

**МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА/MELIORATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS**DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.11> EDN: MOYZIW**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИХ ЗАСУШЛИВЫХ ЯВЛЕНИЙ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА**

Научная статья

Кусаинова А.А.^{1,*}, Мезенцева О.В.², Земцов В.А.³, Тусупбеков Ж.А.⁴¹ ORCID : 0000-0002-4524-3765;² ORCID : 0000-0003-1982-2234;³ ORCID : 0000-0002-9376-1073;⁴ ORCID : 0000-0002-8560-6188;¹ Карагандинский технический университет им. Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан² Омский государственный педагогический университет, Омск, Российская Федерация³ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация⁴ Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Омск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (aimarh[at]mail.ru)

Предложена: 21.04.2026; Принята: 01.06.2026; Опубликовано: 19.06.2026

Аннотация

В статье оценивается динамика формирования весенне-летних засушливых явлений в степной зоне Северного Казахстана за период 1936–2025 гг. Основное внимание уделено анализу влагообеспеченности вегетационного периода по методологии расчёта стандартизированного индекса осадков SPI, предложенной Т. Б. Макки, Н. Дж. Доускеном и Дж. Клейстом в 1993 г., основанной на статистическом анализе осадков и применяемой для определения степени их дефицита во временных интервалах различной продолжительности. Применение данного индекса предоставляет возможность оценить интенсивности и повторяемость засух. В качестве критерия достаточного увлажнения использовано значение индекса SPI: от 0,1 и выше, при этом, чем выше показатель, тем больше увлажнение; и показателя засушливости от -0,1 и ниже, при этом чем ниже показатель, тем выше засушливость территории. Агрегация данных по тридцатилетним интервалам за 90-летний период выявила разнонаправленные сезонные тренды: Для весеннего периода предполагаемый момент изменения приходится на 1973–1975 гг., после которого увеличивается доля более влажных лет, тогда как для летнего периода — на конец 1980-х – начало 1990-х гг., где чаще наблюдаются экстремальные засухи и влажные годы. Однако средний уровень существенно не смещается. Такие изменения оказывают значительные влияния на агроклиматические условия региона и требуют адаптации земледельческих практик к новым климатическим реалиям. В заключении подчёркивается необходимость долгосрочного мониторинга климатических показателей и внедрения адаптивных агротехнологий для устойчивого сельскохозяйственного производства в условиях нарастающей аридизации.

Ключевые слова: засуха, аридизация, стандартизированный индекс осадков SPI, влагообеспеченность, Северный Казахстан, Иртышск, увлажнение, засушливость, климатические изменения.

AN EVALUATION OF THE DYNAMICS OF SPRING-SUMMER DROUGHT FORMATION IN THE STEPPE REGION OF NORTHERN KAZAKHSTAN

Research article

Kusainova A.A.^{1,*}, Mezentseva O.V.², Zemtsov V.A.³, Tusupbekov Z.A.⁴¹ ORCID : 0000-0002-4524-3765;² ORCID : 0000-0003-1982-2234;³ ORCID : 0000-0002-9376-1073;⁴ ORCID : 0000-0002-8560-6188;¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan² Omsk State Pedagogical University, Omsk, Russian Federation³ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation⁴ Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, Omsk, Russian Federation

* Corresponding author (aimarh[at]mail.ru)

Suggested: 21.04.2026; Accepted: 01.06.2026; Published: 19.06.2026

Abstract

The article evaluates the dynamics of the development of spring and summer drought formation in the steppe zone of Northern Kazakhstan over the period of 1936–2025. The main focus is on analysing moisture availability during the growing season using the methodology for calculating the Standardised Precipitation Index (SPI), suggested by T. B. McKee, N. J. Doesken and J. Kleist in 1993, which is based on statistical analysis of precipitation and is used to determine the extent of precipitation deficits over time intervals of varying durations. The application of this index makes it possible to assess the intensity and recurrence of droughts. The SPI value of 0.1 and above is used as a criterion for sufficient moisture, with higher



values indicating greater moisture; and a value of -0.1 and below is used as a criterion for aridity, with lower values indicating greater aridity of the area. Aggregating the data in 30-year intervals over a 90-year period identified mixed seasonal trends: For the spring period, the presumed turning point occurred between 1973 and 1975, after which the proportion of wetter years increased; whereas for the summer period, the turning point occurred in the late 1980s and early 1990s, when extreme droughts and wet years were observed more frequently. However, the average level does not shift significantly. Such changes have a significant impact on the region's agroclimatic conditions and require the adaptation of agricultural practices to the new climatic realities. The conclusion emphasises the need for long-term monitoring of climatic indicators and the introduction of adaptive agricultural technologies to ensure sustainable agricultural production in the context of increasing aridisation.

Keywords: drought, aridisation, Standardised Precipitation Index (SPI), moisture availability, Northern Kazakhstan, Irtyshtsk, moisturisation, aridity, climate change.

