

Климатология и метеорология

Климатология және метеорология

Climatology and meteorology

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-3-91-104.35>

МРНТИ 39.23.15

УДК 551.583

**Ж. К. Наурызбаева^{1*}, Г. Е. Монкаева², М. А. Жунисова³,
Н. Е. Рахматулла⁴, Г. А. Еркинова⁵, Ж. Х. Кенжина⁶**

^{1*} PhD руководитель лаборатории региональных климатических изменений
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru)

² Научный сотрудник лаборатории региональных климатических изменений
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; gulsara.monkayeva@mail.ru)

³ Научный сотрудник лаборатории региональных климатических изменений
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; makpal80@mail.ru)

⁴ Младший научный сотрудник лаборатории региональных климатических изменений
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; nurkanat.rakhmatulla@mail.ru)

⁵ Ведущий инженер лаборатории региональных климатических изменений
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; yerkinova.gaukhar@mail.ru)

⁶ Ведущий инженер лаборатории региональных климатических изменений
(АО «Институт географии и водной безопасности», Алматы, Казахстан; kenzhina03@mail.ru)

ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ В ПРИКАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ ПО КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ BCC-CSM1-2 НА ПЕРСПЕКТИВУ

Аннотация. Проведена оценка изменения температуры воздуха и атмосферных осадков в Прикаспийском регионе с использованием климатической модели BCC-CSM1-2 и климатических сценариев SSP4.5 и SSP8.5. Исследование охватывает период с 1961 по 2024 год. Выявлены существенные повышения температуры воздуха и изменения режима осадков. Среднегодовая температура растёт с положительными аномалиями, отмечающимися с 1976 года. Станции, расположенные в степных и пустынных зонах (Тушибек и Бейнеу), регистрируют особенно резкий рост с 2010-х годов. Результаты китайской климатической модели показывают, что к концу XXI века по сценарию SSP4.5 температура воздуха зимой может увеличиться на +6-+8 °С в континентальных районах и на +3-+4 °С на побережье, а летом – на +6-+7 °С. По жёсткому сценарию SSP8.5 к концу века температура может повыситься на +7-+8 °С зимой и на +9-+10 °С летом. Ожидаются также и изменения в режиме осадков до конца столетия уменьшение как зимних, так и летних осадков. Наибольшее сокращение зимних осадков ожидается на северо-западе региона (53–60% в Актобе и Уральске). Летом в засушливых районах (Бейнеу, Шалкар, Тушибек) прогнозируется значительное уменьшение осадков, достигающее 60–71%, что может усугубить риски для инфраструктуры и сельского хозяйства. Для адаптации региона к этим изменениям необходимы комплексные меры, включая модернизацию систем водоснабжения, внедрение технологий "умного" земледелия, агролесомелиорацию и восстановление лесов.

Ключевые слова: Жайык-Каспийский водохозяйственный бассейн, изменение климата, климатические сценарии, модель BCC-CSM1-2, температура воздуха, атмосферные осадки.

Введение. В условиях ускоряющихся климатических изменений особенно актуальным становится изучение климатических сценариев, которые применяются для определения уязвимости территорий и планирования устойчивого развития [1, 2]. Прикаспийский регион является

стратегически важным как с точки зрения политики, экономики, энергетики, логистики, так и экологии, рекреации. Кроме того, продолжительное падение уровня Каспийского моря в последние десятилетия вызывает беспокойство. По данным наблюдения за 2024 год, уровень моря снизился на 130 см по сравнению с 2005 годом. Прогнозы на перспективу весьма неутешительны, ожидается дальнейшее снижение уровня моря до -32 м по Балтийской системе и более. В целом Западный Казахстан – один из регионов, где повышение температуры воздуха наиболее существенно, средние темпы увеличения достигают 0,37–0,64 °C каждые 10 лет. Наблюдается рост повторяемости дней с температурой выше +35 °C, вегетационный период удлиняется. Национальной гидрометеорологической службой на западе Казахстана фиксируются повышение частоты и интенсивности опасных метеорологических явлений, таких, как засухи, волны жары. Что касается выпадения осадков, то они отличаются большой переменчивостью. Хотя в некоторые годы в западных регионах наблюдается избыток осадков, но в целом для региона характерны уменьшение количества осадков летом и осенью и повышенная засушливость. Это усугубляет и без того резко континентальный и засушливый климат [3]. Таким образом, определение потенциальных изменений климата в будущем и выработка рекомендательных мер по адаптации к ним региона становятся стратегически важными [1,4].

