



Научная статья

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ СУММАРНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГРОЗ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ПРИКАСПИЯ, С УЧЕТОМ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Жанар К. Наурызбаева*¹ , Александр В. Холопцев² д.г.н. , Жулдыз Х. Кенжина¹ ,
Нурканат Е. Рахматулла ¹ 

¹ АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru (ЖКН), kenzhina03@mail.ru (ЖХК), nurkanat.rakhmatulla@mail.ru (НЕР)

² Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация; kholoptsev@mail.ru (АВХ)

Автор корреспонденции: Жанар К. Наурызбаева, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Каспийское море,
гроза,
атмосферные осадки,
продолжительность гроз,
математическое
моделирование
межгодовых изменений

АБСТРАКТ

Изучение грозовой активности Северного Каспия как фактора риска для судоходства, нефтегазовой инфраструктуры, электросетей и сельского хозяйства, а также необходимость совершенствования систем мониторинга и прогнозирования в условиях изменяющегося климата важны для региона. В работе проведён анализ многолетних наблюдений грозовой активности на территории Северного Каспия по данным девяти метеостанций Атырауской области за период 1977...2022 гг. Установлено, что грозы проявляют квазипериодическую структуру с циклами продолжительностью 2...4 лет и 7...10 лет. На примере станции Атырау показано, что суммарная продолжительность гроз для отдельных месяцев достигает экстремальных значений до 20...21 ч, что отражает высокую межгодовую изменчивость явления. С помощью методов статистического моделирования временных рядов оценены тенденции изменения суммарной продолжительности гроз и рассчитаны прогностические значения на ближайшие годы. Результаты исследования показывают тенденцию снижения средней повторяемости и продолжительности гроз в последние десятилетия. Полученные выводы имеют практическое значение для повышения надёжности мониторинга и прогноза опасных атмосферных явлений.

По статье:

Получено: 15.09.2025

Пересмотрено: 03.10.2025

Принято: 05.10.2025

Опубликовано: 08.10.2025

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения климатических процессов на территории Западного Казахстана в последние годы значительно возрастает, что связано как с глобальными изменениями климата, так и с социально-экономическими особенностями региона. Особое место занимает Атырауская область, играющая ведущую роль в нефтегазовой отрасли страны и обеспечивающая значительный вклад в экономику Казахстана. Устойчивое развитие региона имеет стратегическое значение не только ввиду концентрации в нем крупнейших запасов нефти и газа, но и вследствие его уникального географического положения, что обуславливает как экономические преимущества, так и серьёзные экологические риски [1].

Большое количество объектов промышленной и энергетической инфраструктуры делает регион особенно уязвимым к опасным метеорологическим явлениям, в частности к грозам, которые являются одной из главных угроз.

Грозовые явления представляют собой сложные атмосферные процессы, характеризующиеся электрическими разрядами в атмосфере (молниями),

Для цитирования:

Наурызбаева Ж., Холопцев В., Кенжина Ж., Рахматулла Н. Моделирование межгодовых изменений суммарной продолжительности гроз северной части прикаспия, с учетом вариаций атмосферных осадков// Гидрометеорология и экология, 119 (4), 2025, 159-176.

сопровождающимися звуковыми явлениями (громом), а также часто ливневыми осадками, шквалистыми ветрами и градом [2]. Причиной возникновения гроз является сильная атмосферная неустойчивость (резкое падение температуры с высотой) и, как следствие, накопление избыточной энергии в кучево-дождевых облаках [3]. Изучение гроз имеет критическое значение, поскольку они способны наносить значительный ущерб инфраструктуре, представлять угрозу безопасности людей и нарушать экономическую деятельность, особенно в регионах с развитой морской и нефтегазовой промышленностью.

Каспийское море, являясь крупнейшим внутренним водоемом планеты, обладает уникальными климатическими характеристиками.

Каспийское море выступает не просто как источник влаги, но и как динамический фактор, который, благодаря своим термическим свойствам, создает необходимые условия для атмосферной неустойчивости и конвекции, способствуя формированию гроз как в теплый, так и в холодный периоды года. Температура воды в море меняется медленнее, чем температура воздуха, что может приводить к значительным температурным градиентам, особенно при вторжении холодных воздушных масс. Эти градиенты усиливают термическую конвекцию, делая Каспийское море уникальным "генератором" гроз в условиях континентального климата.

Грозовые явления связаны со штормами на море и представляют угрозу для судоходства. Интенсивные атмосферные осадки в сочетании с сильными ветрами, вызывающими штормовые нагоны, могут приводить к подтоплению его берегов. Скорость ветра на Каспии достигает в порывах 35...40 м/с. При грозах возможно выпадение града, способного уничтожить посевы.

В условиях континентального климата Прикаспийского региона, несмотря на наличие моря как источника влаги, существует повышенная вероятность возникновения так называемых «сухих гроз». Эти грозы характеризуются наличием молний, но либо полным отсутствием осадков, достигающих поверхности земли, либо их незначительным количеством, которое испаряется до достижения почвы. Это явление особенно опасно, поскольку молнии могут инициировать степные пожары в регионе.

Удары молнии в суда могут приводить к повреждениям навигационного и электронного оборудования, такого как магнитные приборы и компасы, вызывать сильные радиопомехи, затрудняющие связь и радиопеленгование, а в некоторых случаях – к ранениям или даже гибели членов экипажа.

Как правило, очень часто грозы сопровождаются сильным шквалистым ветром, ливневыми осадками и градом. Оперативное определение ее местоположения, интенсивности, направления и скорости перемещения имеет большое практическое значение для многих отраслей хозяйственной деятельности человека [4]. Грозы способны вызывать значительные разрушения наземной инфраструктуры и электросетей, повреждения линий электропередач, систем связи, зданий, что приводит к пожарам, сбоям в электроснабжении. Кроме того, неравномерное распределение осадков и риски засух в регионе повышают риски для сельского хозяйства.

Существующие научные работы по Каспийскому морю в значительной степени сосредоточены на изучении его ветрового режима, штормовых нагонов и волн.

Например, в исследованиях Павловой, Архипкина и Сурковой [5] проведен анализ штормовых нагонов и ветровых волн в Каспийском море за период с 1979 по 2020 год. В работе отмечается отсутствие значимых трендов в общей штормовой активности, но прогнозируется статистически значимое увеличение повторяемости штормовых волн в XXI веке.

Представлены также исследования, посвященные влиянию меридиональных атмосферных процессов на формирование конвективной облачности. Так, В.П. Горбатенко показал, что в Западной Сибири и Казахстане грозы преимущественно фронтального происхождения и связаны с циклонами различного генезиса, их развитие определяется крупномасштабной циркуляцией [6].

Эту идею развивают С.И. Пряхина и А.А. Котова [7], которые на основе современных наблюдений подтвердили доминирование фронтальных гроз в северных районах Западной Сибири. Они выявили при этом рост внутримассовых гроз к югу под влиянием прогрева поверхности и орографической неоднородности.

Расширяя региональную перспективу, иранские исследователи внесли значимый вклад в изучение климатических рисков в районе Каспия и сопредельных территорий.

М. Солтани, С. Бабаголзаде и А. Лахиджани [8] проанализировали циклоны южного побережья Каспия, выявив их сезонные закономерности и основные источники влаги.

Интерес представляют работы, посвященные изучению гроз в Восточной Азии. Так Дин Цзясинь, Чжэн Донг и другие продемонстрировали контраст в структуре гроз и молниевой активности между сушей и морем в Южном Китае, акцентируя определяющую роль термодинамической неустойчивости [9].

Сопоставление региональных результатов позволяет глубже осмыслить механизмы атмосферной циркуляции и факторы, формирующие экстремальные погодные явления в различных климатических зонах.

Е. Воскресенская и коллеги, на основе моделирования СМIP6 показали, что в бассейне Средиземного и Чёрного морей, при общем снижении числа зимних циклонов, усиливаются отдельные экстремальные случаи, сопровождающиеся ростом конвективной активности [10].

Согласно исследованиям И.В. Пашенко, акватория Каспийского моря выступает зоной пересечения устойчивых траекторий атмосферных возмущений, таких как Чёрное море – Каспийское море, то есть с запада на восток и Ближний Восток – Северный Каспий, то есть, с юго-запада на северо-восток [11]. В связи с этим формируется трансрегиональный характер циркуляционных процессов, что может быть одной из причин возникновения конвективной облачности, штормов над акваторией.