Введение

Степная зона Северного Казахстана, обладающая уникальными природными характеристиками и значительным сельскохозяйственным потенциалом, в последние десятилетия подвергается существенным изменениям, связанным с процессами засушливости климата. Актуальность исследования степени засушливости в данном регионе обусловлена его стратегическим значением для хозяйственной деятельности страны, а также необходимостью разработки эффективных мер адаптации к изменяющимся климатическим условиям.

В последние годы наблюдается тенденция к усилению засушливости климата, что проявляется в увеличении частоты и продолжительности засушливых вегетационных периодов, а также изменении гидрологического режима степных территорий. Эти процессы оказывают значительное влияние на состояние экосистем, сельскохозяйственное производство и социально-экономическое развитие региона.

Климатические исследования, проведённые в Сибири и прилегающих районах, подтверждают прогрессирующий характер глобального потепления в этом регионе. Учёные [1], [2], [3] установили, что за последние десятилетия наблюдается устойчивое увеличение частоты экстремально высоких температурных значений, особенно в весенне-летний период. В то же время анализ режима осадков показывает общее увеличение их количества в течение года, за исключением летних месяцев, для которых характерна тенденция к снижению осадков в отдельных районах. Отсюда следует, что, несмотря на общий рост атмосферных осадков, пространственная и сезонная неравномерность сохраняется, что может влиять на агроклиматические условия и водный баланс территории.

Дефицит влаги характеризуется как сложное природное явление с наибольшими аномалиями температуры и влажности в региональном масштабе, то есть явление, представляющее собой снижение влажности окружающей среды по сравнению со средним ее состоянием за короткий промежуток времени [2], [3].

В современный период ученые А.А. Чибилёв, А.Н. Золотокрылин, М.Е. Бельгибаев, Г. Кирхенгаст подчеркнули роль климатических изменений в усилении аридизации [4], [5], [6].

В работах В.В. Паромова, В.А. Земцова, С.Г. Копысова, Н.Г. Ганеши, Г.В. Белоненко изучавших изменения климата Западной Сибири, определена стадия инерции потепления в 1986–2015 гг. и сделан прогноз гидроклиматических ресурсов до 2030 г. [7], [8], [9], [10], [11]. В результате исследований данных ученых выявлено, что на территории Западной Сибири за последние 30 лет среднегодовые температуры воздуха по сравнению с нормой предыдущего периода за тот же промежуток времени повсеместно повысились.

В исследованиях К. Акшалова, С.С. Байшоланова и др. [12] установлено, что в 2020–2021 гг. в пределах Северо-Казахстанской и Костанайской областей в течение вегетационного периода наблюдались условия слабой засушливости. Для Павлодарской области была характерна умеренная засушливость, тогда как в Акмолинской области отмечалась высокая степень засушливости. Таким образом, территория лесостепной зоны в целом характеризуется слабо- и умеренно засушливыми условиями, в то время как степная зона отличается выраженной засушливостью. Анализ временной динамики показал, что в лесостепной и степной зонах преобладают годы с достаточным увлажнением и отсутствием засухи, тогда как в сухостепной зоне, напротив, установлено большее количество засушливых лет с дефицитом влаги [13].

Согласно исследованиям С.С. Байшоланова и Д.К. Байбазарова [14], предполагается, что в северных регионах Казахстана в условиях климатического потепления к 2050 году агроклиматические условия для выращивания зерновых культур существенно ухудшатся, что приведёт к снижению их урожайности на 37–49%.

Исследование степени засушливости степной зоны Казахстана имеет важное практическое значение для разработки стратегий устойчивого развития региона, сохранения его природных ресурсов и обеспечения продовольственной безопасности страны. Особую значимость приобретает исследование механизмов аридизации в аридных и полуаридных зонах, где наблюдается наиболее выраженная реакция на климатические изменения. Анализ временных рядов метеорологических данных и индексов осадков позволяет выявить тенденции и закономерности, характеризующие динамику климатических процессов в этих регионах.

Целью данного исследования является оценка динамики весенне-летних засушливых явлений в степной зоне Северного Казахстана, включающая анализ повторяемости за многолетний период. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- оценка возможного наступления весенних и летних засух на основе результатов расчётов стандартизированного индекса осадков SPI;
- исследование тенденций изменения степени засушливости территории с целью выявления усиления или ослабления аридизации;
- анализ повторяемости весенних и летних засух, усреднённых по тридцатилетним периодам за последние 90 лет.

Методы и принципы исследования

В настоящем исследовании использована методология расчёта стандартизированного индекса осадков (SPI — Standardized Precipitation Index), разработанная для количественной оценки отклонений выпавших осадков от климатической нормы за определённый период времени [15], [16]. Для анализа полученных результатов применены статистические методы.

Методология расчёта стандартизированного индекса осадков SPI была разработана в 1993 году исследователями из США — Т.Б. Макки, Н.Дж. Доускеном и Дж. Кляйстом – в качестве инструмента наблюдения за динамикой засух. Основное назначение индекса SPI заключается в количественной характеристике водного баланса территории, а также в поддержке процессов мониторинга и прогноза длительности и интенсивности засушливых или влажных периодов.

Расчёт индекса SPI производится по формуле (1) [16]:

$$SPI = \frac{(P - \mu P)}{\sigma} \quad (1)$$

где P — сумма осадков за период;

μP — среднее многолетнее количество осадков;

σ — стандартное отклонение от многолетних наблюдений.

