



Научная статья

ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ КАЗАХСТАНА НА ОСНОВЕ ИНДЕКСОВ FWI И FFDI

Гульсезим К. Жусупова^{1,2*} , Даникер В. Чепашев¹ , Диас Б. Мерекеев¹ , Эльмира С. Жилкибаева³ к.с.н. , Дастан Аманкешулы¹ PhD 

¹ТОО «Институт ионосферы», г. Алматы, Казахстан; zhussupova@ionos.kz (Г.К.Ж.), d.chepashev@ionos.kz (Д.В.Ч.), merekeyev.d@ionos.kz (Д.Б.М.), doktor.2020@internet.ru (Д.А.)

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан; zhussupova_gulsezim3@live.kaznu.kz (Г.К.Ж.)

³НАО «Казахский национальный аграрный исследовательский университет», г. Алматы, Казахстан; elmira.zhilkibaeva@kaznaru.edu.kz (Э.С.Ж.)

*Автор корреспонденции: Гульсезим К. Жусупова, zhussupova@ionos.kz

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

природные пожары, индекс пожароопасности, метеорологические данные, Казахстан, изменение климата

АБСТРАКТ

В статье представлены результаты расчета индексов пожароопасности на территории Казахстана за период 20...31 июля 2025 года на основе использования метеорологических данных и спутниковых наблюдений активных пожаров. Также произведен анализ прогнозных метеорологических данных модели Global Forecast System за период апрель-сентябрь 2025 года; в расчетах учитывались ключевые метеорологические параметры: температура воздуха, относительная влажность, скорость ветра и количество осадков. Для валидации полученных результатов использовались данные о термоточках, регистрируемых спутниковыми сенсорами MODIS и VIIRS, сравнительный анализ проводился для двух широко применяемых индексов пожарной опасности: австралийского индекса Forest Fire Danger Index (FFDI) и канадской системы Fire Weather Index (FWI).

Результаты исследования показали, что максимальные значения пожарной опасности наблюдаются в июле, что обусловлено сочетанием высоких температур (до 31...36 °C), низкой относительной влажности (до 13...15 %) и дефицита осадков. Пространственный анализ выявил повышенную пожарную опасность в южных, юго-восточных и центральных регионах страны, тогда как северные территории характеризуются преимущественно низкими и умеренными уровнями риска.

Сравнение индексов показало, что система FWI обладает большей чувствительностью к комплексному воздействию метеорологических факторов, включая накопление сухого топлива и длительную засухливость, в то время как индекс FFDI более чувствителен к кратковременным экстремальным изменениям погодных условий, особенно скорости ветра. Анализ по семи климатическим зонам Кеппена-Гейгера подтвердил статистически значимую ($p < 0,001$) согласованность индексов FWI и FFDI ($r = 0,86...0,98$) независимо от типа климата. Полученные результаты подтверждают обоснованность совместного использования данных индексов для повышения точности прогноза пожарной опасности и их интеграции в системы раннего предупреждения природных пожаров с учетом региональных климатических особенностей Казахстана.

1. ВВЕДЕНИЕ

Казахстан, страна, известная своими обширными и разнообразными лесными ресурсами, в последние годы все чаще сталкивается с проблемой природных пожаров. Прогнозирование природных (лесных и степных) пожаров требует учета множества факторов, среди которых ключевую роль играют погодные условия [1]. В последние десятилетия прогнозные индексы пожарной опасности активно развиваются, особенно благодаря доступности спутниковых и метеорологических данных. Пожароопасные индексы позволяют заблаговременно выявлять периоды повышенного риска

возникновения пожаров и тем самым принимать превентивные меры (введение запретов на огонь, готовность пожарных служб и т.д.) [2, 3]. Существующие мировые системы оценки пожароопасности в США, Австралии, Канаде, России и других странах используют различные индексы, среди которых можно выделить The McArthur Forest Fire Danger Index (FFDI), Fire Weather Index (FWI), индекс Нестерова и другие.

По статье:

Получено: 03.07.2026

Пересмотрено: 06.08.2026

Принято: 11.09.2026

Опубликовано: 30.09.2026

Для цитирования:

Жусупова Г., Чепашев Д.,
Мерекеев Д., Жилкибаева
Э., Аманкешулы Д.,
Оценка пожарной
опасности на территории
Казахстана на основе
индексов FWI и FFDI//
Гидрометеорология и
экология, 123 (3),
2026, 79-96.

Основной задачей индексов пожарной опасности является оценка и информирование о потенциальных рисках и поведении лесных и степных пожаров, что помогает пожарным службам, землевладельцам и общественности принимать обоснованные решения относительно профилактики пожаров, готовности к ним и стратегий реагирования. Система оценки пожароопасности МакАртура созданный в Австралии применяется в различных областях, таких как управление пожарами, где она помогает пожарным службам оценить уровень опасности, прогнозировать поведение огня и правильно распределять ресурсы для тушения. Канадская система позволяет эффективно распределять ресурсы для борьбы с пожарами, выделяя территории с высоким риском возникновения пожаров и прогнозируемым поведением огня [4, 5]. Несмотря на то, что FWI был разработан в Канаде, он применяется по всему миру, поскольку может быть адаптирован к особенностям различных регионов, таких как северные части Соединенных Штатов, некоторые области Юго-Восточной Азии и Европы [6].

В Казахстане ранее были проведены исследования, направленные на математический и статистический анализ архивных данных о пожарах [7, 8], картирование выгоревших территорий [9, 10], а также оценку уровня пожарной опасности на основе различных индексов и климатических параметров [11]. Известно что оценка пожарной опасности в Казахстане официально осуществлялся на основе комплексного показателя пожарной опасности (КПО), рассчитываемого по метеорологическим данным (температура воздуха, точка росы, число дней без осадков), но данная методика не учитывает скорость ветра и многослойную динамику влагосодержания горючих материалов. На данный момент пожарную опасность определяет РГП «Казгидромет» [12] в течение пожароопасного сезона (с момента схода снежного покрова до установления устойчивой дождливой погоды), относя территорию каждой области к одному из пяти классов – от отсутствия до чрезвычайной пожарной опасности. Наряду с этим применяются системы раннего обнаружения уже возникших очагов возгорания – автоматизированные комплексы с ИК/УФ-детекцией пламени, наземное и авиационное патрулирование [13]. Индексы FWI и FFDI, учитывающие ветровой режим и многослойную динамику влагосодержания горючих материалов, могут дополнять действующую систему, повышая точность прогнозирования пожароопасных условий.

Целью данного исследования является прогнозирование пожарной опасности на территории Казахстана на основе применения и сравнительного анализа индексов пожароопасности FWI и FFDI с использованием метеорологических данных и спутниковых наблюдений, а также оценка их эффективности для задач оперативного мониторинга и раннего предупреждения природных пожаров.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

2.1 Территория исследования

Территорией исследования является Республика Казахстан, расположенный в центральной части Евразии и характеризующийся значительным разнообразием природно-климатических условий, что обуславливает высокую пространственную неоднородность пожарной опасности. Площадь страны составляет около 2,7 млн км² и включает степные, лесостепные, полупустынные и пустынные зоны, а также горные системы Тянь-Шань и Алтай. Климат преимущественно резко континентальный, с жарким засушливым летом (до +25...+29 °С летом на юге (с максимумами до +40...+45

°С), низкой относительной влажностью и выраженной межсезонной амплитудой температур.

С 2018 года в Казахстане отмечается значительное увеличение числа и площади пожаров: если в 2018 году было зафиксировано 358 лесных пожаров, то к 2023 году их число выросло более чем вдвое – до 810 случаев [14]. В 2023 году огнём уничтожено свыше 116 тыс. га лесного фонда, а материальный ущерб превысил 160 миллиардов тенге [15]. Также стоит отметить пожар, произошедший в июне 2023 года в Абайской области на территории ГЛПР «Семей орманы», который охватил площадь 63,3 тыс. га, что привело к трагическим последствиям, включая гибель 14 человек и объявление общенационального траура [16]. Общая площадь крупного пожара, начавшегося 6 октября 2024 года в Карагандинской области, составила свыше 35 тыс. га [17]. В 2025 году зарегистрировано 572 лесных пожара на площади 61,8 тыс. га и 44 степных пожара на 77 тыс. га. Несмотря на рост количества возгораний, крупные катастрофические пожары удалось предотвратить [18]. Тем не менее, с учетом влияния климатических изменений и учащения засушливых периодов, риск природных пожаров остается высоким, что требует совершенствования систем спутникового мониторинга и оценки их последствий.

2.2 Климатические данные и термоточки MODIS/VIIRS

Данные GFS. В данном исследовании для расчета индексов пожарной опасности использовались прогнозные данные Глобальной системы прогноза (Global Forecast System, GFS), разработанной Национальным центром по прогнозированию окружающей среды (NCEP, NOAA, США) [19]. Модель GFS представляет собой глобальную численную систему прогнозирования погоды, основанную на решении уравнений динамики атмосферы с учетом процессов радиации, конвекции и турбулентного обмена.

