясняется сменой знака тренда SPEI после 1981 г.

Однако в Юго-Восточной Анатолии и после 1981 г. сохранился устойчивый тренд к засухе. Сравнение трендов SPEI за весь рассматриваемый период и за его последнюю часть (1982–2015 гг.) показало, что в целом имеет место более выраженная тенденция к доминированию трендов к увлажнению, которые усиливаются при переходе от 1- к 12-месячным SPEI. В то же время в юго-восточных районах Турции сохраняется тренд к увеличению засушливости.

Требуется продолжение мониторинга SPEI для уточнения предстоящих климатических трендов. Ситуация в юго-восточных районах Турции вызывает беспокойство, поскольку тренд к увеличению засушливости становится более значимым, большим по модулю и устойчивым и не проявляет регрессии даже после 1981 г., что подчеркивает настоятельную необходимость принятия срочных мер для противодействия ожидаемым последствиям увеличения засушливости в этом регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная цель исследования заключалась в анализе трендов 1-, 3-, 6- и 12-месячных SPEI на территории Турции за периоды 1901–2015, 1901–1981 и 1982–2015 гг. и в сравнении результатов анализа SPEI за различные периоды в соответствии с рекомендациями, сделанными в предыдущих исследованиях. Для каждого периода в интервале 1901–2015 гг. получен отрицательный тренд SPEI (увеличение засушливости) в южных, юго-восточных и некоторых центральных районах Турции, а также положительный тренд SPEI (увеличение увлажнения) в северных, западных и некоторых центральных районах Турции, за некоторыми исключениями. Линия, разделяющая эти две зоны (зона нулевого тренда), смещается на север при переходе от 1- к 12-месячным SPEI. Таким образом, в случае когда временной интервал длиннее, район, подверженный длительной засухе, расширяется. Многие районы Турции подвержены длительным, а не кратковременным засухам, что в основном относится к южным, юго-восточным и некоторым центральным районам. В то же время некоторые районы с трендом в сторону увлажнения по результатам расчета SPEI за более короткие временные интервалы фактически испытывают длительные засухи.

Наиболее вероятным годом изменения тренда для 1- и 3-месячных SPEI был 1953 г., а для 6- и 12-месячных — 1968 г.

Результаты трендового анализа указывают на принципиальное различие между периодами до и после 1982 г. До 1982 г. имело место широкое пространственное распространение отрицательного тренда SPEI (в сторону увеличения засушливости) для всей восточной и центральной территории Турции. После 1982 г. эти районы Турции характеризуются положительным наклоном тренда SPEI (в сторону увеличения увлажнения), но в случае анализа SPEI за более длительные периоды отрицательные тренды (в сторону увеличения засушливости) наблюдаются в Юго-Восточной и Восточной Анатолии, а также в Черноморском регионе. Таким образом, до 1982 г., в отличие от периода после этого года, на значительной части территории Турции более выражен был отрицательный тренд SPEI (в сторону увеличения засушливости).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **What is Drought** // NDMC (National Drought Mitigation Center) [Электронный ресурс]. — <http://drought.unl.edu/DroughtBasics/WhatisDrought.aspx> (дата обращения 18.08.2020).
2. **Types of Drought Impacts** // NDMC (National Drought Mitigation Center) [Электронный ресурс]. — https://drought.unl.edu/Education/DroughtforKids/DroughtEffects.aspx#Types_of_Drought_Impacts (дата обращения 18.08.2020).
3. **Types of Drought** // NDMC (National Drought Mitigation Center) [Электронный ресурс]. — <http://drought.unl.edu/droughtbasics/typesofdrought.aspx> (дата обращения 18.08.2020).
4. **Handbook of Drought Indicators and Indices** // World Meteorological Organization [Электронный ресурс]. — https://www.weather.gov/media/tbw/drought/WMOGWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf (дата обращения 18.08.2020).
5. **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 // *International Journal of Climatology*. — 2014. — Vol. 34, Issue 10. — P. 3001–3023.
6. **Sönmez F.K., Kömüçü A.Ü., Erkan A., Turgu E.** An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index // *Natural Hazards*. — 2005. — Vol. 35, issue 2. — P. 243–264.
7. **Türkeş M., Yozgatlıgil C., Batmaz İ., İyigün C., Koç E.K., Fahmi F.M., Aslan S.** Has the climate been changing in Turkey? Regional climate change signals based on a comparative statistical analysis of two consecutive time periods, 1950–1980 and 1981–2010 // *Climate Research*. — 2016. — Vol. 70, Issue 1. — P. 77–93.
8. **Hadi S.J., Tombul M.** Long-term spatiotemporal trend analysis of precipitation and temperature over Turkey // *Meteorological Applications*. — 2018. — Vol. 25, Issue 1. — P. 445–455.
9. **Şorman A.Ü., Mehr A.D., Hadi S.J.** Study on spatial-temporal variations of meteorological-agricultural droughts in Turkey // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. — 2018. — Vol. XLII-3/W4. — P. 483–490.
10. **Komuscu U.A.** Using the SPI to analyze spatial and temporal patterns of drought in Turkey // *Drought Network News* (1994–2001). — 1999. — Vol. 11. — P. 7–13.
11. **Sensoy S., Demircan M., Ulupinar Y., Balta İ.** Climate of Turkey. 2007 // Turkish state meteorological service [Электронный ресурс]. — <http://www.dmi.gov.tr/files/en-US/climateofturkey.pdf> (дата обращения 20.07.2020).
12. **Sensoy S.** The mountains influence on Turkey climate: Paper presented at the Balwois Conference on Water Observation and Information System for Decision Support [Электронный ресурс]. — https://www.researchgate.net/publication/267788636_The_Mountains_Influence_On_Turkey_Climate (дата обращения 20.07.2020).
13. **Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.** Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements): FAO Irrigation and drainage paper, N 56. — Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998. — 300 p.
14. **Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I.** A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index // *Journ. of Climate*. — 2010. — Vol. 23, N 7. — P. 1696–1718.
15. **Kendall M.G.** A new measure of rank correlation // *Biometrika*. — 1938. — Vol. 30 (1/2). — P. 81–93.
16. **Kendall M.** Rank correlation methods. 2nd impression. — London: Charles Griffin and Company Ltd, 1975. — 202 p.
17. **Sen P.K.** Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // *Journ. of the American Statistical Association*. — 1968. — Vol. 63, N 324. — P. 1379–1389.
18. **Theil H.** A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis // *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie Wetenschappen. Series A. Mathematical Sciences*. — 1950. — Vol. 53. — P. 386–392.
19. **Pettitt A.** A non-parametric approach to the change-point problem // *Applied Statistics*. — 1979. — Vol. 28, N 2. — P. 126–135.

Поступила в редакцию 23.11.2019

После доработки 30.07.2020

Принята к публикации 13.10.2021