Категории степени увлажнения или засушливости, определяемые по значению индекса SPI составляют: от 0,1 и выше по показателю увлажнения, при этом, чем выше показатель, тем больше увлажнение, и показателю засушливости от ...-0,1 и ниже, при этом чем ниже показатель, тем выше засушливость территории (Табл.1).

Таблица 1 - Степень увлажнения в зависимости от значения индекса SPI

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.11.1>

Значение SPI	Категория
2,00 и более	Чрезвычайное увлажнение
от 1,5 до 1,99	Сильное увлажнение
от 1,00 до 1,49	Умеренное увлажнение
от 0,0 до 0,99	Мягкое увлажнение
от 0,0 до -0,99	Слабая засушливость
от -1,00 до -1,49	Умеренная засушливость
от -1,5 до -1,99	Сильная засуха
-2,00 и менее	Чрезвычайная засуха

Оценка частоты наступления весенних и летних засух выполняется на территории Северного Казахстана в степной зоне, по данным метеорологических наблюдений села Иртышск, за 1936-2025 годы (90 лет). Временной интервал исследования разделён на три 30-летних периода:

I-период (1936–1965 гг.);

II-период(1966–1995 гг.);

III-период (1996–2025 гг.).

Для оценки повторяемости и степени весенне-летних засушливых явлений с применением индекса SPI требуется проанализировать данные о среднемесячных осадках за выбранный временной отрезок. Информация должна быть агрегирована по трёхмесячным периодам, например, март–май — для весны и июнь–август — для лета.

Обсуждение результатов

В таблице 2 представлены результаты расчетов индекса SPI, произведенных на основе метеорологических данных территории с. Иртышск, расположенного в Северном Казахстане [17].

Таблица 2 - Результаты расчетов стандартизированного индекса осадков (SPI) за 1936–2025гг. на территории с. Иртышск

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.11.2>

Год	SPI		Год	SPI		Год	SPI	
	март-май	июнь-август		март-май	июнь-август		март-май	июнь-август
1936	-0,72	1,8	1966	0,79	-0,93	1996	-1,34	-0,74
1937	-0,54	-0,59	1967	0,07	-0,38	1997	-0,58	-0,46
1938	1,75	0,08	1968	0,6	1,5	1998	-0,15	-1,69
1939	-1,12	0,31	1969	-0,11	-0,56	1999	-0,83	-0,05
1940	-0,81	-1,03	1970	1,51	0,22	2000	1,71	-1,2

Год	SPI		Год	SPI		Год	SPI	
	март-май	июнь-август		март-май	июнь-август		март-май	июнь-август
1941	-0,63	-0,08	1971	2,47	0,87	2001	-0,49	0,6
1942	-0,32	-1,03	1972	0,7	0,1	2002	1,37	1,37
1943	-0,9	-0,18	1973	-1,74	-0,2	2003	-0,32	2,17
1944	-0,67	-0,29	1974	-0,59	-0,62	2004	0,14	0,26
1945	-0,32	-0,53	1975	0,56	-0,98	2005	-0,24	1,27
1946	-0,05	1,13	1976	-0,78	-0,8	2006	1,07	-0,12
1947	0,58	0,48	1977	-1,12	0,58	2007	-0,32	-0,25
1948	0,36	0,05	1978	-0,78	0,34	2008	-0,66	-1,15
1949	-0,38	0,27	1979	-0,4	1,06	2009	-0,62	2,24
1950	1,12	-0,96	1980	-1,4	1,3	2010	0,23	-0,33
1951	-0,66	-1,74	1981	-0,3	-1,04	2011	-0,36	0,26
1952	-0,63	-1,5	1982	-0,35	-0,85	2012	-0,41	-1,49
1953	0,08	0,64	1983	-0,69	-0,8	2013	2,22	1,63
1954	3,63	0,46	1984	0,7	-0,81	2014	-1,04	-0,43
1955	-1,08	-1,02	1985	0,41	0,54	2015	0,31	-0,17
1956	0,31	0,27	1986	0,6	1,35	2016	-0,11	0,49
1957	1,43	0,18	1987	1,89	-1,28	2017	0,02	-1,33
1958	0,18	-0,75	1988	-0,5	-1,45	2018	1,79	-0,33
1959	0,67	1,02	1989	0,22	-1,12	2019	0,4	-0,53
1960	-0,05	3,42	1990	0,03	-0,26	2020	-0,62	-0,48
1961	-1,03	0,61	1991	-2,24	0,66	2021	-0,36	0,62
1962	-0,36	-0,44	1992	-0,59	0,66	2022	-1,38	-0,28
1963	-0,45	0,18	1993	0,75	3,03	2023	-1,51	-0,46
1964	1,03	-0,25	1994	0,51	0,1	2024	2,09	0,57
1965	-0,45	-0,49	1995	-0,21	-0,21	2025	1,1	0,12

На графике (рисунок 1) представлена многолетняя изменчивость стандартизированного индекса осадков (SPI) для весеннего (март–май) и летнего (июнь–август) сезонов по метеостанции Иртышск за 90-летний период наблюдений. Значения индекса колеблются в широком диапазоне от выражено засушливых ($SPI < -2$) до избыточно увлажнённых условий ($SPI > +3$), что свидетельствует о высокой межгодовой вариабельности увлажнения.