В настоящей работе использовались прогнозы, инициализированные на 06:00 UTC, начиная с шага прогноза f003 и далее с шагом 24 часа (f003, f027, f051 и т.д.), что соответствует суточному временному разрешению. Пространственное разрешение данных составляет 0,25° по широте и долготе. Для расчетов использовались основные метеорологические параметры, влияющие на пожарную опасность: температура воздуха на уровне 2 м, относительная влажность, скорость ветра на уровне 10 м и количество осадков. Данные были получены из открытых архивов NOAA и предварительно приведены к единой проекции и пространственному разрешению.

Данные Кеппена-Гейгера. Для выделения климатических зон на территории Казахстана использовалась карта климатической классификации Кеппена-Гейгера (рис. 1) пространственным разрешением 1 км (0.0083°), охватывающая период 1991...2020 гг. [20].

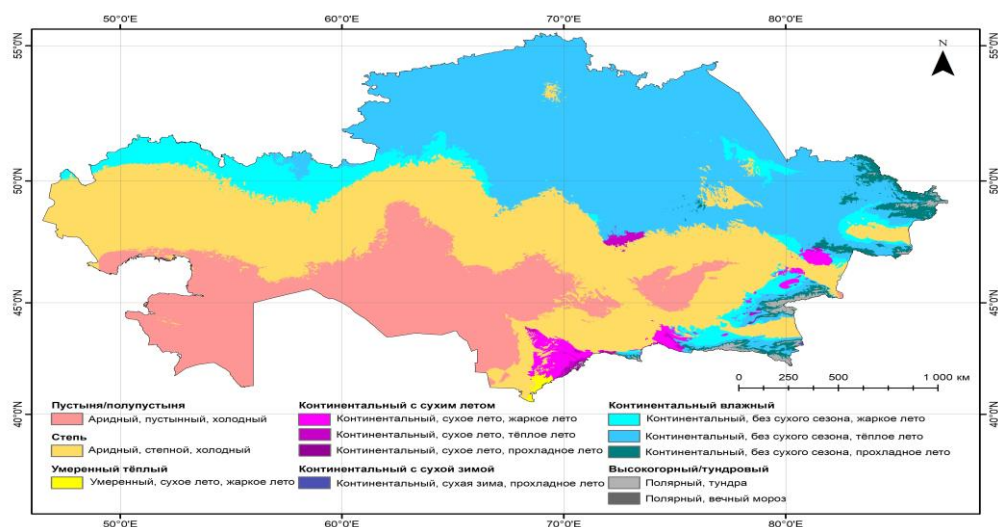


Рисунок 1. Климатические зоны Казахстана по классификации Кеппена-Гейгера.

Растр приводился к пространственной сетке индексов FWI и FFDI методом ближайшего соседа (nearest neighbor), поскольку данные являются категориальными, после чего обрезался по границе территории Казахстана. На исследуемой территории было выявлено 12 климатических классов Коппена-Гейгера, которые для последующего анализа были объединены в 7 климатических зон.

Выделенные климатические зоны Кеппена-Гейгера были использованы в качестве пространственной основы для выявления сходимости и сравнительного анализа индексов пожарной опасности FWI и FFDI в пределах каждой зоны отдельно. Для этого применялись методы: зональная статистика (расчёт среднесуточных значений индексов по пикселям в границах каждой зоны), корреляционный анализ Пирсона (оценка силы линейной связи между индексами) и линейная регрессия методом наименьших квадратов (линия тренда, p-value).

Данные MODIS и VIIRS. В исследовании для валидации результатов индексов применялись термоточки, регистрируемые спутниковыми сенсорами MODIS и VIIRS, являются одним из ключевых источников оперативной информации о природных пожарах на региональном и глобальном уровнях. Алгоритмы обнаружения основаны на анализе яркостной температуры в средне- и дальнем инфракрасных диапазонах, что позволяет выявлять пиксели с аномально высоким тепловым излучением по сравнению с фоновыми значениями. Данные MODIS характеризуются пространственным разрешением порядка 1 км и высокой временной повторяемостью (до 4 наблюдений в сутки), тогда как VIIRS обеспечивает более детализированное наблюдение (до 375 м для активных пожаров), что повышает точность локализации очагов возгорания [21].

Термоточки (рис. 2) были отфильтрованы по слою техногенных территорий, полученному из OSM (OpenStreetMap): в результате фильтрации было удалено 31 точка, попадающая в границы техногенных объектов, и в итоге для дальнейшего анализа осталось 450 термоточек за рассматриваемый период. При этом для повышения достоверности данных отбор термоточек производился по уровню доверия (confidence): для спутниковых данных MODIS использовались точки с классом «high», а для VIIRS – точки со значением confidence более 60%, что обеспечивает более высокую достоверность выявленных термоточек.

FID	Shape	LATITUDE	LONGITUDE	BRIGHTNESS	SCAN	TRACK	ACQ DATE	ACQ TIME	SATELLITE	INSTRUMENT	CONFIDENCE
0	Point	51.44014	72.86828	316.51	1.54	1.22	2025-07-20	0440	Terra	MODIS	63
1	Point	51.43857	72.89797	309.01	4.82	2	2025-07-20	0616	Terra	MODIS	62
2	Point	51.43872	72.90271	308.32	4.82	2	2025-07-20	0616	Terra	MODIS	60
3	Point	50.05833	59.81018	363.84	1.32	1.14	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	100
4	Point	48.23094	57.35816	326.43	1.16	1.07	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	66
5	Point	50.06341	59.8373	329.67	1.33	1.14	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	60
6	Point	51.08444	67.38596	325.93	2.78	1.59	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	66
7	Point	50.32032	53.50716	355.17	1.01	1.01	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	97
8	Point	49.89651	58.82686	334.68	1.22	1.1	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	81
9	Point	50.04864	59.8056	341.73	1.32	1.14	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	88
10	Point	50.06165	59.79271	390.18	1.32	1.14	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	100
11	Point	50.32217	53.49338	347.08	1.01	1.01	2025-07-20	0618	Terra	MODIS	92
12	Point	51.43935	72.8979	367	0.5	0.66	2025-07-20	0633	N21	VIIRS	h
13	Point	47.46288	80.5616	367	0.34	0.56	2025-07-20	0813	N21	VIIRS	h
14	Point	50.32465	53.4807	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
15	Point	50.33279	53.4898	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
16	Point	50.3362	53.48248	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
17	Point	50.33265	53.47017	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
18	Point	50.33961	53.47517	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
19	Point	50.33842	53.47107	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h
20	Point	50.34302	53.46788	367	0.32	0.55	2025-07-20	0816	N21	VIIRS	h

Рисунок 2. Фрагмент атрибутивной таблицы термоточек (MODIS/VIIRS) за период 20...31 июля 2025 года

2.3 Расчет индексов пожароопасности

В работе сравнены два индекса пожарной опасности: Австралийский Индекс опасности лесных пожаров МакАртура (FFDI) и Канадский Индекс пожароопасной погоды (FWI).

В основе системы оценки лесной пожарной опасности в Австралии широко используются Индекс опасности лесных пожаров МакАртура (FFDI) для количественной оценки уровня пожароопасности, которая основывается на погодных условиях и

влажности горючих материалов. Разработанная доктором Ричардом МакАртуром в 1960-х годах [22], система с тех пор претерпела несколько обновлений.

Индекс опасности лесных пожаров (FFDI) ориентирован на оценку пожароопасности в лесных массивах. Этот индекс учитывает погодные условия, а также влажность лесного топлива. Для вычислений учитываются погодные параметры, включая температуру, влажность, скорость ветра и осадки, а также данные о влажности горючего материала. Интерпретация полученных значений следующая:

Значения FFDI ниже 12 указывают на низкий уровень пожароопасности.

Значения в диапазоне от 12 до 25 свидетельствуют о средней пожароопасности.

Значения выше 25 говорят о высокой пожароопасности.

Повышение значений в пределах каждого диапазона означает увеличение риска возникновения пожаров [23].

Вычисление индекса пожарной опасности лесного типа (FFDI) в работе выполнено по формуле (1):

$$FFDI = 2 \exp(-0.45 + 0.987 \ln(DF) + 0.0338T - 0.0345 RH + 0.0234U) \quad (1)$$

где T – температура воздуха в °C, RH – относительная влажность в %, U – скорость ветра в км/ч, DF – «фактор засухи» [24]. Значение DF получен из индекса засухливости Китча-Байрама по операционной аппроксимации D. Griffiths [25] с ограничением в диапазоне 0,1...10.

Канадский Индекс пожароопасной погоды (FWI) является неотъемлемой частью CFFDRS и представляет собой систему, используемую в Канаде для оценки вероятности возникновения и поведения лесных пожаров. Он предоставляет числовое значение, которое отражает относительную вероятность возгорания и возможную интенсивность распространения огня в лесных экосистемах. Система FWI основывается на различных метеорологических данных и влажности горючих материалов, которые вместе определяют уровень пожарной опасности. На основе системы предоставляются различные индексы [26, 27]:

- Точный код влажности топлива (Fine Fuel Moisture Code, FFMC): FFMC представляет собой показатель, отражающий содержание влаги в поверхностных органических материалах, таких как трава, хвоя и мелкие веточки. Он помогает определить легкость воспламенения и горючесть этих материалов.

