

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе «8D05204 – Метеорология»

РЫСАЛИЕВА ЛАУРА СЕРГЕЕВНА

Характеристики атмосферных засух и их будущие проекции в Северном Казахстане

Общая характеристика диссертационного исследования. Диссертационная работа посвящена изучению закономерностей формирования, проявления и будущей изменчивости атмосферных засух в Северном Казахстане (включая Акмолинскую, Северо-Казахстанскую, Костанайскую и Павлодарскую области) в условиях современного изменения климата.

Актуальность диссертационного исследования. Аномальные природные явления фиксируются ежегодно в различных частях мира. Согласно докладу МГЭИК [1] и другим многочисленным исследованиям [2–5], глобальное потепление оказывает существенное влияние на увеличение частоты экстремальных погодных явлений, таких как засухи, периоды сильных осадков, наводнения и аномальные морозы. При этом засухи являются наиболее разрушительным видом метеорологических экстремумов: в глобальном масштабе на их долю приходится относительно небольшая часть природных катастроф, однако именно они обуславливают наибольшие человеческие и экономические потери.

Республика Казахстан, значительная часть территории которой располагается в аридных и полуаридных зонах, относится к числу стран, наиболее чувствительных к засушливым процессам [6].

Особенно уязвимыми к засухам являются сельскохозяйственные регионы, в частности Северный Казахстан.

В последние десятилетия здесь отмечается увеличение частоты и интенсивности атмосферных засух, приводящее к значительным потерям урожая и создающее угрозу продовольственной безопасности [7]. По данным анализа неблагоприятных агрометеорологических явлений, около 80 % потерь урожая в Казахстане связано именно с атмосферными и почвенными засухами, что подчеркивает актуальность их детального изучения, мониторинга и прогнозирования.

Целью диссертационного исследования является выявление закономерностей формирования атмосферных засух в Северном Казахстане на основе сравнительного анализа индексов засушливости, установления их связи с крупномасштабными циркуляционными процессами и оценки их трансформации в условиях будущего климата.

Для реализации указанной цели были поставлены следующие логически взаимосвязанные и последовательные задачи:

1. Выполнить сравнительную оценку современных индексов атмосферных засух и определить их диагностическую информативность для различных сезонов и временных масштабов.

2. Провести пространственно-временной анализ атмосферных засух в Северном Казахстане;

3. Определить влияние дальних связей на формирование атмосферных засух для выделения ведущих мод засушливости и определения доминирующих климатических предикторов;

4. Провести климатическое районирование территории Северного Казахстана по характеру реакции засушливости на циркуляционные факторы;

5. Оценить возможные изменения характеристик атмосферных засух в XXI веке на основе климатических проекций по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5;

6. Разработать и апробировать подход к прогнозированию атмосферных засух на основе выявленных климатических предикторов с использованием методов машинного обучения.

Объект исследования: атмосферные засухи на территории Северного Казахстана.

Предмет исследования: пространственно-временные закономерности атмосферных засух в Северном Казахстане, их связь с крупномасштабными атмосферными циркуляционными процессами и возможности прогнозирования.

Источники материалов исследования: В качестве основного массива данных в работе использовались ежемесячные и суточные ряды температуры воздуха, суммы осадков, а также максимальная и минимальная суточная температура воздуха, полученные из РГП «Казгидромет» Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан за период 1990–2024 гг. по 11 метеорологическим станциям Северного Казахстана <https://www.kazhydromet.kz>. Для оценки состояния растительности и анализа отклика экосистем на засушливые условия применялись спутниковые продукты дистанционного зондирования MODIS и Landsat. Данные MOD13A2 v6.1, включающие 16-дневные композиты NDVI, использовались для расчета индекса состояния растительности (VCI) из NASA LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center), <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v061/>. Дополнительно были задействованы изображения Landsat 8 (Product: LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA), обеспечивающие более высокое пространственное разрешение при извлечении вегетационных и тепловых параметров поверхности Google Earth Engine, https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_TOA.

Для анализа будущих изменений атмосферных засух применялись выходные данные 15 глобальных климатических моделей шестого этапа международного проекта CMIP6. В качестве эталонных наблюдений для коррекции систематических ошибок климатических моделей использовался глобальный климатический архив CHIRTS-daily Climate Hazards Center, University of California Santa Barbara, <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRTSdaily/>.