Ввиду вышесказанного, целью данного исследования выступает обзор динамики изменения грозовых явлений в северной части Прикаспия и моделирование межгодовых изменений суммарной продолжительности гроз (далее СПГ) для месяцев с мая по июль, с учетом вариаций месячных сумм атмосферных осадков.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Грозовая активность характеризуется высокой вариабельностью как во временном, так и в пространственном масштабе. Во временном отношении она изменяется от десятилетних колебаний до продолжительности отдельных грозовых ячеек, существование которых нередко ограничивается одним часом и менее. Пространственная изменчивость охватывает диапазон от континентального и океанического уровня до локальных масштабов, измеряемых несколькими километрами. Для количественной оценки грозовой активности обычно используются такие показатели, как годовое число грозовых дней и годовое число грозовых часов [12].

В исследовании рассмотрены пространственно-временные характеристики грозовой активности, включая среднее и максимальное число дней с грозой, а также их продолжительность, как основных количественных показателей. Был проведён статистический анализ, позволивший оценить суммарное количество гроз, в годовом и месячном разрезе, на основе чего выявлены многолетние тенденции их повторяемости и показатели продолжительности явления.

Использовались данные многолетних наблюдений грозовой активности, полученные в рамках гидрометеорологического мониторинга, проводимого РГП «Казгидромет». Рассмотренный период охватывает 1977...2022 гг. и включает материалы девяти метеостанций региона: Атырау, Ганюшкино, Индерборский, Кульсары, Карабау, Махамбет, Новый Уштаган, Пешной и Сагиз, расположения которых показано на рисунке 1.



Рисунок 1. Расположение метеорологических станций северного Прикаспия

В ходе обработки метеорологических данных нередко выявляются систематические расхождения между фактическими наблюдениями и математическим модельным расчетом. При моделировании межгодовых изменений СПГ использована математическая модель процесса, для этих целей использовано уравнение линейной множественной регрессии:

$$Y_k = C_0 + C_1 P_1(k) + C_n P_n(k), \quad (1)$$

где Y_k – прогнозируемое значение рассматриваемого показателя (k-год, изменяющийся в пределах от 1979 + Δ до 2008 + Δ); Δ – целое число изменяющееся в пределах от 0 до 12; C_0 – свободный член (действительная константа); $C_1 \dots C_n$ – действительные константы, определяемые с использованием программы множественной регрессии; $P_n(k)$ – один из предикторов модели (отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом).

Рассматривались две модели, для которых n (количество случаев с грозами) изменяются в пределах от 1 до 6 и от 1 до 10.

Как предикторы, рассматривались временные ряды месячных сумм атмосферных осадков, выпадающих в том же месяце на тех участках территории изучаемого региона Казахстана, где их корреляция с моделируемым процессом с достоверностью не менее 0.99 в современном климатическом периоде (1991...2020 гг.) признавалась значимой.

Как показатели качества моделирования оценивались его относительные погрешности (%), а также значения коэффициента корреляции его результатов с фактическими изменениями СПГ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе анализа собранные данные о повторяемости и продолжительности грозовых явлений над исследуемым регионом сформированы в единую базу. В связи с разнообразием орографических условий станции объединены в микрорайоны со

схожими физико-географическими характеристиками, что позволило более наглядно отразить особенности динамики процессов.

К первому микрорайону отнесены станции Ганюшкино и Новый Уштаган, граничащему с территорией России, занимаемые северо-западной части Атырауской области, где в равнинной территории прикаспийской зоны частота гроз определяется в большей степени влиянием западных, северных и северо-западных воздушных масс [13].

Ко второму микрорайону, территориально охватывающему северо-восточную часть Атырауской области, отнесены станции Индерборский, Карабау и Сагиз, для которых характерны более континентальные условия и удалённость от акватории Каспийского моря.

Третий микрорайон охватывает южную часть Атырауской области – Махамбет, Атырау, Пешной и Кульсары, расположенные ближе к прибрежным районам Каспийского моря, что формирует благоприятные условия для конвективной деятельности.

На рисунке 2 представлено суммарное количество гроз на станциях по микрорайонам за исследуемый период.

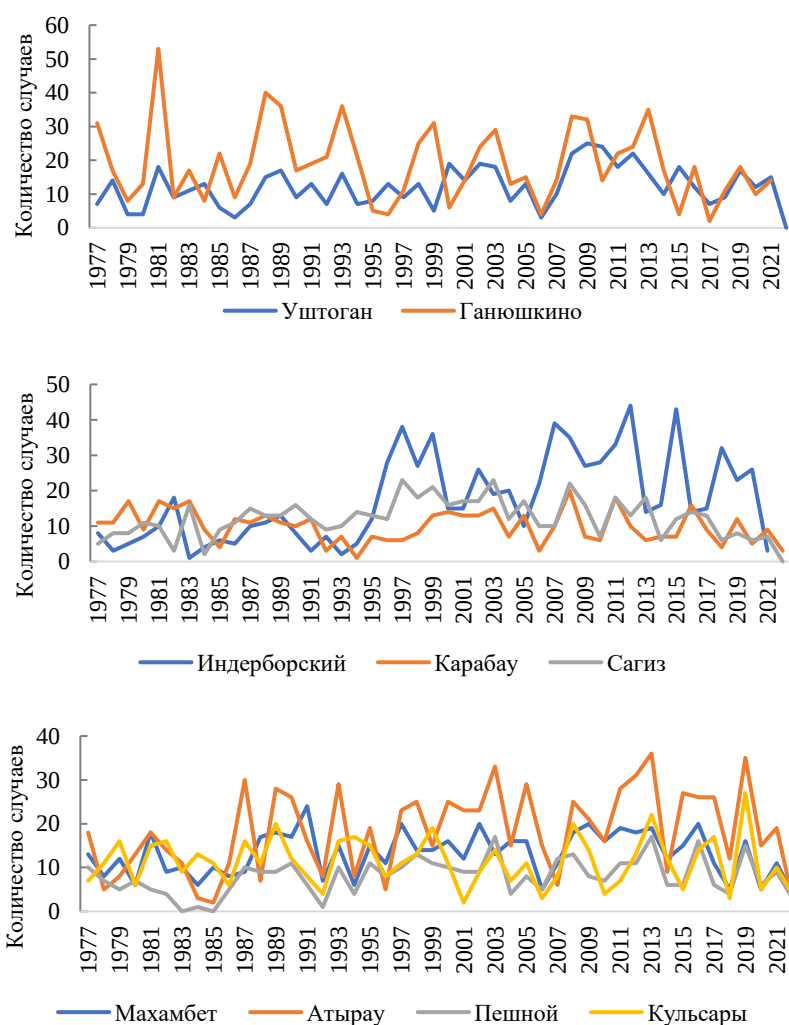


Рисунок 2. Количество грозовых явлений на исследуемых станциях с 1977 по 2022

22.

Из рисунка 2 видно, что в последние десятилетия на большинстве станций региона наблюдается тенденция к увеличению количества повторяемости грозовых

явлений, особенно в начале XXI века. Так, если в 1980-е гг. количество случаев составляло в среднем 10...15 в год, то в 21 веке их число достигало 20...30. Особо можно отметить станцию Ганюшкино, где в отдельные годы конца XX века, количество гроз превышало 50 случаев. В XXI в. здесь лишь трижды за год было зафиксировано более 30 гроз – в 2008, 2009 и 2013 гг.

Во втором микрорайоне, на станции Индерборский также наблюдается существенный рост повторяемости гроз. Если в 1977...1995 гг. здесь количество гроз не превышало 10 случаев за год, то в последующий период гроз стало существенно больше – в среднем 23...25 случаев в год. Ежегодно происходило не менее 10 гроз. На станциях Сагиз и Карабау, по сравнению с концом XX века, выявлено увеличение числа грозовых явлений на 5...6 случаев в год.

Аналогичная тенденция характерна и для станций Махамбет, Атырау, Пешной и Кульсары (3-й микрорайон). Здесь повторяемость грозовых явлений в современном периоде была стабильно выше, чем в предыдущие десятилетия. Наибольшая активность характерна для станции Атырау, где годы, в которые отмечалось более 30 гроз, были зафиксированы 5 раз. На станции Махамбет наблюдались более умеренные значения повторяемости гроз. Количество гроз за год здесь не превышает 25, тогда как на станции Пешной оно не превышало 12...15 случаев.

Различия в динамике грозовой активности между станциями можно объяснить физико-географическими особенностями их расположения.

Станция Индерборский находится в зоне прохождения атмосферных фронтов и адвекции влаги с прикаспийской акватории, что создаёт благоприятные условия для формирования конвективной облачности.

Станции Сагиз и Карабау расположены восточнее, в более континентальной и засушливой части региона, где выраженный дефицит влаги существенно ограничивает развитие конвективных процессов, вследствие этого количество грозовых явлений здесь значительно ниже, чем в северо-западных районах области.