Весенний период характеризуется значительными колебаниями с отдельными экстремально влажными годами (до $SPI \approx +3,5$) и засушливыми эпизодами (до $SPI \approx -2$). Летний сезон также демонстрирует выраженную изменчивость, однако амплитуда колебаний несколько сглажена по сравнению с весной.

Линейные тренды для обоих сезонов имеют положительный наклон, что указывает на слабую тенденцию к увеличению степени увлажнения территории. Однако крайне низкие значения коэффициента детерминации ($R^2 = 0,001$ и $R^2 = 0,0005$) свидетельствуют о том, что временной фактор практически не объясняет наблюдаемую вариацию SPI.

Это означает, что выявленные тренды статистически незначимы, а основную роль в формировании режима увлажнения играют естественные климатические колебания, то есть изменения осадков преимущественно обусловлены природной изменчивостью климата. Антропогенное воздействие, включая мероприятия по целенаправленному изменению климатических характеристик, в пределах района исследования отсутствует.

Красной линией на графике обозначен условный уровень умеренного увлажнения ($SPI \approx 1$), относительно которого наблюдается чередование засушливых и влажных периодов без устойчивой тенденции к их преобладанию.

Несмотря на наличие формально положительных линейных трендов, статистическая проверка t-критерий Стьюдента (весна 0,30; лето 0,21) и p-value (весна 0,76; лето 0,83) показала при стандартном уровне значимости (5%) $p > 0,05$, их полную незначимость. Таким образом, за период 1936–2025 гг. для метеостанции Иртышск не выявлено достоверных изменений степени увлажнения ни в весенний, ни в летний сезоны. Режим увлажнения определяется преимущественно высокой межгодовой климатической изменчивостью.

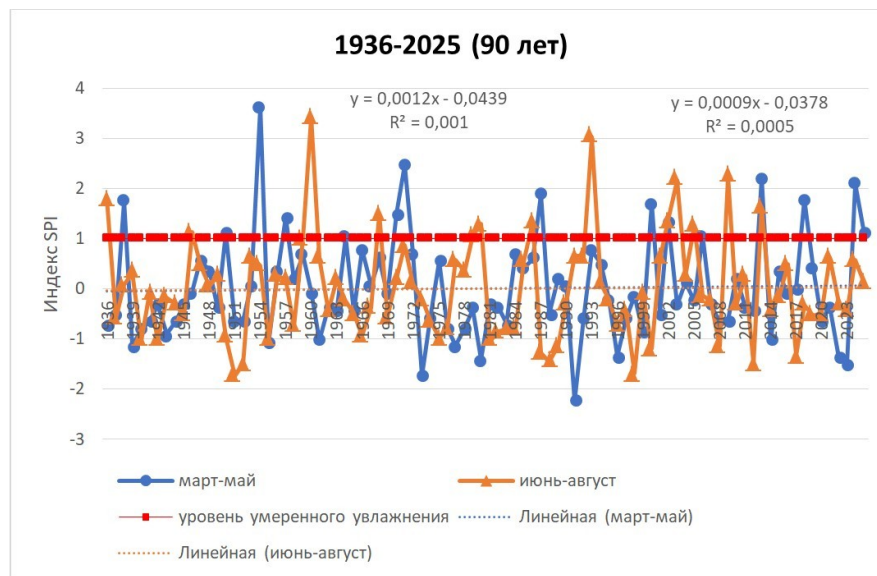


Рисунок 1 - Динамика степени увлажнения территории по индексу SPI по метеостанции Иртышск за весь период (1936–2025 гг.) за 90 лет

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.11.3>

Примечание: рассчитано по методике Т.Б. Макки и др. [16]

В I- периоде (1936–1965 гг.) (рисунок 2) по метеостанции Иртышск выявлены слабые положительные тенденции изменения индекса SPI как в весенний, так и в летний периоды. Однако значения коэффициента детерминации ($R^2 = 0,0331$ и $R^2 = 0,0084$) свидетельствуют о крайне низкой объясняющей способности трендов. Расчёт t-критерия Стьюдента показал, что полученные значения существенно ниже критического уровня ($t < t_{кр}$), а соответствующие p-value превышают 0,05. Это указывает на отсутствие статистически значимых изменений увлажнения. Таким образом, динамика индекса SPI в рассматриваемый период определяется межгодовой изменчивостью климатических условий, а не устойчивыми долгосрочными тенденциями.