Кроме того, в исследовании были использованы ежемесячные значения 9 крупномасштабных индексов атмосферной циркуляции за период 1990–2024 гг., характеризующих атмосферно-океанические циркуляционные режимы, такие как Арктическая осцилляция (АО), Северо-Атлантическая осцилляция (NAO), Индекс Эль-Ниньо (ONI), Тихоокеанская декадная осцилляция (PDO), Индийский океанский диполь (DMI/IOD), Скандинавское колебание (SCAND), Индекс Южного колебания (SOI), данные были получены с официального портала Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA).

Методология диссертационного исследования: для выявления статистически значимых тенденций в рядах аномалий температуры воздуха и осадков применялся модифицированный критерий Манна-Кендалла (ММК), а величина и направление трендов оценивались с помощью метода наклона Сена (Theil-Sen slope estimator). Однородность рядов метеорологических параметров проверялась с помощью t-критерия Стьюдента, F-критерия Фишера и критерия Уилкоксона.

Оценка атмосферной засухи осуществлялась на основе метеорологических индексов Стандартизированный индекс осадков (SPI), Стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации (SPEI), Модифицированный индекс засухи Китая (MCZI) и Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), рассчитанных в среде R-Studio на временных масштабах (1, 3, 6, 9, 12 месяцев). Состояние растительности анализировалось по спутниковым индексам состояния растительности (VCI), температурного воздействия (ТСИ) и здоровья растительности (VHI), обработанным в облачной геопространственной платформе Google Earth Engine (GEE). Для выявления наиболее информативного индекса использовался корреляционный анализ Пирсона для количественной оценки связи между метеорологическими и вегетационными индексами. Засушливые эпизоды количественно

характеризовались методами Теории серий (Run Theory), включая оценку средней продолжительности (MDD), частоты (F), интенсивности (MDI) и тяжести (MDS) засух.

Для исследования механизмов формирования атмосферных засух был применен комплекс многомерных статистических методов. Метод главных компонент (PCA) использовался для снижения размерности данных SPI1 и выделения ведущих пространственных мод засух. Метод максимальной ковариации (MCA) позволил определить согласованную структуру изменчивости между SPI1 и крупномасштабными климатическими индексами (EA, AO, NAO, PDO и др.), выявив ключевые предикторы засушливости. Временное запаздывание влияния телесвязей оценивалось с помощью анализа кросс-корреляционных функций (CCF) с лагами от 0 до 12 месяцев. Для выделения однородных подрегионов, одинаково реагирующих на засухи, выполнялась кластеризация методом K-means на основе пространственных компонент (PC1–PC3), полученных PCA. Оптимальное число кластеров определялось по критерию силуэта (silhouette criterion).

Будущие проекции атмосферных засух оценивались по данным 15 глобальных климатических моделей CMIP6 для сценариев SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Для приведения модельных данных в соответствие с наблюдаемыми значениями и устранения систематических смещений была выполнена коррекция ошибок с применением метода квантильного сопоставления (Quantile Mapping, QM). Качество скорректированных данных оценивалось по статистическим метрикам RMSE (среднеквадратическая ошибка), RSR (нормированный корень среднеквадратичной ошибки), Mean Bias (среднее смещение) и коэффициенту корреляции паттернов (PCC).

Прогнозирование засушливых условий выполнялось с использованием методов машинного обучения (Gradient Boosting, Random Forest, XGBoost) на основе выделенных предикторов. Оценка точности моделей проводилась с применением метрик Accuracy, confusion matrix и F1 Score.

Научная новизна работы

1. Впервые для условий Северного Казахстана выполнена комплексная сравнительная оценка метеорологических и спутниковых индексов атмосферных засух (SPI, SPEI, ГТК, MCZI, VHI, VCI, TCI), что позволило установить их сезонную чувствительность и обосновать выбор наиболее информативных показателей засушливости; впервые для региона рассчитан индекс MCZI.

2. Впервые установлены доминирующие крупномасштабные циркуляционные факторы формирования атмосферных засух в Северном Казахстане, определяющие их пространственно-временную неоднородность, что позволило выявить статистически устойчивую пространственную структуру атмосферных засух и выполнить климатическое районирование территории Северного Казахстана с выделением однородных районов.

3. Выполнена оценка трансформации атмосферных засух в Северном Казахстане в условиях будущего климата на основе климатических проекций CMIP6.

4. Впервые реализован подход к прогнозированию атмосферных засух в Северном Казахстане на основе циркуляционных предикторов и методов машинного обучения, обеспечивающий заблаговременное выявление засушливых условий.