Что касается прикаспийских станций (Махамбет, Атырау, Пешной и Кульсары) (рисунок 3), они характеризуются более выраженной межгодовой изменчивостью. Для Махамбета выделяется выраженный пик в 1991 году, тогда как остальные станции (Кульсары, Атырау, Пешной) демонстрируют схожую динамику: рост показателей до начала 2000-х годов с последующей стабилизацией.

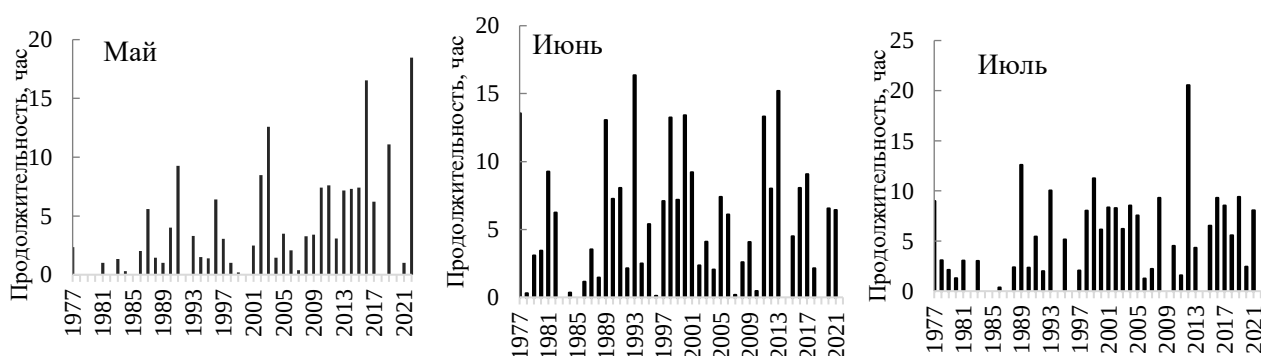


Рисунок 3. Изменения СПГ (час.) для некоторых летних месяцев на станции Атырау

В последние годы внимание исследователей всё чаще обращены к изучению колебательных процессов в атмосфере, отражающих как локальные, так и глобальные закономерности климатической системы. В этом контексте особый интерес представляет анализ квазипериодических структур грозовой активности.

Международные исследования Zhang, Fang и Yu [14] подтверждают наличие подобных структур в конвективных процессах. Эти процессы обусловлены неравномерным накоплением влаги, радиационными эффектами и обратными связями «конвекция–циркуляция», что приводит к закономерному чередованию фаз усиления и ослабления конвективной облачности.

Учитывая данные выводы, в настоящем исследовании так же проанализирована динамика грозовой активности и выделены признаки квазипериодической структуры.

Наиболее отчётливо прослеживаются два цикла колебаний гроз. Краткосрочные циклы с длительностью в 2...4 года (1983...1984 гг., 1991...1993 гг., 2004...2006 гг. и 2011...2013 гг.); и долгосрочные циклы порядка 7...10 лет, которые характеризуются фазами общего увеличения числа гроз и последующего его спада (максимумы в конце 1980-х, середине 1990-х и в 2005...2012 гг.).

Известно, что около 68 % гроз формируются в областях пониженного давления, 30 % в условиях малоградиентного поля давления и лишь 2 % в антициклоне. Данное явление объясняется тем, что в циклонах и ложбинах формируются крупномасштабные восходящие вертикальные потоки, интенсивность которых возрастает с высотой в нижней тропосфере и эти потоки способствуют накоплению термической неустойчивости в течение времени, что, в свою очередь, ведёт к развитию конвективных гроз [15], таким образом можно сказать, что общая атмосферная циркуляция играет ключевую роль в формировании пространственно-временной структуры грозовой активности. В регионах, где влияние Каспия сочетается с динамикой крупных воздушных масс, инициируются процессы циклоногенеза.

До 90 % всех гроз в изучаемом регионе приходится на тёплое полугодие (апрель–сентябрь). В качестве примера рассмотрим станцию Атырау, где детально проанализированы изменения показателя суммарной продолжительности гроз (далее СПГ) для месяцев май–июль, показанные на рис. 3.

Из рисунка 3 видно, что в мае в Атырау прослеживается тенденция к увеличению продолжительности гроз, что связано с повышенной атмосферной неустойчивостью и достаточным влагосодержанием. Последнее обеспечивается как за счёт прикаспийской акватории, так и за счёт прохождения фронтальных систем. В этом месяце проявлялись наиболее устойчивые и продолжительные грозовые процессы: в начале 1990-х и 2000-х годов их СПГ достигала 9...13 часов (1991, 2003...2004 гг.). В последующие десятилетия интенсивность усилилась: фиксировались экстремальные значения СПГ, достигающей 16...19 часов (2016, 2022 гг.).

Месяц июнь, напротив, демонстрирует более локализованные, но порой весьма значительные пики. Наиболее показательным является 1994 год, когда СПГ гроз достигала 16...17 часов.

Подобные случаи указывают на усиление контрастов в сезонной циркуляции и рост потенциала конвективных процессов в регионе.

Месяц июль обычно отличается меньшей СПГ, однако в рассматриваемый период встречаются экстремальные значения, которые не свойственны для него. В отдельные годы (1989, 2000, 2009 гг.) СПГ почти достигала суточных значений. Абсолютный максимум СПГ был зафиксирован в 2012 г., в котором значение этого показателя составило 20 часов 55 минут.

Результаты анализа климатических данных свидетельствует о выраженной межгодовой и междекадной вариабельности грозовой активности. Наибольшая интенсивность и повторяемость грозовых явлений характерны для 1980...1990-х гг., тогда как в последние десятилетия прослеживается тенденция к снижению как их частоты, так и СПГ. Конечно, отмечаются отдельные годы с большим количеством гроз, такие как 10-е годы 21 века, но на начало 20-х годов отмечается некоторое его снижение.

В таблицах 1-2 представлены значения коэффициентов и характеристик предикторов математической модели (1-2) учитывающей 6 и 10 предикторов, которая описывает межгодовые изменения СПГ для мая в Атырау.

Таблица 1

Значения коэффициентов и характеристики предикторов математической модели (1), учитывающей 6 предикторов, которая описывает межгодовые изменения СПГ для мая в Атырау

1981...2010 гг.							
п	широта	долгота	C _п	п	широта	долгота	C _п
0			2.20227	4	47° с.ш.	49.25° в.д.	0.92757
1	47° с.ш.	48.5° в.д.	0.32949	5	47° с.ш.	49.5° в.д.	-0.76620
2	47° с.ш.	48.75° в.д.	-1.16154	6	47° с.ш.	49.75° в.д.	0.04814
3	47° с.ш.	49° в.д.	0.62813	-	-	-	-
1991...2020 гг.							
п	широта	долгота	C _п	п	широта	долгота	C _п
0			2.09388	4	47° с.ш.	49.25° в.д.	0.77836
1	47° с.ш.	48.5° в.д.	0.28230	5	47° с.ш.	49.5° в.д.	-0.71191
2	47° с.ш.	48.75° в.д.	-1.01991	6	47° с.ш.	49.75° в.д.	0.02449
3	47° с.ш.	49° в.д.	0.72422	-	-	-	-

Примечание: п – временной отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом, C_п - регрессионный коэффициент

Таблица 2

Значения коэффициентов и характеристики предикторов математической модели (1), учитывающей 10 предикторов, которая описывает межгодовые изменения СПГ для мая в Атырау

1981...2010 гг.							
п	широта	долгота	C _п	п	широта	долгота	C _п
0			1.719227	6	47° с.ш.	49.75° в.д.	0.095625
1	47° с.ш.	48.5° в.д.	-0.913302	7	46.75° с.ш.	48.25° в.д.	0.159991
2	47° с.ш.	48.75° в.д.	0.681321	8	46.75° с.ш.	48.5° в.д.	0.290071
3	47° с.ш.	49° в.д.	-0.316047	9	46.75° с.ш.	49.5° в.д.	0.176207
4	47° с.ш.	49.25° в.д.	-0.049700	10	46.75° с.ш.	49.75° в.д.	-0.626935
5	47° с.ш.	49.5° в.д.	0.507500	-	-	-	-
1991...2020 гг.							
п	широта	долгота	C _п	п	широта	долгота	C _п
0			2.02933	6	47° с.ш.	49.75° в.д.	0.04814
1	47° с.ш.	48.5° в.д.	1.40192	7	46.75° с.ш.	48.25° в.д.	-0.02770
2	47° с.ш.	48.75° в.д.	-2.35470	8	46.75° с.ш.	48.5° в.д.	-0.33252
3	47° с.ш.	49° в.д.	0.96871	9	46.75° с.ш.	49.5° в.д.	0.42512
4	47° с.ш.	49.25° в.д.	0.77836	10	46.75° с.ш.	49.75° в.д.	0.14685
5	47° с.ш.	49.5° в.д.	-0.71191	-	-	-	-

Примечание: п – временной отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом, C_п - регрессионный коэффициент

Так, фактические изменения СПГ для мая в Атырау, которые происходили в периоды 1981...2010 гг. и 1991...2020 гг., а также результаты их моделирования с

применением обеих моделей, представлены на рисунке 4. Значения коэффициентов и характеристики предикторов этих моделей приведены в таблицах 1...2.