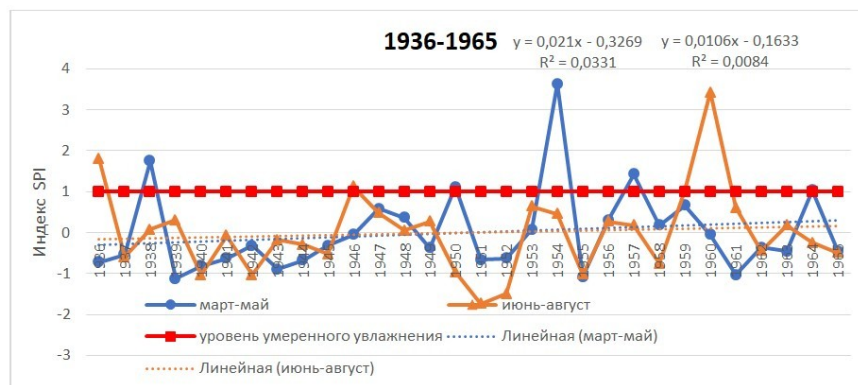


Рисунок 2 - Динамика степени увлажнения территории по индексу SPI по метеостанции Иртышск за I-период 1936–1965 гг.

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.11.4>

Примечание: рассчитано по методике Т.Б. Макки и др. [16]

Линейный анализ динамики индекса SPI за II-период (1966–1995 гг.) (рисунок 3) выявил слабо выраженные разнонаправленные тенденции: снижение увлажнения в весенний период (март–май) и незначительное увеличение в летний (июнь–август). Однако крайне низкие значения коэффициента детерминации ($R^2 < 0,03$) и результаты оценки t-критерия Стьюдента ($t < t_{кр}$, $p \gg 0,05$) свидетельствуют об отсутствии статистически значимых трендов. Изменения носят случайный характер и не могут интерпретироваться как устойчивые климатические сдвиги.



Рисунок 3 - Динамика степени увлажнения территории по индексу SPI по метеостанции Иртышск за II-период (1966–1995 гг.)

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.11.5>

Примечание: рассчитано по методике Т.Б. Макки и др. [16]

В III периоде (1996–2025 гг.) (рисунок 4) по метеостанции Иртышск анализ динамики индекса SPI показал отсутствие статистически значимых трендов увлажнения территории. Для весеннего периода (март–май) выявлена слабая положительная тенденция, тогда как для летнего периода (июнь–август) тренд практически отсутствует. Однако значения t-критерия Стьюдента существенно ниже критического уровня ($t < t_{кр}$), а p-value превышает 0,05, что свидетельствует о статистической незначимости выявленных тенденций. Таким образом, изменения степени увлажнения носят случайный характер и обусловлены межгодовой климатической изменчивостью, а не направленными долгосрочными процессами.

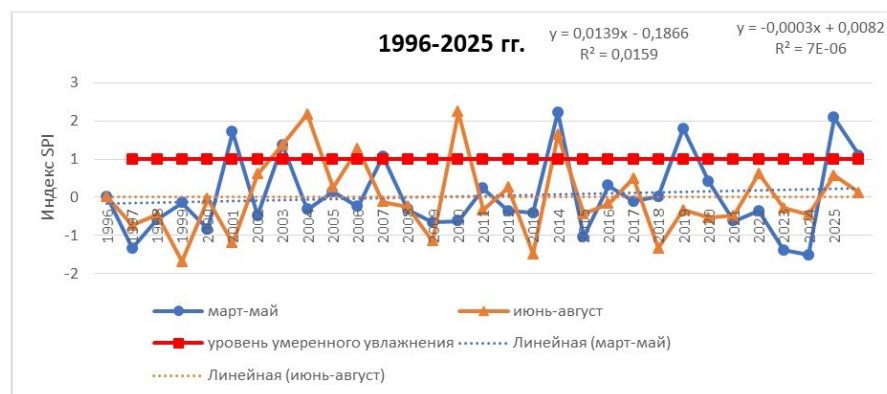


Рисунок 4 - Динамика степени увлажнения территории по индексу SPI по метеостанции Иртышск за III -период (1996–2025 гг.)

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.70.11.6>

Примечание: рассчитано по методике Т. Б. Макки и др. [16]

Непараметрический тест Манна–Кендалла применяется для проверки статистической значимости тренда во временных рядах, особенно когда данные не подчиняются нормальному распределению (что часто бывает с климатическими или гидрологическими показателями вроде SPI).

Тест Манна–Кендалла оценивает, есть ли монотонная тенденция (рост или спад) во временном ряду, без предположений о линейности. Он основан на сравнении всех пар значений во времени и подсчёте числа случаев, когда более поздние значения больше или меньше ранних. Сравняется каждое последующее значение со всеми предыдущими. Проверяется, увеличиваются ли значения со временем.

Результаты теста Манна–Кендалла при уровне значимости $\alpha = 0,05$ показали, что для всех периодов и обоих сезонов значения τ малы и p-value выше 0,05, что говорит об отсутствии статистически значимых монотонных тенденций SPI как весной, так и летом за весь исследуемый период. Результаты непараметрического теста Манна–Кендалла (при уровне значимости $\alpha = 0,10$) также во всех рассматриваемых временных интервалах и для обоих сезонов (весна и лето) не выявил статистически значимых монотонных тенденций. Значения τ Кендалла близки к нулю, а p-value существенно превышает уровень значимости 0,1, что указывает на отсутствие выраженного роста или снижения SPI во времени.