- Код влажности Даффа (Duff Moisture Code, DMC): DMC измеряет содержание влаги в разложившемся органическом материале под поверхностным слоем. Этот индекс показывает наличие топлива, которое может поддерживать тлеющие пожары.

- Код засухи (Drought Code, DC): DC оценивает уровень влажности в глубоких, плотных слоях органического материала. Он отражает степень засухливости таких материалов и их способность поддерживать интенсивные пожары.

- Индекс начального распространения (Initial Spread Index, ISI): ISI оценивает скорость распространения огня сразу после возгорания, учитывая такие факторы, как скорость ветра и FFMC.

- Индекс накопления (Buildup Index, BUI): BUI представляет собой общий показатель количества топлива, доступного для горения, и учитывает такие индексы, как DMC и DC.

- Индекс пожароопасной погоды (Fire Weather Index, FWI): FWI является комплексным индексом, который объединяет значения FFMC, DMC и DC для предоставления общей оценки уровня пожарной опасности.

- Также имеется Ежедневный показатель интенсивности (Daily Severity Rating, DSR) представляющий собой дополнительный компонент системы FWI, предназначенный для количественной оценки сложности тушения пожаров. Показатель

основан на значениях индекса пожарной опасности FWI, однако более точно отражает предполагаемые усилия, необходимые для локализации и подавления огня.

Значения Канадского индекса пожароопасной погоды вычисляются с использованием сложных математических уравнений, которые основываются на данных о текущих погодных условиях и показателях влажности топлива. Все коэффициенты отображенные в уравнениях являются эмпирическими константами Van Wagner [27].

Точный код влажности топлива был рассчитан на основе следующей формулы (2):

$$FFMC = 59.5(250 - m)/(147.2 + m) \quad (2)$$

Здесь m – эффективное влагосодержание подстилки после учёта осадков и суточного высушивания/увлажнения.

Код влажности Даффа с учётом осадков и суточного высушивания вычислялся по уравнению (3) где задаётся суточный прирост K , а в уравнении (4) вычисляется итоговое значение DMC после дождя:

$$K = 1.894 \cdot (T + 1.1) \cdot (100 - H) \cdot EL_m \cdot 10^{-4}, \quad (3)$$

$$DMC = P_r + K, \quad DMC \geq 0 \quad (4)$$

K – показатель суточного снижения влажности топлива, увеличивающийся с ростом температуры, уменьшающийся при повышении относительной влажности воздуха и масштабируемый сезонным коэффициентом EL_m . P_r – значение после-дождевого увлажнения: при отсутствии осадков оно сохраняется на уровне предыдущего значения, а при наличии осадков снижается в зависимости от их количества, что отражает эффект резкого уменьшения DMC при значительных дождях.

Код засухи определялся по формулам (5, 6), где (5) описывает суточный потенциал испарения V , а (6) – итоговый DC с учётом дождя:

$$V = 0.36(T + 2.8) + FL_m \quad (5)$$

$$DC = D_r + V, \quad DC \geq 0 \quad (6)$$

V – показатель суточного иссушения глубинных горючих материалов (potential ET term), зависящий от температуры и сезонного коэффициента FL_m . D_r – значение после-дождевого состояния DC, определяемое через промежуточные параметры, характеризующие влагозапасы в глубоком слое. При выпадении осадков – показатель DC снижается тем сильнее, чем больше количество осадков.

Индекс начального распространения рассчитывался по формуле (7, 8), связывающей влияние влажности подстилки и скорости ветра:

$$f_F = 91.9 \cdot \exp(-0.1386 \cdot m) \cdot (1 + m^{5.31} / 4.93 \cdot 10^7), \quad (7)$$

$$ISI = 0.208 \cdot \exp(0.05039 \cdot W) \cdot f_F \quad (8)$$

f_F – «топливный» множитель, описывающий, как влажность тонких горючих m подавляет пламя; экспонента по W – «ветровой» множитель, резко увеличивающий скорость распространения при усилении ветра.

Индекс накопления определялся по формуле (9), объединяющей DMC и DC:

$$BUI = \begin{cases} \frac{0.8DC \cdot DMC}{DMC + 0.4DC}, & DMC \leq 0.4DC \\ DMC - \left(1 - 0.8 \frac{DC}{DMC + 0.4DC}\right) (0.92 + (0.0114DMC)^{1.7}), & DMC > 0.4DC \end{cases} \quad (9)$$

Индекс BUI интегрирует характеристики двух классов горючих материалов – средних (DMC) и крупных (DC) фракций. При низких значениях DMC вклад обеих компонент учитывается напрямую, тогда как при высоких значениях вводится корректирующий коэффициент, отражающий нелинейное снижение доступности топлива по мере увеличения его влажности и плотности.

Итоговый индекс пожарной опасности вычислялся по формуле (10) – промежуточная интенсивность В как функция ISI и BUI и нелинейное преобразование В в FWI:

$$FWI = \begin{cases} B, & B \leq 1 \\ \exp(2.72(0.434 \ln B)^{0.647}), & B > 1 \end{cases} \quad (10)$$

Показатель В характеризует промежуточную интенсивность горения и определяется как функция, линейно зависящая от индекса распространения пламени (ISI) и слабо нелинейно – от индекса накопленного запаса горючего (BUI). Вторая часть формулы представляет собой нелинейное преобразование шкалы при высоких значениях В, что обеспечивает более адекватное отображение различий в потенциальной интенсивности пожаров при экстремальных погодных условиях.

Суточный показатель тяжести пожароопасной обстановки вычислялся на основе FWI по формуле (11):

$$DSR = 0.0272FWI^{1.77} \quad (11)$$

Данная формула отражает нелинейную связь между значением FWI и энергетическим потенциалом горения: при росте FWI показатель DSR увеличивается более чем пропорционально, что позволяет использовать его для интегральной оценки суточной пожарной опасности и расчета индекса сезонной тяжести пожаров (Seasonal Severity Rating, SSR).

Значения FWI не имеют размерности, но они экспоненциально связаны с потенциальной скоростью распространения и горения пожара. Интерпретация полученных числовых значений выглядит следующим образом: При значениях 0...5 пожарная опасность оценивается как низкая, 5...10 – умеренная, 10...20 – высокая, 20...30 – очень высокая, а свыше 30 – экстремальная, когда пожары распространяются быстро и трудно поддаются. Однако стоит отметить, что интерпретация этих значений может варьироваться в зависимости от региональных стандартов и специфики местных условий.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе приведены результаты исследования динамики метеорологических параметров за период апрель-сентябрь 2025 года на основе данных GFS и сравнение результатов двух индексов пожарной опасности за период 20...31 июля 2025 года: Австралийский Индекс опасности лесных пожаров МакАртура (FFDI) и Канадский Индекс пожароопасной погоды (FWI).

На рисунке 3 указаны графики максимальных и средних значений температуры воздуха, скорости ветра, осадков и влажности за период апрель-сентябрь 2025 года.

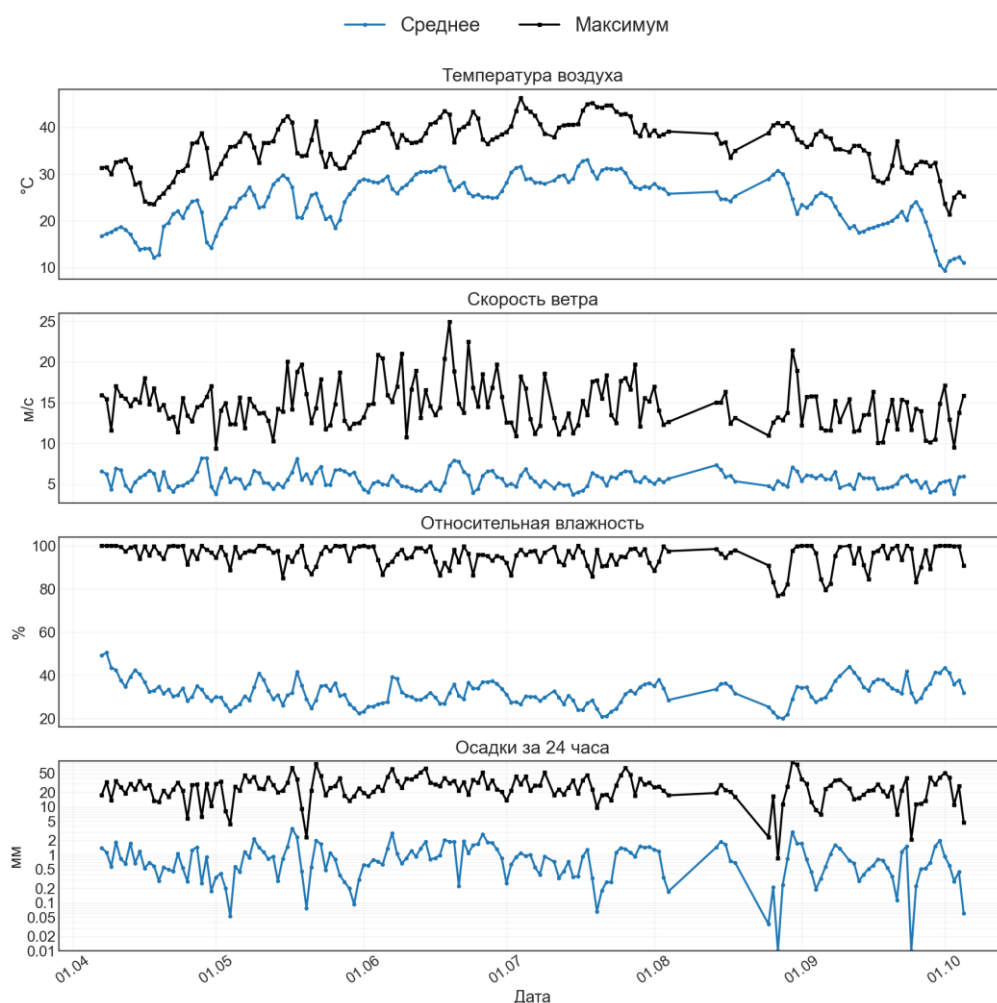


Рисунок 3. Максимальные и средние значения метеорологических данных за период апрель-сентябрь 2025 года