Далее на рисунке 4 представлены фактические изменения СПГ для мая у города Атырау в периоды 1981...2010 гг. и 1991...2020 гг. и результаты их моделирования для случаев учитывающей 6 и 10 предикторов. Согласно которым модельные значения хорошо совпадают с фактическими данными за все рассмотренные промежутки времени, но лучшее совпадение по 10 предикторам. Это говорит о том, что чем больше временных отрезков заложено в модель, тем лучше модель сопоставима с фактическими данными наблюдениями.

Из рисунка 4 видно, что зависимость от времени результатов моделирования межгодовых изменений СПГ для мая в Атырау, которые получены с применением обеих моделей, для рассматриваемых периодов времени качественно соответствует изучаемому процессу. Усложнение модели к существенному повышению точности моделирования не приводит, так как значения коэффициента корреляции выбранных предикторов превышают 0.9, а в некоторых случаях 0.95.

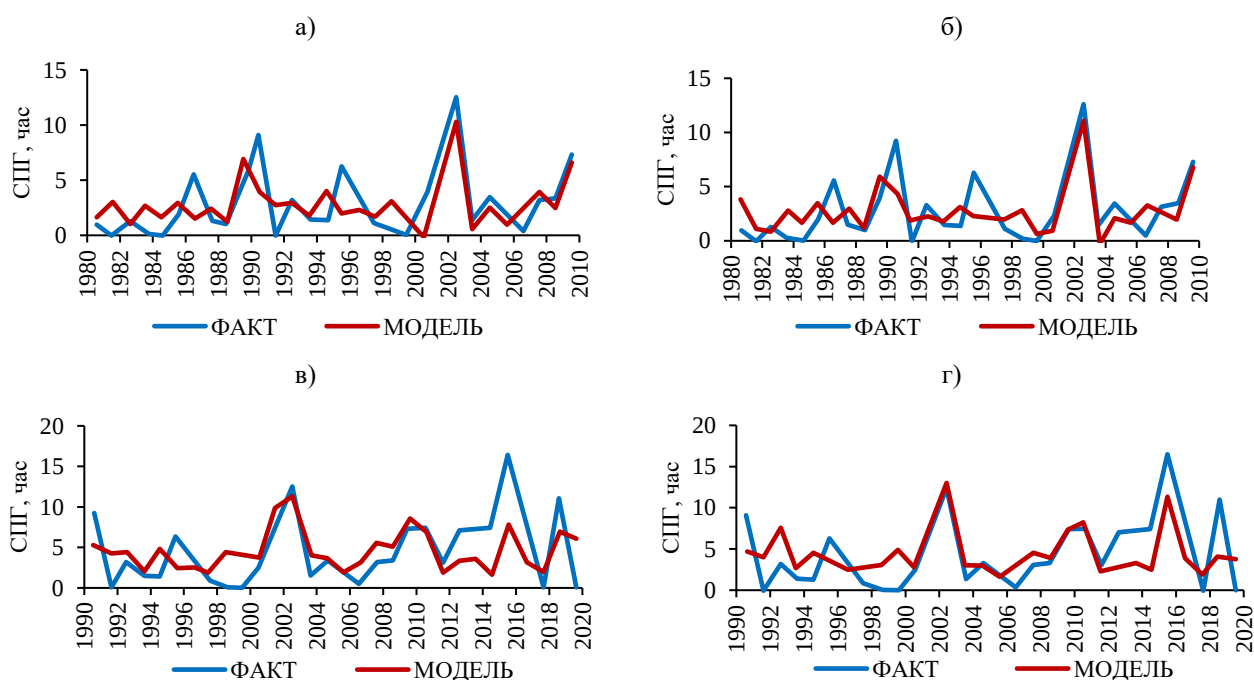


Рисунок 4. Фактические изменения СПГ для мая у города Атырау в периоды 1981...2010 гг. и 1991...2020 гг. и результаты их моделирования для случаев а) $n=6$, 1981...2010 гг.; б) $n=10$, 1981...2010 гг.; в) $n=6$, 1991...2020 гг.; г) $n=10$, 1991...2020 гг.

Далее на рисунке 5 отображены зависимости от года начала скользящего окна длиной 30 лет характеристик качества моделирования и изменчивости СПГ для мая в Атырау.

Из рисунка 5 следует, что амплитуда изменчивости СПГ для города Атырау, соответствующая маю, возрастает. В результате этого относительная погрешность моделирования изучаемого процесса повышается, а коэффициент его корреляции с результатами моделирования несколько снижается. Вместе с тем достоверность вывода об адекватности разработанной модели, содержащей 6 предикторов превышает 0.95. Для модели, содержащей 10 предикторов, он превышает 0.99 (поскольку количество степеней свободы изучаемого процесса равно 30).

Полученные результаты позволяют обе модели, верифицированные для скользящего окна 1992...2021 гг., применить для оценки значений СПГ,

соответствующих 2022, 2023 и 2024 гг. Предикторы упомянутых моделей не изменились, а вычисленные значения их коэффициентов приведены в таблице 3.

Полученные с применением обеих моделей оценки СПГ для мая в Атырау, за период 2022...2024 гг. приведены в таблице 4.

Учитывая, что значения среднеквадратического отклонения результатов моделирования для интервала 1992...2021 гг. равны 3 час. (для модели с 10 предикторами) и 3.4 час. (для модели с 6 предикторами).

Очевидно, что отклонения фактических значений СПГ для указанных лет в таблице 4, с вероятностью менее 0.01, соответственно на величину 9 и 10.2 часа.

Далее на рисунке 6 представлены временные ряды фактических значений изменения СПГ, а также результаты математического моделирования, которые рассчитаны за два периода: а) 1981...2010 гг., б) 1991...2020 гг.

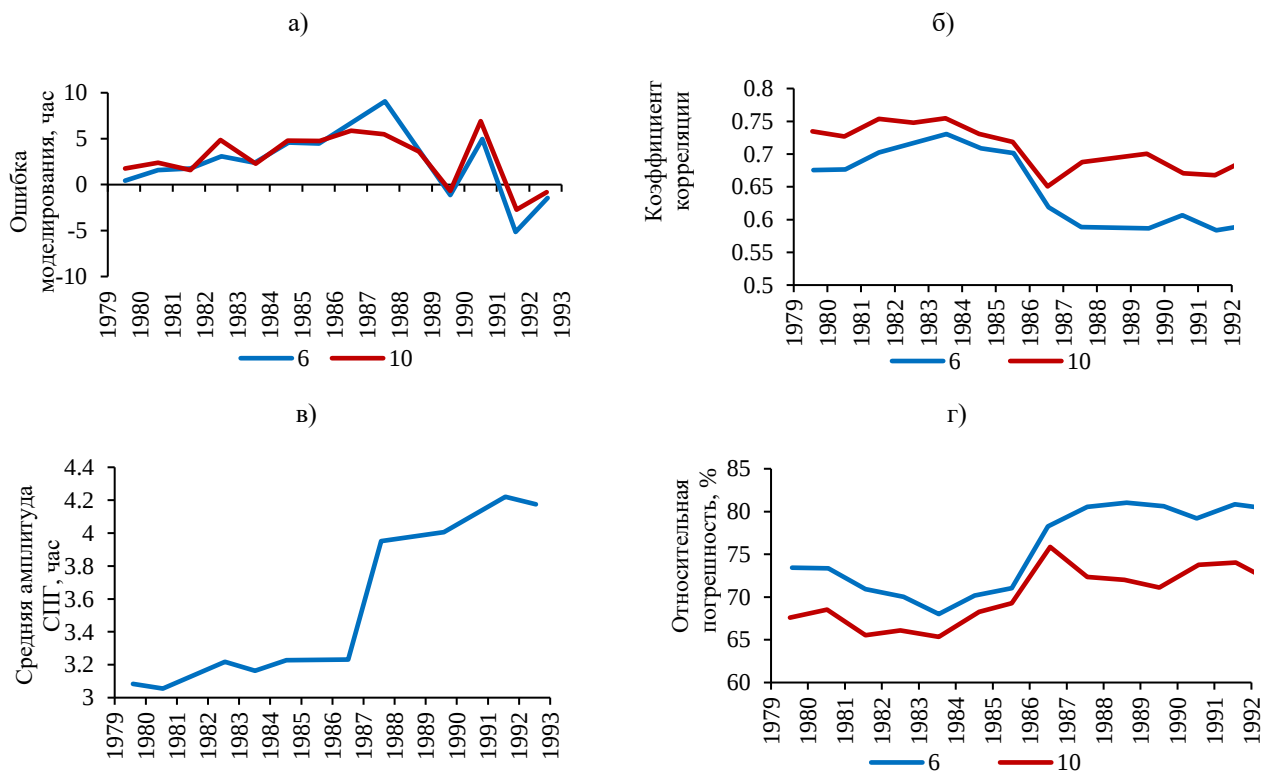


Рисунок 5. Зависимости от года начала скользящего окна длиной 30 лет значений характеристик качества моделирования и изменчивости СПГ для мая в Атырау.