Проведенная оценка тренда через наклон Сенна даёт скорость изменения SPI во времени (в единицах SPI/год). Оценка величины тренда по наклону Сенна за весь период (1936–2025 гг.) показала крайне слабое увеличение индекса



SPI в весенний период (+0,006 в год), что соответствует незначительному увлажнению. В летний период выявлен практически нулевой тренд (–0,002 в год), указывающий на отсутствие направленных изменений. Совместный анализ с критерием Манна–Кендалла подтверждает, что выявленные тенденции статистически незначимы ($p > 0,05$).

Проверка рядов SPI тестом Петтитта (на разрыв/смену режима) обнаружила следующее. Результаты теста Петтитта для временного ряда индекса SPI за период 1936–2025 гг. по метеостанции Иртышск не выявили статистически значимых точек разладки. Для весеннего периода (март–май) предполагаемый момент изменения приходится на 1973–1975 гг., после которого увеличивается доля положительных значений (более влажные годы). Тогда как для летнего периода (июнь–август) — на конец 1980-х – начало 1990-х гг. чаще наблюдаются экстремальные засухи и влажные годы, но средний уровень существенно не смещается. Однако значения p -value превышают критический уровень значимости ($p > 0,05$), что не позволяет считать выявленные изменения достоверными. Таким образом, многолетняя динамика увлажнения характеризуется отсутствием резких переходов и определяется межгодовой и внутривековой климатической изменчивостью.

Заключение

Таким образом, исходя из проведённого исследования динамики формирования весенне-летних засушливых явлений в степной зоне Северного Казахстана за период 1936–2025 гг., можно сделать следующие выводы.

В целом временной ряд демонстрирует выраженную межгодовую изменчивость увлажнённости территории с чередованием влажных и засушливых фаз. Линейный тренд указывает на наличие слабой направленной тенденции (усиление или ослабление увлажнения — в зависимости от конкретных расчётов), однако её выраженность остаётся умеренной, что говорит о высокой природной вариабельности климатической системы региона.

Результаты t -критерия Стьюдента показывают, что различия между выделенными периодами по средним значениям SPI либо статистически незначимы, либо слабо значимы, что подтверждает отсутствие резких устойчивых изменений среднепериодического уровня увлажнения.

Анализ p -value в целом свидетельствует о том, что выявленный линейный тренд не всегда достигает строгого уровня статистической значимости (0,05), что дополнительно указывает на преобладание колебательного характера динамики над устойчивым трендовым изменением.

В то же время тест Петтитта позволяет предположить наличие возможного момента структурного сдвига в ряду, что может быть связано с изменением климатических условий или режимов атмосферной циркуляции во второй половине рассматриваемого периода. Однако этот сдвиг не носит абсолютно однозначного характера и требует дополнительной интерпретации с учётом гидрометеорологических факторов.

Таким образом, динамика SPI за 1936–2025 гг. характеризуется преимущественно колебательным режимом с возможными слабыми признаками изменения климатического увлажнения и отдельными периодами структурной перестройки, но без устойчивого и резко выраженного долгосрочного тренда.

Фиксируемые колебания влагообеспеченности подчёркивают необходимость постоянного мониторинга климатических параметров и разработки адаптивных мер в аграрной политике региона. В условиях изменчивости климата ключевым фактором устойчивого сельскохозяйственного производства становится своевременное прогнозирование засушливых тенденций и оптимизация водопользования.

Полученные результаты имеют прикладное значение для планирования сельскохозяйственного производства, водных ресурсов и землепользования в условиях нарастающей климатической нестабильности.

В условиях возрастающей частоты и интенсивности экстремальных метеорологических явлений, таких как засухи и суховеи, особую актуальность приобретает разработка адаптационных стратегий, направленных на минимизацию негативных последствий аридизации для сельского хозяйства, инфраструктуры и экосистем. Таким образом, исследование аридизации в контексте глобальных климатических изменений становится неотъемлемой частью научного обеспечения стратегий адаптации к новым климатическим реалиям и сохранения экологического равновесия в аридных зонах.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Watanabe T. Long-Term Trends of Extreme Climate Indexes in the Southern Part of Siberia in Comparison with Those of Surrounding Regions / T. Watanabe, H. Matsuyama, I. Kuzhevskaja [et al.] // Atmosphere. — 2023. — Vol. 14, № 7. — P. 1131. — DOI: 10.3390/atmos14071131.
2. Kusainova A.A. The Impact of Intensified Aridization Caused by Moisture Deficit on the Productivity of Grain Crops in Northern Kazakhstan / A.A. Kusainova, G.N. Chistyakova, G.M. Zhangozhina // Research in Ecology. — 2025. — Vol. 7, № 3. — P. 199–211. — DOI: 10.30564/re.v7i3.10487.