Температура воздуха. Средние месячные значения варьировали от 17,9 °C в апреле до 29,6 °C в июле; среднее за период (по средним значениям месяцев) составило 24,4 °C. Максимальная суточная температура пришлась на июль – 46,2 °C, что подтверждает, что самый жаркий месяц сезона – июль. С августа начинается устойчивое понижение температуры до 20,5 °C в сентябре.

Скорость ветра. Средний фоновый ветер стабилен в узком диапазоне 5,3 (сентябрь) ...5,7 м/с (май), среднее за период составляет 5,5 м/с. Наиболее сильные суточные значения наблюдались в июне (до 24,9 м/с), что указывает на эпизодические дни с усиленным ветром при общем умеренном фоне.

Осадки. Средние месячные значения невелики – 0,7 мм/сутки в сентябре до 1,3 мм/сутки в июне (среднее за период 0,9 мм/сутки), что указывает на преобладание сухой погоды. При этом отмечаются редкие, но интенсивные эпизоды ливней: максимальная суточная сумма за сезон – 85,9 мм в августе (в мае и июле – 77,8 и 65,2 мм соответственно).

Относительная влажность. Средние значения менялись от 28,7 % в июле (наименьшая влажность) до 36...35,16 % в апреле–сентябре, среднее за период – 32,04 %. Максимальные суточные значения достигают 100 % практически каждый месяц, что отражает отдельные влажные/фронтальные дни, но они не меняют общего сухого фона.

Комбинация наивысших температур и минимальной влажности в июле при стабильном умеренном ветре формирует наиболее неблагоприятное «окно» сезона для возникновения и распространения пожаров. Небольшие средние суммы осадков

поддерживают сухость, а редкие сильные ливни (особенно в августе) дают кратковременные «сбросы» сухости без долговременного эффекта.

На рисунке 4 карты с суточным FFDI показывают устойчивый меридиональный контраст: на протяжении рассматриваемого периода максимальные значения индекса (классы 25...40 и 40+) преимущественно формируются в южной, юго-восточной, центральной частях Казахстана и в Мангистауской области в западном регионе. Также, к высокому риску возникновения пожаров подвержена территория близ озера Балхаш, вокруг которого часто наблюдаются высокие показатели индекса FFDI. В северных районах преобладают умеренные и низкие классы (5...12 и 12...25), что согласуется с более прохладными или влажными условиями. К концу рассматриваемого периода умеренные показатели смещаются к центральной и юго-западной части Казахстана.

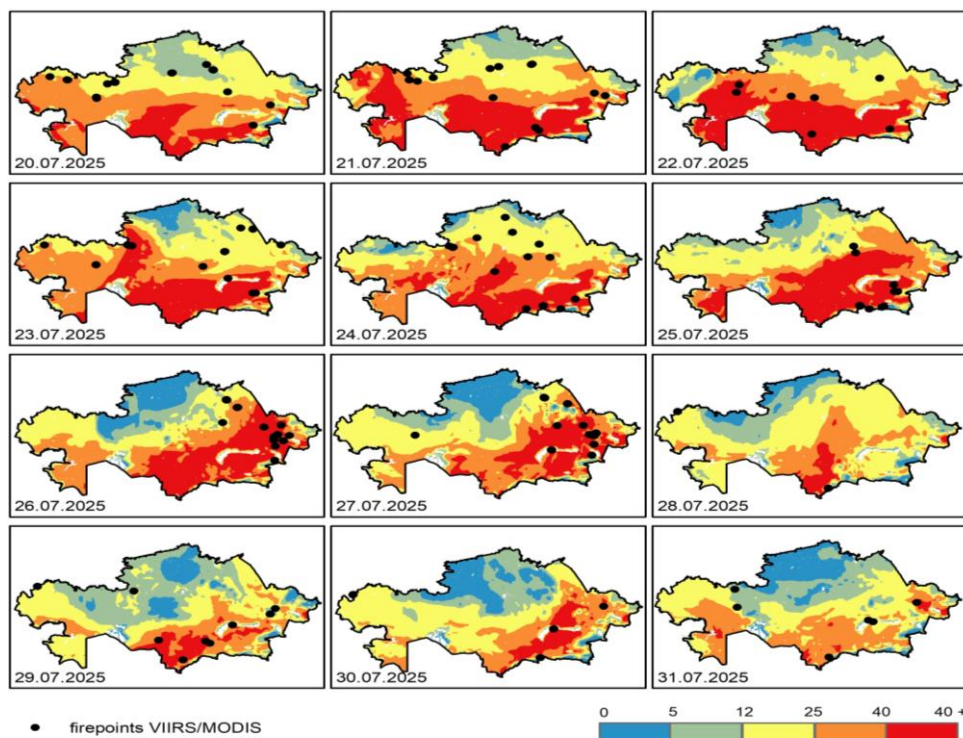


Рисунок 4. Показатели расчета индекса FFDI на территорию Казахстана за 20...31 июля 2025 г.

Линейная диаграмма распределения количества термоточек по категориям FFDI, представленная на рисунке 5, подтверждает пространственную картину пожарной активности. Наблюдается четкая взаимосвязь между числом термоточек и значениями индекса: в категории 0...5 точки отсутствуют, что свидетельствует о малой вероятности фиксации пожаров при низких значениях индекса. В диапазоне 5...12 зарегистрировано 29 точек, что отражает отдельные случаи возгораний при умеренной пожарной опасности. Наибольшая концентрация термоточек наблюдается в интервале 12...25 (136 точек) и особенно в диапазоне 25...40 (166 точек), указывающее на значительную роль этих уровней индекса в формировании пожарных ситуаций.

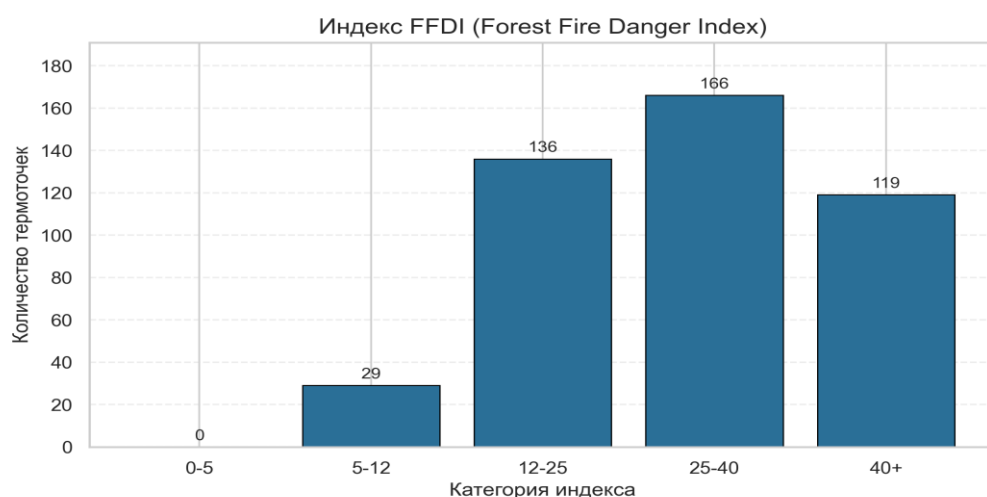


Рисунок 5. Распределение термоточек по категории индекса FFDI на территорию Казахстана за 20...31 июля 2025 г.

На рисунке 6 представлены boxplot-диаграммы распределения основных метеорологических параметров – температуры воздуха, осадков и относительной влажности – по категориям индекса FFDI.