а) ошибки моделирования в конце этого окна; б) коэффициента корреляции соответствующих рассматриваемого окна отрезков временных рядов изучаемого процесса и результатов его моделирования, в) средней амплитуды изучаемого процесса, оцененной для изучаемого окна; г) относительной погрешности моделирования межгодовых изменений СПГ (%)

Согласно рисунку 6 фактические временные ряды СПГ показывают выраженную межгодовую изменчивость с чередованием активных и пассивных грозовых сезонов. Сравнение показывает, что моделирование адекватно описывает общую направленность наблюдаемых изменений, особенно во второй половине исследуемого периода. Для периода 1981...2010 гг. характерна умеренная грозовая активность с плавными колебаниями и без ярко выраженного тренда. Модельные

данные относительно близки к наблюдениям, что говорит о стабильности атмосферной конвекции в тот период.

Во второй период с 1991 по 2020 годы отмечается незначительное сокращение суммарной продолжительности гроз. Модельная кривая подтверждает наличие нисходящего тренда, что указывает на сокращение конвективной активности в современный период.

Таблица 3

Значения коэффициентов моделей межгодовых изменений СПГ в 1992...2021 гг. для мая, соответствующих городу Атырау, содержащих 6 и 10 предикторов

Модель, содержащая 6 предикторов							
N	C _n	n	C _n	n	C _n	n	C _n
0	1.95872	2	-1.04597	4	0.79430	6	-0.09510
1	0.31002	3	0.69205	5	-0.58536	-	-
Модель, содержащая 10 предикторов							
0	2.01529	3	1.07153	6	-0.32187	9	0.39195
1	1.69162	4	1.49875	7	-0.12243	10	0.26532
2	-2.74604	5	-1.34106	8	-0.29959	-	-

Примечание: n – отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом, C_n – регрессионный коэффициент

Таблица 4

Оценки СПГ (час) для мая 2022...2024 гг., полученные с применением обеих моделей

Модель	2022	2023	2024
6 предикторов	6.842616	3.085931	0.440938
10 предикторов	7.834981	1.679373	1.258368

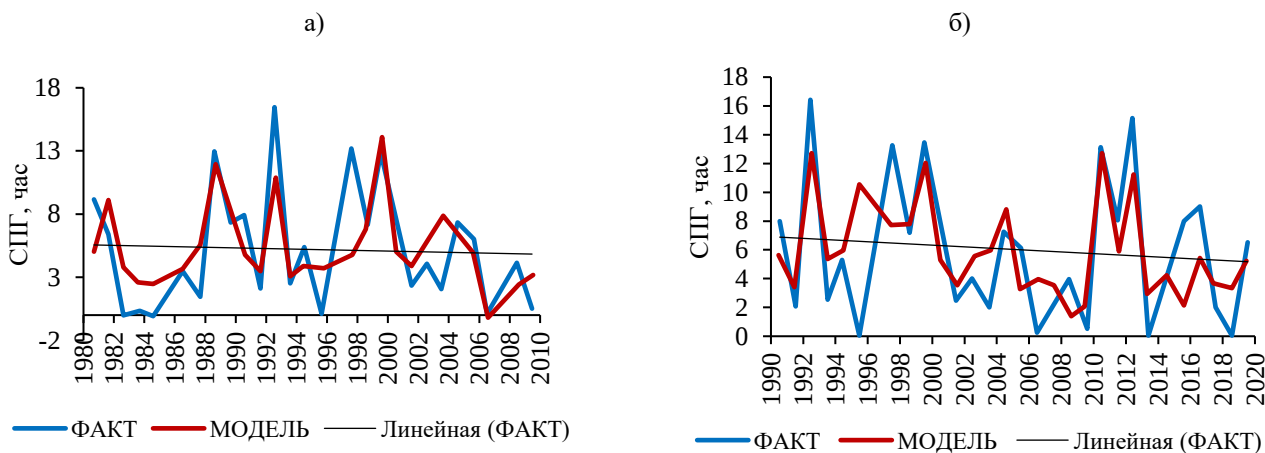


Рисунок 6. Фактические изменения СПГ для июня в Атырау, а также результаты их моделирования для модели с $n=10$ для периодов времени: а) 1981...2010 гг.; б) 1991...2020 гг.

Это согласуется с наблюдаемым повышением температуры приземного воздуха, сокращением влагоёмкости атмосферы. Вероятное объяснение – усиление термической конвекции и уменьшение влажности в нижних слоях атмосферы вследствие регионального потепления.

Согласно таблице 5, во временном отрезке 1981–2010 гг. $C_0 = 2.44$ — базовый уровень СПГ (т.е. условно ≈ 2.4 ч гроз в июне). Среди предикторов выделяются несколько положительных ($n = 2, 5, 6, 7, 8, 9$) и отрицательных ($n = 1, 3, 4, 10$) влияний. Наибольший положительный коэффициент: $C_2 = +0.94$, указывающий, что грозовая активность теснее связана с предикторами, расположенными севернее (48.25° с. ш.) и западнее (51.25° в. д.).

Отрицательные значения (например, $C_1 = -0.64$; $C_3 = -0.32$) отражают компенсацию или противоположное влияние барических аномалий. В целом структура коэффициентов чередуется по знаку, что типично для процессов с волновыми и пространственными корреляциями. Это свидетельствует о умеренно стабильной грозовой активности в регионе: локальные барические колебания уравнивают друг друга. В период 1991...2020 гг. $C_0 = 2.03$ — базовый уровень снижается по сравнению с предыдущим периодом, что говорит о некотором уменьшении средней продолжительности гроз. Коэффициенты приобретают более контрастные значения: Сильные положительные: $C_1 = +1.40$, $C_5 = +1.01$, $C_7 = +1.09$. Сильные отрицательные: $C_2 = -2.35$, $C_6 = -1.20$, $C_8 = -0.58$. Это указывает на усиление пространственно-временной неоднородности и более выраженную зависимость СПГ от региональных барико-циркуляционных факторов. Таким образом, в отличие от предыдущего периода, соотношение положительных и отрицательных коэффициентов стало более полярным, что отражает рост амплитуды конвективных процессов — чередование сезонов с аномально высокой и низкой грозовой активностью. Снижение C_0 указывает на уменьшение среднего числа часов гроз в июне — вероятно, вследствие смещения их активности на более ранние или поздние месяцы при общем изменении сезонного цикла конвекции. Отрицательные C_n во втором периоде отражают влияние антициклональной циркуляции и усиления сухих континентальных масс с юга, что может подавлять грозовую активность в отдельные годы. Положительные C_n (особенно C_1 , C_5 , C_7) указывают на зоны максимального вклада влагонасыщенных воздушных масс, поступающих с запада и северо-запада.