3. Мезенцева О.В. Географические закономерности зоны оптимальных гидролого-климатических условий для аграрного природопользования (на примере Западной Сибири) : специальность 25.00.36 «Геоэкология (по отраслям)» : дис. ... д-ра геогр. наук / О.В. Мезенцева. — Омск, 2010. — 390 с.
4. Золотокрылин А.Н. Глобальное потепление, опустынивание/деградация и засухи в засушливых регионах / А.Н. Золотокрылин // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2019. — № 1. — С. 3–13. — DOI: 10.31857/S2587-5566201913-13.
5. Бельгибаев М.Е. Влияние глобального потепления климата на процессы опустынивания в степной зоне Казахстана / М.Е. Бельгибаев // Степи Северной Евразии : материалы VI Международного симпозиума и VIII Международной школы-семинара «Геоэкологические проблемы степных регионов». — Оренбург, 2012. — С. 118–121.
6. Kirchengast G. A traceable global warming record and clarity for the 1.5 °C and well below 2 °C goals / G. Kirchengast, M. Pichler // Communications Earth & Environment. — 2025. — Vol. 6. — P. 402. — DOI: 10.1038/s43247-025-02368-0.
7. Паромов В.В. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогноз гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. / В.В. Паромов, В.А. Земцов, С.Г. Копысов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2017. — Т. 328, № 1. — С. 62–74.
8. Zemtsov V.A. Assessment of the effect of climate change on water balance of West Siberian Plain based on the Mezentsev model / V.A. Zemtsov, S.G. Kopysov, V.V. Paromov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2018. — Vol. 201. — P. 012026. — DOI: 10.1088/1755-1315/201/1/012026.
9. Matsuyama H. Extreme drought around Tomsk, Russia in summer 2012 in comparison with other regions in Western Siberia / H. Matsuyama, T. Watanabe, V.A. Zemtsov // Water. — 2023. — Vol. 15, № 3. — P. 388. — DOI: 10.3390/w15030388.
10. Ganeshi N.G. Prominent impacts of snow–hydrological processes on near-surface temperature variability over Western Siberia / N.G. Ganeshi, Y. Takaya, K.K. Komatsu [et al.] // Journal of Hydrology. — 2025. — Vol. 658. — P. 133187.
11. Белоненко Г.В. Формирование и особенности влаго- и теплообмена в ландшафтных провинциях Западно-Сибирской равнины / Г.В. Белоненко, Ж.А. Тусупбеков, Н.Л. Ряполова // Проблемы региональной экологии. — 2015. — № 3. — С. 174–179.
12. Акшалов К. Анализ агрометеорологических условий вегетационного периода и урожайности яровой пшеницы в Акмолинской области Республики Казахстан / К. Акшалов, С. Байшоланов, Д. Ауесханов [и др.] // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. — 2022. — № 605. — С. 41–57.
13. Tusupbekov Z.A. Assessment of long term variability of heat water balance characteristics during the growing season of Northern Kazakhstan / Z.A. Tusupbekov, O.V. Mezentseva, A.A. Kusainova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2022. — Vol. 1010. — P. 012067. — DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012067.
14. Байшоланов С.С. Влияние изменения климата на урожайность яровой пшеницы / С.С. Байшоланов, Д.К. Байбазаров // Гидрометеорология и экология. — 2013. — № 1(68). — С. 16–23.
15. Салмин А.С. Анализ временных рядов стандартизированного индекса осадков (SPI) / А.С. Салмин, И.Ф. Асауляк, А.И. Белолюбцев // Успехи современного естествознания. — 2021. — № 5. — С. 101–109.
16. Золотокрылин А.Н. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами / А.Н. Золотокрылин, Е.А. Черенкова, Т.Б. Титкова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2020. — Т. 84, № 2. — С. 207–217.
17. Официальный метеорологический информационный сайт «Казгидромет» / Республиканское государственное предприятие «Казгидромет». — Астана, 2026. — URL: http://ecodata.kz:3838/dm_climat_ru/ (дата обращения: 21.04.2026).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Watanabe T. Long-Term Trends of Extreme Climate Indexes in the Southern Part of Siberia in Comparison with Those of Surrounding Regions / T. Watanabe, H. Matsuyama, I. Kuzhevskaja [et al.] // Atmosphere. — 2023. — Vol. 14, № 7. — P. 1131. — DOI: 10.3390/atmos14071131.
2. Kusainova A.A. The Impact of Intensified Aridization Caused by Moisture Deficit on the Productivity of Grain Crops in Northern Kazakhstan / A.A. Kusainova, G.N. Chistyakova, G.M. Zhangozhina // Research in Ecology. — 2025. — Vol. 7, № 3. — P. 199–211. — DOI: 10.30564/re.v7i3.10487.
3. Mezentseva O.V. Geograficheskiye zakonomernosti zony optimal'nykh gidrologo-klimaticheskikh usloviy dlya agrarnogo prirodnopol'zovaniya (na primere Zapadnoy Sibiri) [Geographical patterns of the zone of optimal hydrological and climatic conditions for agricultural nature management (on the example of Western Siberia) : specialty 25.00.36 "Geoecology (by industry)" : dis. ... dr. geogr. sciences / O.V. Mezentseva. — Омск, 2010. — 390 p. [in Russian]
4. Zolotokrylin A.N. Global'noye poteplyeniye, opustynivaniye/degradatsiya i zasukhi v zasushlivykh regionakh [Global warming, desertification/degradation and droughts in arid regions] / A.N. Zolotokrylin // Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series]. — 2019. — № 1. — P. 3–13. — DOI: 10.31857/S2587-5566201913-13. [in Russian]
5. Belgibaev M.E. Vliyaniye global'nogo poteplyeniya klimata na protsessy opustynivaniya v stepnoy zone Kazakhstana [The impact of global climate warming on desertification processes in the steppe zone of Kazakhstan] / M.E. Belgibaev // Stepi Severnoy Yevrazii [Steppes of Northern Eurasia] : proceedings of the VI International Symposium and VIII International School-Seminar "Geoecological Problems of Steppe Regions". — Оренбург, 2012. — P. 118–121. [in Russian]