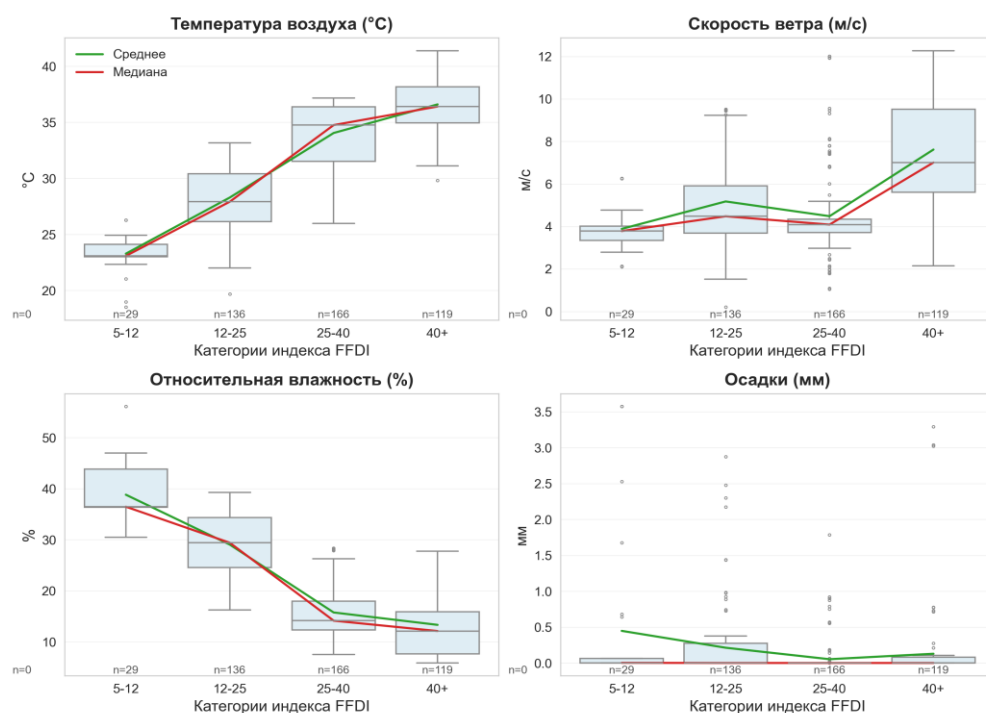


Рисунок 6. Динамика метеорологических параметров по категориям индекса FFDI за 20...31 июля 2025 г.

С увеличением значений индекса FFDI средняя температура воздуха возрастает от 23 до 36 °C (медиана – с 23 до 36 °C), тогда как средняя относительная влажность снижается с 38 до 13 % (медиана – с 36 до 12 %). Количество осадков уменьшается с 0,4 мм в категории 5...12 до 0,1 мм в категории 40+. Эти закономерности подтверждают положительную связь индекса FFDI с температурой воздуха и отрицательную – с относительной влажностью и осадками. Поведение ветра по категориям индекса выражено неоднозначно: при FFDI = 12...25 средняя скорость ветра составляет 5,2 м/с,

при этом в категориях 25...40 равна 4,5 м/с, что не демонстрирует существенных различий. Однако в наивысшей категории 40+ среднее значение достигает 7,6 м/с, что указывает на усиливающее влияние ветра на рост индекса FFDI.

В категории свыше 40 зафиксировано 119 точек, обозначающее экстремальные условия, при которых вероятность возникновения и распространения пожаров становится максимально высокой. Как видно на графике, высокая категория индекса определяется экстремальными значениями метеорологических факторов, включая очень высокие температуры воздуха (выше +30 °C), низкую относительную влажность (менее 28 %), продолжительные безосадочные периоды и сильный ветер (до 12 м/с). Именно сочетание этих условий приводит к формированию максимально высоких значений FFDI, при которых любая термоточка может соответствовать активному очагу возгорания.

На рисунке 7 прослеживается тенденция распространения индекса, что и на картах индекса FFDI: в период 20...31 июля 2025 г. максимальные классы опасности устойчиво формируются на юге и юго-востоке Казахстана (Жамбылская, Туркестанская, Алматинская области, Прибалхашье), тогда как север и северо-запад чаще остаются в пониженных классах. Во времени оба индекса синхронно фиксируют «пик» эпизода когда зоны высоких/очень высоких значений занимают большую часть юга и востока, и именно там концентрируются термоточки VIIRS/MODIS. К концу месяца в обоих метриках заметно снижение опасности и расширение областей со средними и низкими классами.

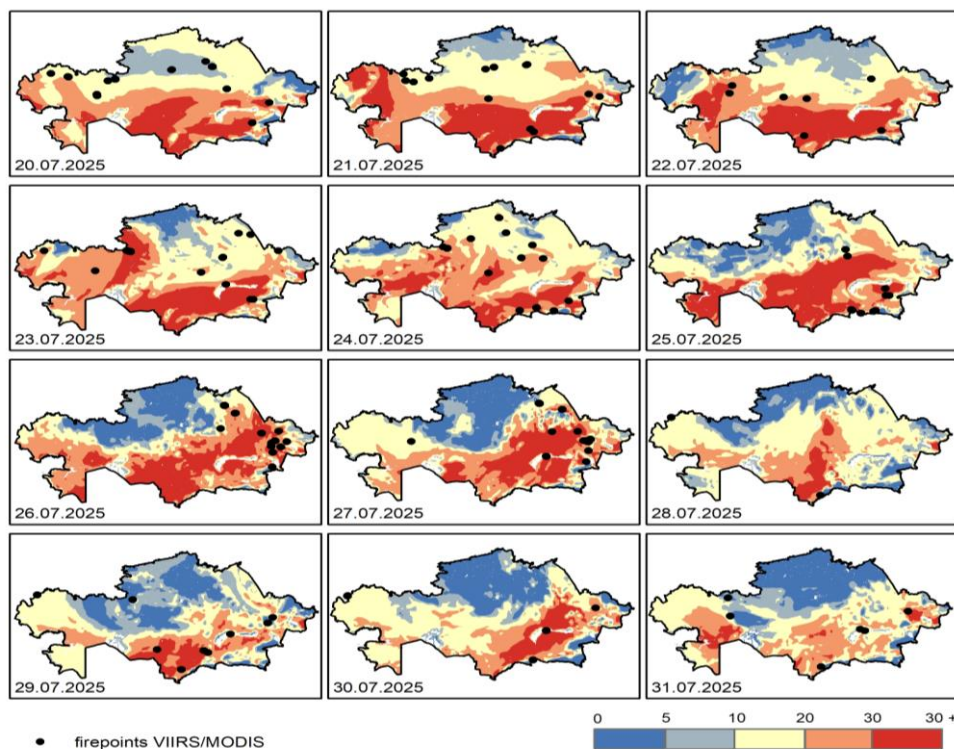


Рисунок 7. Показатели расчета индекса FWI на территорию Казахстана за 20...31 июля 2025 г.

На графике (рис. 8) также как у других индексов пожароопасности прослеживается отчетливая зависимость между количеством зарегистрированных термоточек и значениями индекса пожарной опасности FWI. В категории низких значений (0...5) количество термоточек минимально и составляет 4 случая, что соответствует пониженной пожарной активности. В диапазоне 5...10 зафиксировано 36 точек, что указывает на отдельные эпизоды горения при умеренных условиях пожарной опасности. Наибольшая концентрация термоточек отмечена при значениях FWI 10...20 до 164 точек, а также в диапазоне 20...30 зафиксировано 144 точек. Эти интервалы соответствуют повышенным

и высоким классам пожарной опасности, когда сочетание метеорологических факторов (высокая температура воздуха, низкая влажность, усиленный ветер) создает благоприятные условия для распространения огня. При крайне высоких значениях индекса (свыше 30) также сохраняется значительное количество зарегистрированных термоточек – 102 случая.

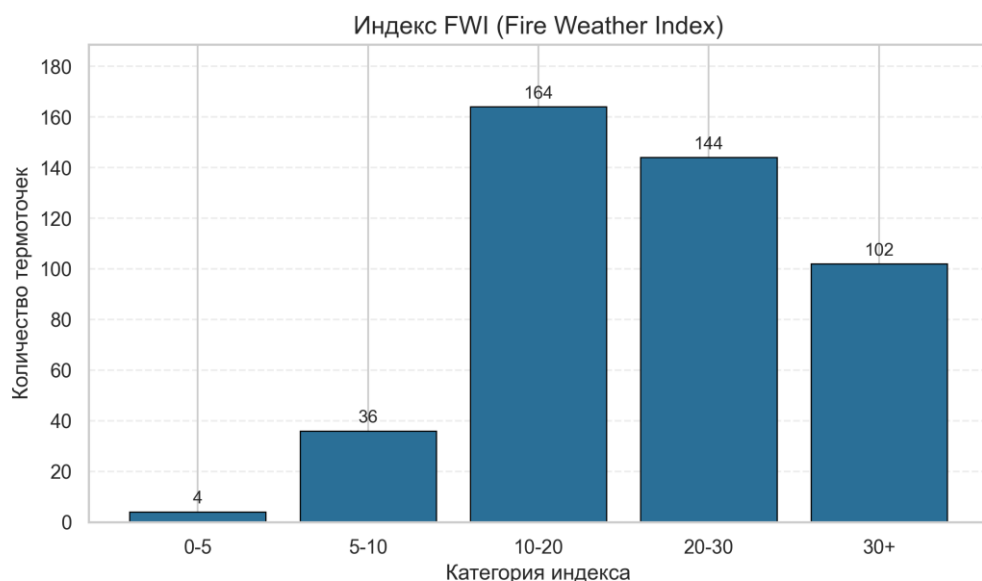


Рисунок 8. Распределение термоточек по категории индекса FWI на территорию Казахстана за 20...31 июля 2025 г.