Научная и практическая значимость исследования заключается в расширении фундаментальных представлений о закономерностях формирования и пространственно-временной изменчивости атмосферных засух в условиях современного и будущего климата на региональном уровне. Полученные результаты, формируют научную основу для региональной оценки атмосферной засушливости. Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных выводов при разработке региональных систем мониторинга и раннего предупреждения засух, а также при обосновании мер климатической адаптации в аграрном секторе и рационального управления земельными и водными ресурсами.

Положения, выносимые на защиту

- Установлено, что современные индексы атмосферных засух характеризуются различной сезонной чувствительностью и диагностической информативностью в условиях Северного Казахстана, а атмосферные засухи региона обладают устойчивыми пространственно-временными закономерностями, проявляющимися в виде нескольких доминирующих режимов засушливости, что обосновывает необходимость их сравнительного анализа при оценке засушливых условий.

- Выявлено, что формирование атмосферных засух в Северном Казахстане в значительной степени определяется влиянием крупномасштабных атмосферных циркуляционных процессов, при ведущей роли Восточно-Атлантического индекса и модифицирующем влиянии Арктической и Северо-Атлантической осцилляций, что обуславливает пространственную неоднородность засушливых условий региона.

- Показано, что в условиях будущего климата ожидается трансформация сезонной структуры атмосферных засух в Северном Казахстане, наиболее выраженная в весенне-летний период и усиливающаяся при сценариях с повышенным уровнем антропогенного воздействия.

- Разработан и апробирован научно обоснованный подход к прогнозированию атмосферных засух в Северном Казахстане, основанный на использовании выявленных климатических предикторов и методов машинного обучения, обеспечивающий возможность заблаговременного выявления засушливых условий.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлены использованием современных методов исследования. Кроме того достоверность результатов подтверждается наличием публикаций в научных журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором, а также в изданиях рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республик Казахстан (КОКСНВО МНВО РК), и в трудах международных научных конференций.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены лично соискателем. Постановка задачи и обсуждение результатов выполнены совместно с научными консультантами.

Апробация работы. По материалам диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ, в том числе 1 статья в журналах, входящих в базу данных Scopus и Web of Science, 1 статья в изданиях, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК, 1 статья в журнале индексируемый в базе РИНЦ Science Index и 4 тезиса докладов в материалах международных научных конференций.

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

1. «Статистический анализ засушливости на территории Северного Казахстана» // Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых «Фараби Әлемі». Алматы, Казахстан, 6-8 апреля 2021 года. – Алматы: Қазақ университеті, 2021. – 294 стр.

2. «Статистический анализ засушливости на территории Северного Казахстана» // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий. Иркутск, 24-26 ноября 2021 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ». – Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-2009-7.2021.1-547>

3. «Анализ метеорологической засухи в регионе Северного Казахстана на основе расчетов стандартизированного индекса осадков SPI» // Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых «Фараби әлемі». Алматы, Казахстан, 6-8 апреля 2023 года. – Алматы: Қазақ университеті, 2023. – 446 стр.

4. «Оценка пространственно-временного распределения SPI на территории северного Казахстана» // Современные тенденции и перспективы развития

гидрометеорологии в России : материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 23–25 ноября 2022 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ» ; отв. ред. Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Издательство ИГУ, 2023. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-2119-3.2023.1-455>

Публикации. Основные результаты и выводы работы опубликованы в виде 3 статей в отечественных и зарубежных научных изданиях. Среди них:

5. 1 статья в журнале, индексируемый в базе **Scopus и Web of Science**: Seasonal Sensitivity of Drought Indices in Northern Kazakhstan: A Comparative Evaluation and Selection of Optimal Indicators. *Sustainability* 2025, 17, 9413. <https://doi.org/10.3390/su17219413>;

6. 1 статья в журнале входящих в перечень **Комитет по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования МНВО РК в списке 1**: Solar magnetic activity and its terrestrial impact through correlations with drought indices. *Physical Sciences and Technology*, 12(1-2), 38–44. <https://doi.org/10.26577/phst20251214>;

7. 1 статья в журнале индексируемый в базе РИНЦ Science Index: Исследование атмосферной засухи в Центральной Азии // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 2(57). С. 110–120. doi:10.17072/2079-7877-2021-2-110-120 ;

Связь темы диссертации с планами научных работ: Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательского проекта № AP25796409 «Оценка риска атмосферных засух и разработка системы раннего предупреждения для Северного Казахстана на основе машинного обучения» (2025-2027 гг.).

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации - 118 страниц, включает 17 таблиц, 53 рисунков, 163 использованных источников и 13 приложений.