6. Kirchengast G. A traceable global warming record and clarity for the 1.5 °C and well below 2 °C goals / G. Kirchengast, M. Pichler // *Communications Earth & Environment*. — 2025. — Vol. 6. — P. 402. — DOI: 10.1038/s43247-025-02368-0.
7. Paromov V.V. Klimat Zapadnoy Sibiri v fazu zamedleniya potepleniya (1986–2015 gg.) i prognoz gidroklimaticheskikh resursov na 2021–2030 gg. [The climate of Western Siberia during the warming slowdown phase (1986–2015) and forecast of hydroclimatic resources for 2021–2030] / V.V. Paromov, V.A. Zemtsov, S.G. Kopysov // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. — 2017. — Vol. 328, № 1. — P. 62–74. [in Russian]
8. Zemtsov V.A. Assessment of the effect of climate change on water balance of West Siberian Plain based on the Mezentsev model / V.A. Zemtsov, S.G. Kopysov, V.V. Paromov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2018. — Vol. 201. — P. 012026. — DOI: 10.1088/1755-1315/201/1/012026.
9. Matsuyama H. Extreme drought around Tomsk, Russia in summer 2012 in comparison with other regions in Western Siberia / H. Matsuyama, T. Watanabe, V.A. Zemtsov // *Water*. — 2023. — Vol. 15, № 3. — P. 388. — DOI: 10.3390/w15030388.
10. Ganeshi N.G. Prominent impacts of snow–hydrological processes on near-surface temperature variability over Western Siberia / N.G. Ganeshi, Y. Takaya, K.K. Komatsu [et al.] // *Journal of Hydrology*. — 2025. — Vol. 658. — P. 133187.
11. Belonenko G.V. Formirovaniye i osobennosti vlago- i teploobmena v landshaftnykh provintsiyakh Zapadno-Sibirskoy ravniny [Formation and features of moisture and heat exchange in the landscape provinces of the West Siberian Plain] / G.V. Belonenko, Zh.A. Tusupbekov, N.L. Ryapolova // *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of Regional Ecology]. — 2015. — № 3. — P. 174–179. [in Russian]
12. Akshalov K. Analiz agrometeorologicheskikh usloviy vegetatsionnogo perioda i urozhaynosti yarovoy pshenitsy v Akmolinskoy oblasti Respubliki Kazakhstan [Analysis of agrometeorological conditions of the growing season and spring wheat yield in the Akmola Region of the Republic of Kazakhstan] / K. Akshalov, S. Baisholanov, D. Aueskhanov [et al.] // *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova* [Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voyeykov]. — 2022. — № 605. — P. 41–57. [in Russian]
13. Tusupbekov Z.A. Assessment of long term variability of heat water balance characteristics during the growing season of Northern Kazakhstan / Z.A. Tusupbekov, O.V. Mezentseva, A.A. Kusainova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2022. — Vol. 1010. — P. 012067. — DOI: 10.1088/1755-1315/1010/1/012067.
14. Baisholanov S.S. Vliyaniye izmeneniya klimata na urozhaynost' yarovoy pshenitsy [The impact of climate change on spring wheat yield] / S.S. Baisholanov, D.K. Baibazarov // *Gidrometeorologiya i ekologiya* [Hydrometeorology and Ecology]. — 2013. — № 1(68). — P. 16–23. [in Russian]
15. Salmin A.S. Analiz vremennykh ryadov standartizirovannogo indeksa osadkov (SPI) [Analysis of time series of the Standardized Precipitation Index (SPI)] / A.S. Salmin, I.F. Asulyak, A.I. Belolyubtsev // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Advances in Modern Natural Science]. — 2021. — № 5. — P. 101–109. [in Russian]
16. Zolotokrylin A.N. Aridizatsiya zasushlivykh zemel' Yevropeyskoy chasti Rossii i svyaz' s zasukhami [Aridization of arid lands in the European part of Russia and its relationship with droughts] / A.N. Zolotokrylin, E.A. Cherenkova, T.B. Titkova // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series]. — 2020. — Vol. 84, № 2. — P. 207–217. [in Russian]
17. Ofitsial'nyy meteorologicheskiy informatsionnyy sayt "Kazgidromet" [Official meteorological information website "Kazhydromet"] / Republican State Enterprise "Kazhydromet". — Astana, 2026. — URL: http://ecodata.kz:3838/dm_climat_ru/ (accessed: 21.04.2026). [in Russian]