На рисунке 9 представлены boxplot-диаграммы распределения основных метеорологических параметров – температуры воздуха, осадков, относительной влажности и скорости ветра за 20...31 июля 2025г. – по категориям индекса FWI.

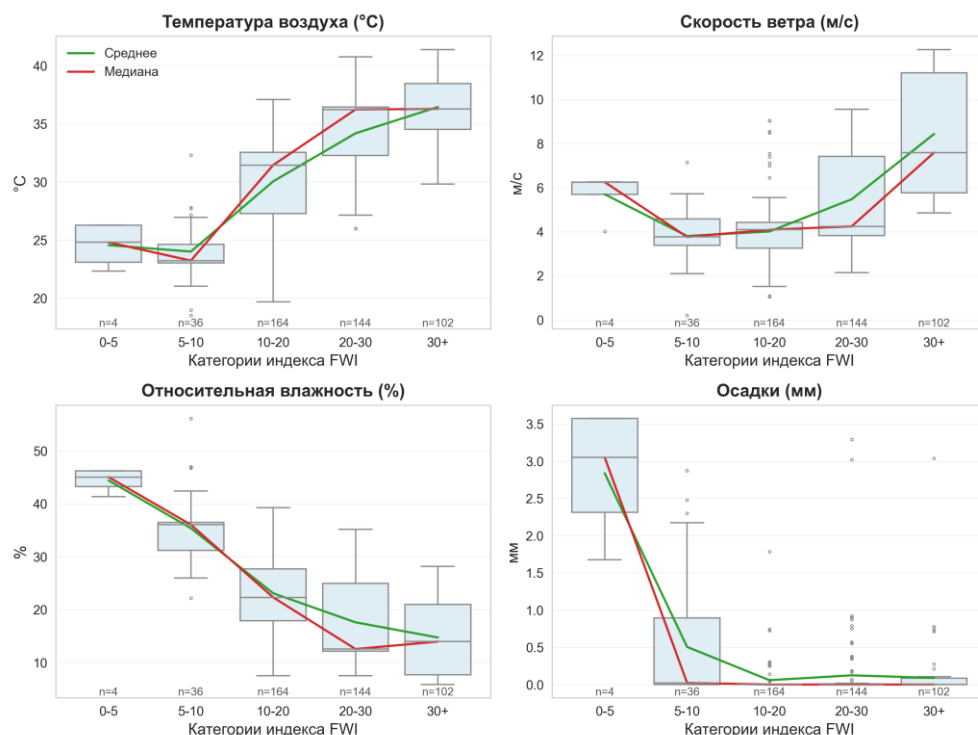


Рисунок 9. Динамика метеорологических параметров в категориях индекса FWI за 20...31 июля 2025 г.

Согласно графику, с увеличением значений индекса FWI наблюдается отчетливая тенденция к росту температуры воздуха: средние значения изменяются от 25 до 36 °C (медиана – от 25 до 36 °C). В то же время относительная влажность демонстрирует выраженное снижение – с 44 % до 15 % (медиана – с 45 % до 14 %), что отражает усиление засушливых условий при повышении уровня пожарной опасности. Количество осадков также сокращается с 2,8 мм в категории 0...5 до 0,08 мм в категории 30+, указывающее на дефицит влаги в атмосфере в периоды повышенного значения индекса. Скорость ветра возрастает до 8,4 м/с в категории 30+, что указывает на его существенное влияние в усилении условий, способствующих повышению значений индекса FWI. В целом выявленные зависимости подтверждают положительную корреляцию FWI с температурой воздуха и скоростью ветра, а также отрицательную – с относительной влажностью и количеством осадков.

Анализ парных корреляций между индексами FWI и FFDI по семи климатическим зонам Кеппена-Гейгера показал устойчивую положительную взаимосвязь во всех зонах (рис. 10). Коэффициенты корреляции Пирсона варьировали от $r = 0,86$ до $r = 0,98$, при этом во всех случаях связь была статистически значимой ($p < 0,001$). Наиболее тесная связь установлена для высокогорной/тундровой зоны (ET/EF, $r = 0,98$) и степной зоны (BSk, $r = 0,97$), наименьшая – для умеренной тёплой зоны (Csa, $r = 0,86$).

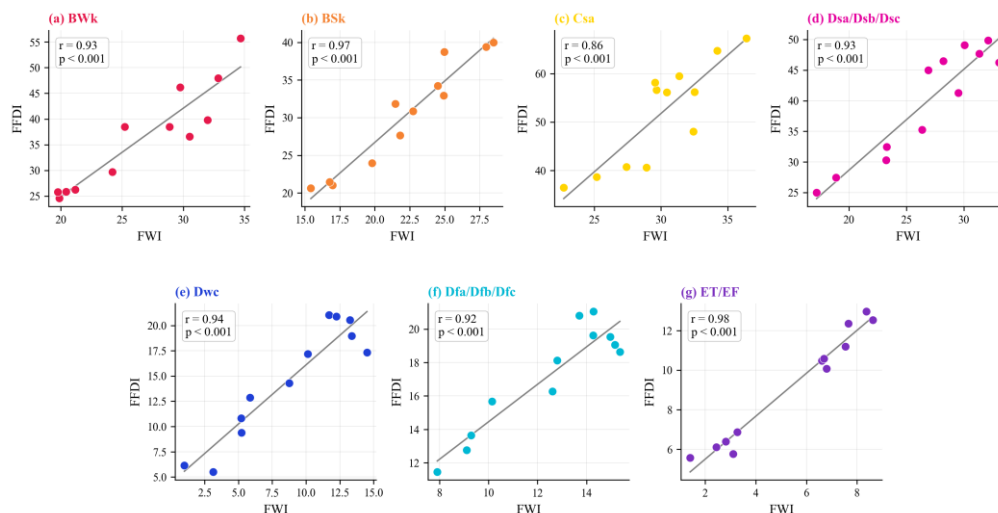


Рисунок 10. Графики рассеяния значений FWI и FFDI (среднесуточные значения по зоне, $n = 12$) для семи климатических зон Кеппена-Гейгера территории Казахстана за период 20...31 июля 2025 г.: (a) пустыня/полупустыня (BWk); (b) степь (BSk); (c) умеренный тёплый (Csa); (d) континентальный с сухим летом (Dsa/Dsb/Dsc); (e) континентальный с сухой зимой (Dwc); (f) континентальный влажный (Dfa/Dfb/Dfc); (g) высокогорный/тундровый (ET/EF). r – коэффициент корреляции Пирсона; p – уровень статистической значимости.

Сравнительный анализ индексов FFDI и FWI показывает их высокую согласованность как в пространственно-временной динамике, так и в зависимости от метеорологических факторов: оба индекса фиксируют пик пожарной опасности в июле при сочетании экстремально высоких температур (до 46 °C), минимальной влажности и дефицита осадков, а также демонстрируют концентрацию высоких классов в южных и юго-восточных регионах Казахстана с одновременным ростом числа термоточек. При этом FFDI в большей степени отражает влияние экстремальных ветровых эпизодов (рост значений в категории 40+ при увеличении скорости ветра), тогда как FWI демонстрирует более выраженную градиентную зависимость от комплексного сочетания температуры,

влажности, осадков и ветра. Распределение термоточек по категориям обоих индексов подтверждает их прогностическую информативность: минимальное количество возгораний соответствует низким классам, а максимальная концентрация – диапазонам повышенной и высокой опасности.

Несмотря на высокую информативность и распространённость рассмотренных индексов, остаются ограничения, связанные с зависимостью от точности метеорологических данных, пространственным разрешением спутниковых наблюдений и отсутствием учёта таких факторов, как рельеф, структура растительности и антропогенная нагрузка, что требует дальнейшего изучения в будущих исследованиях.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании для территории Казахстана были применены индексы пожароопасности, рассчитанные на основе спутниковых и метеорологических данных за период 20...31 июля 2025 года. Рассмотренные в работе индексы – Канадский индекс пожароопасной погоды (FWI) и Австралийский индекс опасности лесных пожаров МакАртура (FFDI) – демонстрируют разнообразие подходов к оценке угрозы пожаров и позволяют всесторонне характеризовать динамику метеорологических и топливных факторов. Согласно прогнозным данным модели Global Forecast System за апрель–сентябрь 2025 года, наиболее пожароопасные условия сформировались в июле за счёт сочетания максимальной среднемесячной температуры воздуха (29,63 °C, пиковые значения до 46,24 °C), минимальной относительной влажности (28,67 %) и устойчивого умеренного ветра (в среднем 5,54 м/с) на фоне низкого количества осадков (в среднем 0,92 мм/сутки).