Таблица 5

Значения коэффициентов и характеристики предикторов математической модели (1), учитывающей 10 предикторов, которая описывает межгодовые изменения СПГ для июня в Атырау

1981...2010 гг.							
n	широта	долгота	C_n	n	широта	долгота	C_n
0			2.44139	6	47.5° с.ш.	51.75° в.д.	0.095625
1	48.25° с.ш.	51° в.д.	-0.64019	7	47.25° с.ш.	51.75° в.д.	0.159991
2	48.25° с.ш.	51.25° в.д.	0.94173	8	47.25° с.ш.	52° в.д.	0.290071
3	48.25° с.ш.	51.5° в.д.	-0.316047	9	47.25° с.ш.	52.25° в.д.	0.176207
4	48° с.ш.	51.5° в.д.	-0.049700	10	47° с.ш.	52.25° в.д.	-0.626935
5	47.75° с.ш.	51.5° в.д.	0.507500	-	-	-	-
1991...2020 гг.							
n	широта	долгота	C_n	n	широта	долгота	C_n
0			2.02933	6	47.5° с.ш.	51.75° в.д.	-1.19956
1	48.25° с.ш.	51° в.д.	1.40192	7	47.25° с.ш.	51.75° в.д.	1.08978
2	48.25° с.ш.	51.25° в.д.	-2.35470	8	47.25° с.ш.	52° в.д.	-0.58409
3	48.25° с.ш.	51.5° в.д.	-0.22976	9	47.25° с.ш.	52.25° в.д.	0.28871
4	48° с.ш.	51.5° в.д.	-0.47262	10	47° с.ш.	52.25° в.д.	0.14685
5	47.75° с.ш.	51.5° в.д.	1.01090	-	-	-	-

Примечание: n - отрезок ряда предиктора, совпадающий по времени с моделируемым процессом, C_n - регрессионный коэффициент

На рисунке 7 приведены зависимости от года начала скользящего окна длиной 30 лет характеристики моделирования и изменчивости СПГ по станции Атырау на примере июня.

Согласно рисунку 7 наблюдается нестабильность грозовых явлений в разные периоды, ошибки то снижаются, то возрастают. Это говорит о том, что модель неравномерно воспроизводит климатическую изменчивость СПГ. Коэффициент корреляции для некоторых окон дает низкие или средние значения корреляции, что указывает на слабое совпадение межгодовых колебаний СПГ модельных рядов с фактическими. Амплитуда СПГ показывает, что фактические значения колебаний часто выше, чем в моделировании, то есть модель «сглаживает» изменчивость. Относительная погрешность в отдельные периоды ошибки достигают высоких значений, что связано с систематическим недоучётом межгодовой изменчивости. Как показывает сопоставление результатов моделирования СПГ с фактическими их значениями над городом Атырау для июня показали, что относительные погрешности моделирования не превышают 55 %, что для практики считается не совсем удовлетворительным.

Из полученных результатов следует, что проведённый анализ соответствует существующим представлениям физики гроз [2], а также особенностям климата Прикаспийского региона Казахстана [5]. Это подтверждает, что грозы в данном регионе формируются под влиянием сложного взаимодействия континентального климата и уникальных гидрометеорологических особенностей Каспийского моря. Выявленные особенности межгодовых изменений СПГ в 1...3 микрорайонах Прикаспийского региона Казахстана, характерны для рассматриваемых летних месяцев.

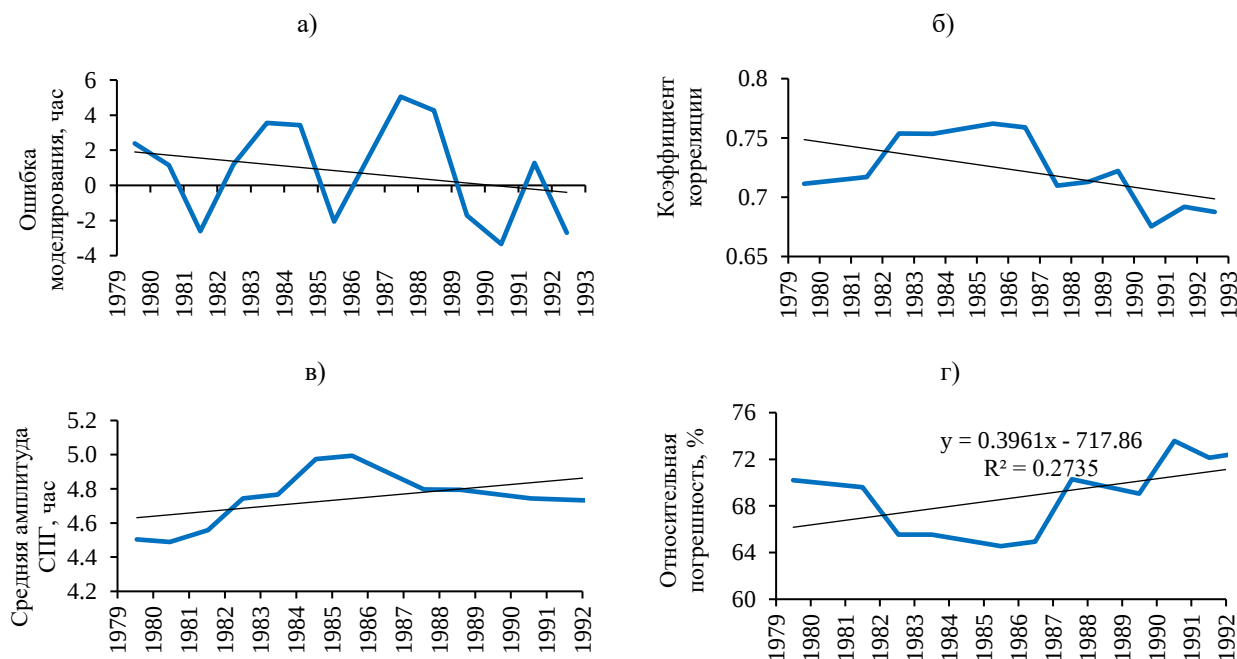


Рисунок 7. Зависимости от года начала скользящего окна длиной 30 лет значений характеристики моделирования и изменчивости СПГ для июня по станции Атырау.

а) ошибки моделирования в конце этого окна; б) коэффициента корреляции соответствующих рассматриваемого окну отрезков временных рядов изучаемого процесса и результатов его моделирования; в) средней амплитуды изучаемого процесса, оцененной для изучаемого окна; г) относительной погрешности моделирования межгодовых изменений СПГ (%)

Далее в таблице 6 представлены значения коэффициентов модели межгодовых изменений СПГ в 1992...2021 гг. для июня, соответствующих городу Атырау, содержащей 10 предикторов.

Согласно таблице 6 видно, что половина коэффициентов положительные, половина отрицательные, что отражает высокую изменчивость и противодействие атмосферных процессов.

$C_3 = -0.12$ - слабое отрицательное влияние локальных антициклонов, $C_6 = +0.13$ - незначительное усиление гроз при усилении влажных переносов, $C_9 = -2.86$ - сильное торможение грозовой активности при господстве континентальных воздушных масс, $C_1 = +0.22$ - слабое положительное влияние при западных ветровых режимах, $C_4 = +0.55$ - рост вероятности гроз при прохождении циклонов с Каспия, $C_7 = -1.86$ - подавление грозовых процессов в условиях устойчивого антициклона, $C_{10} = +1.17$ - вклад южных тёплых потоков, повышающих конвекцию, $C_2 = -0.23$ - слабое отрицательное влияние северных ветров, понижение активности при охлаждении нижней тропосферы, $C_8 = +3.39$ - наиболее сильный положительный фактор — усиление конвективной неустойчивости и влагосодержания воздуха.

Таблица 6

Значения коэффициентов модели межгодовых изменений СПГ в 1992...2021 гг. для июня, соответствующих городу Атырау, содержащей 10 предикторов.

Модель, содержащая 10 предикторов							
0	2.72388	3	-0.12051	6	0.13381	9	-2.86285
1	0.21553	4	0.54748	7	-1.86235	10	1.17484
2	-0.22720	5	-0.23312	8	3.38788	-	-

Наибольший вклад в рост СПГ вносят предикторы C_8 и C_{10} (тёплые и влажные воздушные массы), а уменьшение - C_9 и C_7 (антициклональные периоды). Рост C_8 и C_{10} - результат усиления регионального потепления, увеличения влагосодержания и частоты дней с неустойчивой стратификацией.

Отрицательные C_7 и C_9 указывают на значимость антициклонов и вторжений сухого континентального воздуха, которые в отдельные годы ограничивают развитие конвекции. Модель демонстрирует, что грозовая активность в Атырау находится под сильным влиянием термодинамических факторов, усиливающихся при повышении температуры приземного воздуха. Межгодовые колебания СПГ соответствуют чередованию фаз активных и пассивных грозовых сезонов, связанных с крупномасштабными циркуляционными изменениями над Каспием и Западным Казахстаном.

А в таблице 7 представлены Оценки СПГ (час) для июня 2022...2024 гг., соответствующие городу Атырау, которые получены с применением разработанной модели. Согласно таблице 7, резкий рост в 2024 г. может указывать на потенциальный экстремальный год по конвективной активности, связанный с усилением термической неустойчивости и притоком влажного воздуха с Каспийского моря. Колебания 2022–2023 гг. отражают типичную межгодовую изменчивость при слабых барико-циркуляционных контрастах.