Установлено, что оба индекса адекватно отражают сезонную динамику метеорологических условий и демонстрируют высокую согласованность с распределением термоточек, фиксируя пик пожарной опасности в июле при сочетании экстремально высоких температур, низкой относительной влажности и дефицита осадков. Так, средние температуры воздуха при FFDI в категориях 25...40 составляли 31...36 °C, а при FWI в диапазоне 20...30 между значениями 32...36 °C; средняя относительная влажность снижалась с 38 % до 13 % для FFDI и с 44 % до 15 % для FWI. Пространственный анализ выявил устойчивую концентрацию высоких и экстремальных классов в южных, юго-восточных и центральных регионах страны, тогда как северные территории преимущественно характеризовались умеренными и низкими уровнями опасности.

Сравнительная оценка показала, что FWI более чувствителен к совокупному влиянию ветра и осадков, тогда как FFDI сильнее реагирует на кратковременные экстремальные ветровые эпизоды. Согласованность индексов подтверждается на уровне климатических зон Кеппена-Гейгера: во всех семи рассмотренных зонах установлена статистически значимая ($p < 0,001$) положительная корреляция между FWI и FFDI ($r = 0,86...0,98$), что свидетельствует об устойчивости их взаимосвязи независимо от типа климата. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования обоих индексов для оперативного мониторинга и прогноза пожарной опасности, а также обосновывают их интеграцию в системы раннего предупреждения природных пожаров с учетом региональных климатических особенностей.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании получены авторами из открытых источников: спутниковые данные MODIS и VIIRS – NASA Fire Information for Resource Management System (FIRMS), метеорологические данные Global Forecast System (GFS) – National Centers for Environmental Information (NCEI), а также данные климатической классификации Кеппена-Гейгера – Köppen-Geiger Climate Classification. Источники данных доступны по следующим ссылкам: NASA FIRMS: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>; Köppen-Geiger: <https://koppen.ethz.ch/>; Global Forecast System (GFS): <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – Г.К.Ж, Д.В.Ч; Методология – Г.К.Ж; Программное обеспечение – Д.Б.М; Валидация – Э.С.Ж, Д.Б.М; Формальный анализ – Э.С.Ж, Д.А; Ресурсы – Д.В.Ч; Подготовка первоначального текста – Г.К.Ж; Редактирование и доработка текста – Г.К.Ж, Д.В.Ч; Визуализация – Д.Б.М; Научное руководство – Д.В.Ч; Администрирование проекта – Д.В.Ч.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP26102069 «Разработка комплексной модели распространения лесных пожаров с использованием данных дистанционного зондирования»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [illegible]

23. Bureau of Meteorology. Fire Danger Rating and the McArthur Forest Fire Danger Index [Электрон. ресурс]. – 2025. – URL: <http://www.bom.gov.au/climate/maps/averages/ffdi/> (дата обращения: 10.04.2025).
24. Noble I.R., Gill A.M., Bary G.A.V. McArthur's fire-danger meters expressed as equations // Australian Journal of Ecology. – 1980. – Т. 5, № 2. – С. 201–203.
25. Griffiths D. Improved formulae for the McArthur Forest Fire Danger Meter. – Meteorological Note 214. – Melbourne: Bureau of Meteorology, 1998. – 11 p.
26. Lawson B.D., Armitage O.B. Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. – Edmonton: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2008. – 87 p. – ISBN 978-1-100-11565-8
27. Van Wagner C.E. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. – Ottawa: Canadian Forestry Service, 1987. – 37 p. – Forestry Technical Report No. 35.

REFERENCES

1. Amakeshuly, D., Baimaganbetov, R. S., Khudaibergenova, B. M., Makishev, Zh. K., & Zakharov, I. A. (2020). Environmental-economic damage from forest fires of the Republic of Kazakhstan. *Theoretical & Applied Science*, vol. 84, no. 4, pp. 15-20. DOI: 10.15863/TAS.2020.04.84.4.
2. He, Y., Zhou, Z., Im, E. S., & Kwon, H. H. (2025). Wildfire risk in a changing climate: Evaluating fire weather indices and their global patterns with CMIP6 multi-model projections. *Weather and Climate Extremes*, vol. 48, Article 100751. DOI: 10.1016/j.wace.2025.100751.
3. Zacharakis, I., & Tsihrintzis, V. A. (2023). Environmental Forest Fire Danger Rating Systems and Indices around the Globe: A Review. *Land*, vol. 12, no. 1. – Article 194. DOI: 10.3390/land12010194.
4. De Jong, M. C., Wooster, M. J., Kitchen, K., Manley, C., Gazzard, R., & McCall, F. F. (2016). Calibration and evaluation of the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System for improved wildland fire danger rating in the United Kingdom. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 16, no. 5, pp. 1217–1237. DOI: 10.5194/nhess-16-1217-2016.
5. Mortelmans, J., Felsberg, A., De Lannoy, G. J. M., Veraverbeke, S., Field, R. D., Andela, N., & Bechtold, M. (2024). Improving the fire weather index system for peatlands using peat-specific hydrological input data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 24, no. 2, pp. 445-464. DOI: 10.5194/nhess-24-445-2024.
6. Bohlmann, S., & Laine, M. (2024). Statistical calibration of probabilistic medium-range Fire Weather Index forecasts in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 24, no. 12, pp. 4225–4235. – DOI: 10.5194/nhess-24-4225-2024.
7. Arkhipov, E. V., & Zalesov, S. V. (2017). Dinamika lesnykh pozharov v Respublike Kazakhstan i ikh ekologicheskie posledstviya [Dynamics of forest fires in the Republic of Kazakhstan and their environmental consequences]. *Agrarnyi vestnik Urala*, no. 4 (158), pp. 10–15. [in Russian].
8. Raimbekov, K., & Kusainov, A. (2018). Analiz pozharov v Respublike Kazakhstan metodami matematicheskoi statistiki [Analysis of fires in the Republic of Kazakhstan using mathematical statistics methods]. *Pozharovzryvbezopasnost*, vol. 27, no. 2–3, pp. 75–81. – DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.75-81. [in Russian].
9. Suresh Babu, K. V., Singh, S., Kabdulova, G., Gulnara, K., & Baktybekov, G. (2024). Geospatial assessment of forest fire impacts utilizing high-resolution KazEOSat-1 satellite data. *Frontiers in Forests and Global Change*, vol. 7, Article 1296100. – DOI: 10.3389/ffgc.2024.1296100.
10. Shogelova, N., & Sartin, S. (2025). Otsenka ushcherba i vosstanovlenie ekosistemy rezervata «Semei-Ormany» posle katastroficheskogo pozhara 2023 goda na osnove distantsionnogo zondirovaniya [Assessment of damage and ecosystem restoration of the «Semei-Ormany» Reserve after the catastrophic 2023 fire based on remote sensing]. *Gidrometeorologiya i ekologiya*, vol. 118, no. 3, pp. 141–151. – DOI: 10.54668/2789-6323-2025-118-3-141-151. [in Russian].
11. Chepashev, D., Nurakynov, S., Sharma, D., Sydyk, N., & Kabdulova, G. (2025). Mapping fire hazard potential in Kazakhstan: a machine learning and remote sensing perspective. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 34, no. 9, Article WF24232. – DOI: 10.1071/WF24232.
12. Kazgidromet. (2026). Prognoz pozharnoi opasnosti [Fire danger forecast] URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/fire> [in Russian].
13. Ortcom.kz. (2026). Ministerstvo ekologii: na usilenie zashchity lesov ot pozharov napravleno 16,9 mlrd tenge [Ministry of Ecology: 16.9 billion tenge allocated to strengthen forest fire protection] URL: <https://ortcom.kz/ru/novosti/1783573997> [in Russian].
14. Byuro natsionalnoi statistiki. (2024). Ekologiya i statistika [Bureau of National Statistics. Ecology and statistics] URL: https://stat.gov.kz/ru/news/ekolog%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A1%D0%A1ya-i-statistika/?sphrase_id=21966 [in Russian].
15. Sputnik Kazakhstan. (2024). Lesnye pozhary v Kazakhstane: lish 2% territorii imeyut sistemy rannego obnaruzheniya [Forest fires in Kazakhstan: only 2% of territories have early detection systems] URL: <https://ru.sputnik.kz/20240514/lesnye-pozhary-v-kazakhstane-lish-2-territoriy-imeyut-sistemy-rannego-obnaruzheniya-44255636.html> [in Russian].
16. Bauyrzhan, M. (2025). Pochemu i kak pogibli 14 chelovek pri tushenii lesnogo pozhara v Abaiskoi oblasti: itogi rassledovaniya [Why and how 14 people died while fighting a forest fire in Abai Region: investigation results]. *Zakon.kz*. URL: <https://www.zakon.kz/stati/6464482-pochemu-i-kak-pogibli-14-chelovek-pri-tushenii-lesnogo-pozhara-v-abayskoy-oblasti-itogi-rassledovaniya.html> [in Russian].
17. Moskovchuk, A. (2024). Krupnyi lesnoi pozhar likvidirovan v Kazakhstane: MChS pokazalo kadry obleta pepelishcha [A major forest fire has been extinguished in Kazakhstan: the Ministry of Emergency Situations showed aerial footage of the burned area] *Zakon.kz*. URL: <https://www.zakon.kz/sobytiia/6451711-krupnyy-lesnoy-pozhar-likvidirovan-v-kazakhstane-mchs-pokazalo-kadry-obleta-pepelishcha.html> [in Russian].
18. Makulbekov, M. (2025). Chislo pozharov v Kazakhstane vozroslo, no krupnykh ne dopushcheno – MChS [The number of fires in Kazakhstan has increased, but no major fires were allowed – Ministry of Emergency Situations]. *Inform.kz*. URL: <https://www.inform.kz/ru/chislo-pozharov-v-kazakhstane-vozroslo-nokrupnykh-nedopusheno-mchs-3a234f> [in Russian].
19. NOAA. (2025). Global Forecast System (GFS). National Centers for Environmental Information. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>
20. Beck, H., McVicar, T., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N. J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., van Dijk, A. I. J. M., & Miralles, D. G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, vol. 10, Article 724. – DOI: 10.1038/s41597-023-02549-6.
21. Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Hall, J. V., Zubkova, M., Humber, M., Huang, H., & Oles, V. (2025). The NASA VIIRS burned area product, global validation, and intercomparison with the NASA MODIS burned area product. *Remote Sensing of Environment*, vol. 331, Article 115006. – DOI: 10.1016/j.rse.2025.115006.

22. McArthur, A. G. (1967). Fire behaviour in eucalypt forests. Canberra: Forestry and Timber Bureau, 36 p.
23. Bureau of Meteorology. (2025). Fire Danger Rating and the McArthur Forest Fire Danger Index. URL: <http://www.bom.gov.au/climate/maps/averages/ffdi/>
24. Noble, I. R., Gill, A. M., & Bary, G. A. V. (1980). McArthur's fire-danger meters expressed as equations. Australian Journal of Ecology, vol. 5, no. 2, pp. 201–203.
25. Griffiths, D. (1998). Improved formulae for the McArthur Forest Fire Danger Meter. Meteorological Note 214. Melbourne: Bureau of Meteorology, 11 p.
26. Lawson, B. D., & Armitage, O. B. (2008). Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. Edmonton: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 87 p. ISBN 978-1-100-11565-8.
27. Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Ottawa: Canadian Forestry Service, 37 p. Forestry Technical Report No. 35.

ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДАҒЫ ӨРТ ҚАУПІН FWI ЖӘНЕ FFDI ИНДЕКСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ БАҒАЛАУ

Гульсезим К. Жусупова^{1,2*}, Даникер В. Чепашев¹, Диас Б. Мерекеев¹, Эльмира С. Жилкибаева³ а.ш.ғ.к.,
Дастан Аманкешулы¹ PhD

¹ «Ионосфера институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан; zhussupova@ionos.kz (Г.К.Ж.), d.chepashev@ionos.kz (Д.В.Ч.), merekeyev.d@ionos.kz (Д.Б.М.), doktor.2020@internet.ru (Д.А.)

² Өл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан; zhussupova_gulsezim3@live.kaznu.kz (Г.К.Ж.)

³ «Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті» КЕАҚ, Алматы қ., Қазақстан; elmira.zhilkibayeva@kaznaru.edu.kz (Э.С.Ж.)

*Автор корреспонденциясы: Гульсезим К. Жусупова, zhussupova@ionos.kz

ТҮЙІН СӨЗДЕР

табиғи өрттер, өрт қаупі
индексі, метеорологиялық
деректер, Қазақстан,
климаттың өзгеруі

Мақала жайында:

Алынды: 03.07.2026

Қайта қаралды: 06.08.2026

Қабылданды: 11.09.2026

Жарияланды: 30.09.2026

АБСТРАКТ

Мақалада 2025 жылдың 20...31 шілде аралығында Қазақстан аумағы бойынша өрт қаупі индекстерін есептеу нәтижелері метеорологиялық деректер мен белсенді өрттерді серіктік бақылау негізінде ұсынылған. Сондай-ақ 2025 жылғы сәуір-қыркүйек аралығындағы кезеңге арналған Global Forecast System моделінің болжамды метеорологиялық деректеріне талдау жасалды; есептеулерде негізгі метеорологиялық параметрлер – ауа температурасы, салыстырмалы ылғалдылық, жел жылдамдығы және жауын-шашын мөлшері ескерілді. Алынған нәтижелерді валидациялау үшін MODIS және VIIRS спутниктік сенсорлары тіркеген термонуңктер деректері пайдаланылды, салыстырмалы талдау кеңінен қолданылатын екі өрт қаупі индекстері – австралиялық Forest Fire Danger Index (FFDI) және канадалық Fire Weather Index (FWI) жүйесі бойынша жүргізілді. Зерттеу нәтижелері өрт қауіптілігінің ең жоғары мәндері шілде айында байқалатынын көрсетті, бұл жоғары температуралардың (31...36 °C дейін), төмен салыстырмалы ылғалдылықтың (13...15 % дейін) және жауын-шашын тапшылығының үйлесуімен түсіндіріледі. Кеңістіктік талдау елдің оңтүстік, оңтүстік-шығыс және орталық аймақтарында өрт қауіптілігінің жоғары екенін анықтады, ал солтүстік аумақтар негізінен төмен және орташа тәуекел деңгейлерімен сипатталады. Индекстерді салыстыру нәтижесінде FWI жүйесі метеорологиялық факторлардың кешенді әсеріне, соның ішінде құрғақ жанғыш материалдың жиналуы мен ұзаққа созылған құрғақшылыққа жоғары сезімталдық танытатыны анықталды, ал FFDI индексі қысқа мерзімді экстремалды ауа райы өзгерістеріне, әсіресе жел жылдамдығына анағұрлым сезімтал. Кеппен-Гейгердің жеті климаттық аймағына жасалған талдау бойынша FWI және FFDI индекстерінің статистикалық маңызды ($p < 0,001$) сәйкестігі ($r = 0,86...0,98$) расталды. Алынған нәтижелер өрт қауіптілігін болжау дәлдігін арттыру үшін осы индекстерді бірлесіп пайдаланудың негізділігін және оларды Қазақстанның өңірлік климаттық ерекшеліктерін ескере отырып табиғи өрттерді ерте ескерту жүйелеріне интеграциялаудың маңыздылығын растайды.

ASSESSMENT OF WILDFIRE DANGER IN KAZAKHSTAN USING THE FWI AND FFDI INDICES

Gulsezim K. Zhussupova^{1,2*}, Daniker V. Chepashev¹, Dias B. Merekeyev¹, Elmira S. Zhilkibayeva³ Cand. Agr. Sci., Dastan Amankeshuly¹ PhD

¹LLP «Ionosphere Institute», Almaty, Kazakhstan; zhussupova@ionos.kz (G.K.Zh.), d.chepashev@ionos.kz (D.V.Ch.), merekeyev.d@ionos.kz (D.B.M.), doktor.2020@internet.ru (D.A.)

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; zhussupova_gulsezim3@live.kaznu.kz (G.K.Zh.)

³The Non-Profit Joint Stock Company «Kazakh National Agrarian Research University», Almaty, Kazakhstan; elmira.zhilkibayeva@kaznaru.edu.kz (E.S.Zh.)

*Corresponding author: Gulsezim K. Zhussupova, zhussupova@ionos.kz

KEY WORDS

wildfires, fire danger index, meteorological data, Kazakhstan, climate change

ABSTRACT

The article presents the results of calculating fire danger indices for the territory of Kazakhstan for the period of July 20...31, 2025, based on meteorological data and satellite observations of active fires. It also presents an analysis of forecast meteorological data from the Global Forecast System model for the period April-September 2025; the calculations took into account key meteorological parameters: air temperature, relative humidity, wind speed, and precipitation amount. Validation of the obtained results was carried out using thermal anomaly (hotspot) data recorded by MODIS and VIIRS satellite sensors. A comparative analysis was conducted for two widely used fire danger indices: the Australian Forest Fire Danger Index (FFDI) and the Canadian Fire Weather Index system (FWI). The results indicate that maximum fire danger levels were observed in July, driven by a combination of high temperatures (up to 30...36 °C), low relative humidity (down to 13...15%), and precipitation deficit. Spatial analysis revealed elevated fire danger in the southern, southeastern, and central regions, whereas northern territories were characterized predominantly by low to moderate risk levels. The comparison of indices showed that the FWI system demonstrates greater sensitivity to the combined effects of meteorological factors, including fuel dryness accumulation and prolonged drought conditions, while the FFDI is more responsive to short-term extreme weather variations, particularly wind speed. Analysis across seven Koppen-Geiger climate zones confirmed a statistically significant ($p < 0.001$) agreement between the FWI and FFDI indices ($r = 0.86...0.98$) regardless of climate type. The results confirm the validity of the combined use of these indices to improve the accuracy of fire danger forecasting and support their integration into early warning systems for wildfires, taking into account regional climatic characteristics of Kazakhstan.

About article:

Received: 03.07.2026

Revised: 06.08.2026

Accepted: 11.09.2026

Published: 30.09.2026

Примечание издателя: заявления, мнения и данные во всех публикациях принадлежат только автору (авторам), а не журналу "Гидрометеорология и экология" и/или редактору (редакторам).