Таблица 7

Оценки СПГ (час) для июня 2022...2024 гг., соответствующие городу Атырау, которые получены с применением разработанной модели

Модель	2022	2023	2024
10 предикторов	3.768595	2.48405	18.53405

Современный период характеризуется ростом амплитуды межгодовых колебаний СПГ, что свидетельствует об увеличении частоты экстремальных грозовых явлений в регионе. Прогноз на 2024 г. указывает на возможность аномально высокого уровня грозовой активности, требующего усиленного мониторинга и уточнения по фактическим наблюдениям.

Использованная математическая модель для оценки СПГ в различных пунктах Прикаспийского региона, показала относительную погрешность в более 50 % случаев. Возможные причины ошибок, в том, что имеется недостаточная пространственная детализация модели. Локальные особенности грозовой активности, то есть влияние Каспийского моря либо орографии местности, плохо отражаются в региональных моделях. Качество исходных данных также влияют на результаты, которые не учитывают локальные метеофакторы. Нельзя забывать, что процесс грозовой активности зависит от конвективных процессов, которые трудно корректно параметризовать в моделях.

На основании проведенного анализа и выявленных пробелов, предлагаются следующие рекомендации по дальнейшим научным исследованиям и мониторингу:

- 1) Разработать описание комплексного подхода физиологии возникновения гроз для выявления закономерностей изменения характеристик гроз над Прикаспийским регионом Казахстана и казахским сектором Каспия при различных сценариях дальнейших изменений его климата.
- 2) Выполнить оценку влияния моря на температурный режим Каспийского моря и испарения влаги с его поверхности на формирование гроз в изучаемых микрорайонах Прикаспийского региона.
- 3) Провести анализ последствий происходящих изменений грозовой активности в изучаемом регионе для судоходства в казахстанском секторе Каспия, нефтегазовой и другой критически важной инфраструктуры, а также сельского хозяйства Прикаспийского региона Казахстана.
- 4) Разработка и верификация региональных метеорологических моделей с высоким разрешением для более точного прогнозирования гроз, включая "сухие грозы", и их потенциальных последствий. Это позволит улучшить системы раннего предупреждения и минимизировать ущерб.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия в регионе наблюдается рост повторяемости грозовых явлений, особенно в начале XXI века: если в 1980-е годы фиксировалось в среднем 10...15 гроз в год, то в XXI веке их количество увеличилось до 20...30. При этом отмечается выраженная межгодовая изменчивость.

Региональные различия показали, что северо-запад (Ганюшкино, Новый Уштаган) имеют максимальные значения в отдельные годы конца XX века превышали 50 гроз. В XXI веке – заметное снижение, более 30 случаев в год отмечались лишь несколько раз. Индерборский: резкий рост после 1995 г. – до 23...25 случаев в год благодаря влиянию фронтов и влаги с Каспия. Сагиз и Карабау: увеличение на 5...6 случаев, но уровень ниже из-за сухости и континентальности климата. Прикаспийские станции (Атырау, Махамбет, Пешной, Кульсары): высокая изменчивость. В Атырау несколько лет зафиксировано более 30 гроз, в Пешной максимум не превышал 12...15.

Сезонные особенности показали что в мае – наибольшая продолжительность гроз (до 16...19 часов), связана с неустойчивостью атмосферы и влагой Каспия, в июне наблюдаются – локальные, но сильные пики (до 16...17 часов в 1994 г.). В июле – обычно меньше гроз, но возможны экстремумы (до 20 ч 55 мин в 2012 г.).

Таким образом тенденции показывают, что наибольшая активность гроз приходилась на 1980...1990-е годы. В XXI веке, несмотря на отдельные экстремальные годы, наблюдается тенденция к снижению как частоты, так и суммарной продолжительности гроз (СПГ). Различия объясняются физико-

географическими особенностями (влияние Каспия, фронтальные процессы, континентальность климата). Долгосрочные колебания указывают на усиление контрастов сезонной циркуляции и рост конвективного потенциала, но с последующим снижением активности в последние годы.

ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ

Данные, использованные в этом исследовании, получены авторами из одного источника: РГП «Казгидромет» МЭПР РК.

ВКЛАД АВТОРОВ

Концептуализация – ЖКН; управление данными – АВХ; формальный анализ – ЖКН; методология – АВХ; программное обеспечение – НЕР; отслеживание – ЖКН; визуализация – ЖКН; написание исходного проекта – АВХ; написание и редактирование – ЖКН.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования по научным и (или) научно-техническим проектам на 2025-2027 годы Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан: «Динамика ледового режима Каспийского моря и реки Жайык в условиях климатических изменений» (№ ИРН: AP26199145).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Крылова В. С., Маканова А. У., Токмагамбетова Р. Ю. Эколого-экономическое состояние Атырауской области // Гидрометеорология и экология. – 2009. – №4 (55). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskoe-sostoyanie-atyrauskoj-oblasti>
- 2 Мучник В. М. Физика грозы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 456 с.
- 3 Бэр А. Опасные явления погоды и их прогноз // КиЯ. – 2011. – №1 (229). – С. 82–85.
- 4 Аджиева А. А., Кереева З. М., Гятов Р. А. Поражаемость территории и объектов Северного Кавказа молниями // Наука. Инновации. Технологии. – 2020. – №3.
- 5 Pavlova A., Myslenkov S., Arkhipkin V., Surkova G. (2022). Storm Surges and Extreme Wind Waves in the Caspian Sea in the Present and Future Climate. Civil Engineering Journal. Vol. 8, No. 11. P. 2353–2377. DOI: [10.28991/CEJ-2022-08-11-01](https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-11-01).
- 6 Горбатенко В. П. Синоптические условия образования и развития гроз над территорией Западной Сибири и Казахстана // Вестник Томского государственного университета. – 2001. – №274. – С. 148–154.
- 7 Прякина С. И., Котова А. А. Синоптические условия образования гроз с выпадением ливневых осадков над территорией Западной Сибири // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. – 2023. – Т. 23, №4. – С. 250–254. – DOI: [10.18500/1819-7663-2023-23-4-250-254](https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-4-250-254).
- 8 Molanejad M., Soltani M., Saadat Abadi R., Babu C. A., Sohrabi M. M., Mathew M. (2015). Climatology of Cyclones and Their Tracking over Southern Coasts of Caspian Sea. No. 9. P. 117–132.
- 9 Ding J., Zhang W., Zheng D. (2025). Thunderstorm Structure and Lightning Properties in South China and over the South China Sea: A Comparative Study. Journal of Meteorological Research. Vol. 39. P. 415–430.
- 10 Voskresenskaya E., Maslova V., Lubkov A., Zhuravskiy V. (2022). Present and Future Changes in Winter Cyclonic Activity in the Mediterranean–Black Sea Region in the 21st Century Based on an Ensemble of CMIP6 Models. Atmosphere. Vol. 13. Article 1573. DOI: [10.3390/atmos13101573](https://doi.org/10.3390/atmos13101573).
- 11 Pashchenko I. V. (2020). Cyclonic Activity over the Caspian Sea and Its Impact on Regional Weather Patterns. Russian Meteorology and Hydrology. Vol. 45, No. 6. P. 401–410. DOI: [10.3103/S1068373920060055](https://doi.org/10.3103/S1068373920060055).
- 12 Rakov V. A., Uman M. A. (2003). Lightning: Physics and Effects. – Cambridge: Cambridge University Press.
- 13 Бултеков Н. Режим пыльных бурь на территории Атырауской области // Гидрометеорология и экология. – 2023. – №2. – С. 34–39. – URL: <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/912>.
- 14 Zhang X., Fang J., Yu Z. (2022). Characteristics of the Quasi-Periodic Outbreaks of Deep Convection during Tropical Cyclone Genesis. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 127. e2021JD035312. DOI: [10.1029/2021JD035312](https://doi.org/10.1029/2021JD035312).
- 15 Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. – 752 с.

REFERENCES

- 1 Krylova V. S., Makanova A. U., Tokmagambetova R. Yu. (2009). Ekologo-ekonomicheskoe sostoyanie Atyrauskoj oblasti [The ecological and economic state of the Atyrau region]. Gidrometeorologiya i ekologiya. No. 4 (55). [Electronic resource]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskoe-sostoyanie-atyrauskoj-oblasti>. [in Russian]
- 2 Muchnik V. M. (1974). Fizika grozy [The Physics of Thunderstorms]. Leningrad: Gidrometeoizdat. 456 p. [in Russian]
- 3 Ber A. (2011). Opasnye yavleniya pogody i ikh prognoz [Dangerous weather phenomena and their forecast]. KiYa. No. 1 (229). P. 82–85. [in Russian]
- 4 Adzhieva A. A., Kerefova Z. M., Gyatov R. A. (2020). Porazhaemost territorii i ob'ektov Severnogo Kavkaza molniiami [Lightning strikes in the North Caucasus region and its facilities]. Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. No. 3. [in Russian]
- 5 Pavlova A., Myslenkov S., Arkhipkin V., Surkova G. (2022). Storm Surges and Extreme Wind Waves in the Caspian Sea in the Present and Future Climate. Civil Engineering Journal. Vol. 8, No. 11. P. 2353–2377. DOI: [10.28991/CEJ-2022-08-11-01](https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-11-01).
- 6 Gorbatenko V. P. (2001). Sinopticheskie usloviya obrazovaniya i razvitiya groz nad territoriei Zapadnoy Sibiri i Kazakhstana [Synoptic conditions for the formation and development of thunderstorms over Western Siberia and Kazakhstan]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. No. 274. P. 148–154. [in Russian]

- 7 Pryakhina S. I., Kotova A. A. (2023). Sinopticheskie usloviya obrazovaniya groz s vypadeniyem livnevnykh osadkov nad territoriei Zapadnoy Sibiri [Synoptic conditions for the formation of thunderstorms with heavy rainfall over Western Siberia]. Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Nauki o Zemle. Vol. 23, No. 4. P. 250–254. – DOI: 10.18500/1819-7663-2023-23-4-250-254. [in Russian]
- 8 Molanejad M., Soltani M., Saadat Abadi R., Babu C. A., Sohrabi M. M., Mathew M. (2015). Climatology of Cyclones and Their Tracking over Southern Coasts of Caspian Sea. No. 9. P. 117–132.
- 9 Ding J., Zhang W., Zheng D. (2025). Thunderstorm Structure and Lightning Properties in South China and over the South China Sea: A Comparative Study. Journal of Meteorological Research. Vol. 39. P. 415–430.
- 10 Voskresenskaya E., Maslova V., Lubkov A., Zhuravskiy V. (2022). Present and Future Changes in Winter Cyclonic Activity in the Mediterranean–Black Sea Region in the 21st Century Based on an Ensemble of CMIP6 Models. Atmosphere. Vol. 13. Article 1573. DOI: 10.3390/atmos13101573.
- 11 Pashchenko I. V. (2020). Cyclonic Activity over the Caspian Sea and Its Impact on Regional Weather Patterns. Russian Meteorology and Hydrology. Vol. 45, No. 6. P. 401–410. DOI: [10.3103/S1068373920060055](https://doi.org/10.3103/S1068373920060055).
- 12 Rakov V. A., Uman M. A. (2003). Lightning: Physics and Effects. – Cambridge: Cambridge University Press.
- 13 Bultekov N. (2023). Rezhim pyl'nykh bur' na territorii Atyrauskoy oblasti [Dust storm conditions in the Atyrau region]. Gidrometeorologiya i ekologiya. No. 2. P. 34–39. URL: <https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/912>. [in Russian]
- 14 Zhang X., Fang J., Yu Z. (2022). Characteristics of the Quasi-Periodic Outbreaks of Deep Convection during Tropical Cyclone Genesis. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. Vol. 127. e2021JD035312. DOI: [10.1029/2021JD035312](https://doi.org/10.1029/2021JD035312).
- 15 Matveev L. T. (1984). Osnovy obshchey meteorologii. Fizika atmosfery [Fundamentals of General Meteorology. Physics of the Atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 752 p. [in Russian]

КАСПИЙ МАҢЫНЫҢ СОЛТҮСТІК БӨЛІГІНДЕГІ НАЙЗАҒАЙЛАРДЫҢ ЖАЛПЫ ҰЗАҚТЫҒЫНЫҢ ЖЫЛДАР АРАСЫНДАҒЫ ӨЗГЕРІСТЕРІН АТМОСФЕРАЛЫҚ ЖАУЫН- ШАШЫН ВАРИАЦИЯЛАРЫН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП МОДЕЛЬДЕУ

Жанар К. Наурызбаева*¹PhD, Александр В. Холопцев² г.ф.д., Жулдыз Х. Кенжина¹, Нурканат Е. Рахматулла¹

¹ «География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru, kenzhina03@mail.ru, nurkanat.rakhmatulla@mail.ru

² Н.Н. Зубов атындағы Мемлекеттік океанографиялық институты» Севастополь бөлімшесі, Севастополь, Ресей Федерациясы; kholoptsev@mail.ru

Автор корреспонденция: Жанар К. Наурызбаева, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

ТҮЙІН СӨЗДЕР

Каспий теңізі,
найзағай,
атмосфералық жауын-шашын,
найзағайдың ұзақтығы,
жылдар арасындағы
өзгерістердің математикалық
модельдеуі

Мақала жайында:

Жіберілді: 15.09.2025
Қайта қаралды: 03.10.2025
Қабылданды: 05.10.2025
Жарияланды: 08.10.2025

АБСТРАКТ

Солтүстік Каспийдегі найзағайлық белсенділікті кеме қатынасы, мұнай-газ инфрақұрылымы, электр желілері және ауыл шаруашылығы үшін қауіп факторы ретінде зерттеу, сондай-ақ өзгермелі климат жағдайында мониторинг пен болжам жүйелерін жетілдірудің қажеттілігі өңір үшін маңызды. Жұмыста 1977...2022 жж. аралығында Атырау облысының тоғыз метеостанциясы бойынша жүргізілген көпжылдық найзағай белсенділігін бақылау деректері талданды. Найзағай құбылыстарының ұзақтығы 2...4 және 7...10 жылдық циклдері бар квазипериодтық құрылымға ие екені анықталды. Атырау станциясының мысалында кейбір айларда найзағайдың жиынтық ұзақтығы 20...21 сағатқа дейін жететіні көрсетілді, бұл құбылыстың жоғары жылдар арасындағы өзгергіштігін көрсетеді. Уақыттық қатарларды статистикалық модельдеу әдістері арқылы найзағайдың жалпы ұзақтығының өзгеру үрдістері бағаланып, алдағы жылдарға болжамдық мәндері есептелді. Зерттеу нәтижелері соңғы онжылдықтарда найзағайдың орташа қайталануы мен ұзақтығының төмендеу үрдісін көрсетеді. Алынған тұжырымдар қауіпті атмосфералық құбылыстарды мониторингтеу мен болжаудың сенімділігін арттыру үшін практикалық маңызға ие.

MODELING OF INTERANNUAL VARIATIONS IN THE TOTAL DURATION OF THUNDERSTORMS IN THE NORTHERN CASPIAN REGION, CONSIDERING ATMOSPHERIC PRECIPITATION VARIABILITY

Zhanar Naurozbayeva*¹ PhD, Alexander Kholoptsev² Doctor of Geographical Sciences, Zhuldyz Kenzhina¹, Nurkanat Rakhmatulla¹

¹ JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; naurozbaeva.zhanar@mail.ru, kenzhina03@mail.ru, nurkanat.rakhmatulla@mail.ru

² Sevastopol Branch of the N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Sevastopol, Russian Federation; kholoptsev@mail.ru
Corresponding author: Zhanar Naurozbayeva, naurozbaeva.zhanar@mail.ru

KEY WORDS

Caspian Sea,
thunderstorm,
atmospheric precipitation,
thunderstorm duration,
mathematical modeling of
interannual variations

About article:

Received: 15.09.2025
Revised: 03.10.2025
Accepted: 05.10.2025
Published: 08.10.2025

ABSTRACT

The study of thunderstorm activity in the Northern Caspian as a risk factor for navigation, oil and gas infrastructure, power grids, and agriculture, as well as the need to improve monitoring and forecasting systems under changing climate conditions, is of great importance for the region. This paper analyzes long-term observations of thunderstorm activity in the Northern Caspian based on data from nine meteorological stations in Atyrau Region for the period 1977...2022. It was established that thunderstorms exhibit a quasi-periodic structure with cycles lasting 2...4 and 7...10 years. Using the example of the Atyrau station, it was shown that the total duration of thunderstorms in certain months reaches extreme values of up to 20...21 hours, reflecting the high interannual variability of the phenomenon. Statistical time-series modeling methods were applied to assess trends in the total duration of thunderstorms and to calculate forecast values for the coming years. The results indicate a decreasing trend in the average frequency and duration of thunderstorms in recent decades. The findings have practical significance for improving the reliability of monitoring and forecasting of hazardous atmospheric phenomena.

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