Целью исследования являются оценка изменения термического режима и режима осадков Прикаспийского региона с применением климатических сценариев-прогнозов с последующей выработкой рекомендательных мер для учета в национальном адаптационном плане, а также определение причинно-следственных связей этих изменений.

Существует шесть основных фаз CMIP: CMIP1 (1995-1996) – первая попытка сравнения климатических моделей. CMIP2 (1997-2001) – анализ моделей с учетом концентрации CO₂. CMIP3 (2005-2007) – использовался в Четвёртом докладе МГЭИК (IPCC AR4), применялись сценарии SRES. CMIP4 (неофициальный этап, начало 2010-х годов) – переходный период к CMIP5 (2011-2013) – использовались сценарии RCP (Representative Concentration Pathways), которые легли в основу Пятого доклада IPCC (AR5). CMIP6 (2016 г. – настоящее время) – включает сценарии SSP (Shared Socioeconomic Pathways) и используется в Шестом докладе IPCC (AR6, 2021) [5,6]. Важно отметить, что существуют неопределенности в моделях, которые могут давать погрешности при расчетах, особенно в локациях со сложными орографическими условиями. Но за последние десятилетия предприняты огромные усилия по улучшению производительности моделей для особых регионов и аспектов климатической системы [7].

Каждый новый этап CMIP включает усовершенствованные модели, более детальные физические процессы и новые сценарии развития климата. Оценки последствий антропогенного изменения климата основаны на прогнозах климатических моделей. Неопределенности в этих моделях часто были ограничивающим фактором, особенно в локальных масштабах. Эффективность моделей CMIP5 при моделировании 20-летних экстремальных температур и осадков сопоставима с эффективностью ансамбля CMIP3 [8]. CMIP5 по сравнению со CMIP3 включает в себя более полные модели и более широкий набор экспериментов, адресованных большому разнообразию научных проблем. В проекте CMIP5 дана лучшая документация по моделям и условиям эксперимента и сформирована новая стратегия, которая делает результаты более доступными для исследователей. Так, если в проекте CMIP3 рассматривалось 12 экспериментов с моделями, то в CMIP5 таких экспериментов уже 35, и их перечень дан, например, в работе [8]. В проекте CMIP5 вместо известных сценариев SRES (B1, A1B, A2), соответствующих концентрации CO₂, представлены новые сценарии RCP (Representative Concentration Pathway), связанные со стабилизацией общего антропогенного воздействия к 2100 году на разных уровнях: SSP2-4.5, SSP5-8.5. Сценарии климатических изменений основаны на социально-экономических путях развития (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) и сценариях выбросов (Representative Concentration Pathways, RCP). Для Казахстана наиболее часто используются следующие сценарии: 1) SSP2-4.5 (RCP 4.5) или его еще называют умеренным сценарием, при котором выбросы стабилизируются во второй половине XXI века, а температура увеличится на 2,5–3°C; 2) SSP5-8.5 (RCP 8.5) – жесткий сценарий, при котором выбросы продолжают расти, приводя к потеплению более чем на 4°C [8].

CMIP6 использует новую систему сценариев SSP (Shared Socioeconomic Pathways), которые сочетаются с RCP (Representative Concentration Pathways) для оценки будущего изменения климата [9]. Основные сценарии CMIP6: 1) SSP1-1.9 – строгие меры по снижению выбросов, цель –

удержание потепления ниже 1,5 °C; 2) SSP1-2.6 – устойчивый путь с умеренным сокращением выбросов; 3) SSP2-4.5 – средний социально-экономический рост с умеренными мерами по контролю выбросов; 4) SSP3-7.0 – высокий уровень выбросов при глобальных экономических и политических конфликтах; 5) SSP5-8.5 – сценарий с высоким уровнем потребления ископаемого топлива и максимальными выбросами. Основные усовершенствования в СМIP6 по сравнению с СМIP5 – это более детализированные сценарии выбросов, в СМIP5 использовались RCP-сценарии (Representative Concentration Pathways), а в СМIP6 применяются SSP-сценарии (Shared Socio-economic Pathways), которые включают социально-экономические факторы наряду с выбросами парниковых газов [10].

Материалы и методы исследования. Для оценки климатических изменений региона привлечены данные метеорологических станций Уральск, Актобе, Атырау, Шалкар, Форт-Шевченко, Тушибек и Бейнеу, которые климатически репрезентативны для Западного Казахстана [11] (рисунок 1). Период исследования 1961-2024 гг.

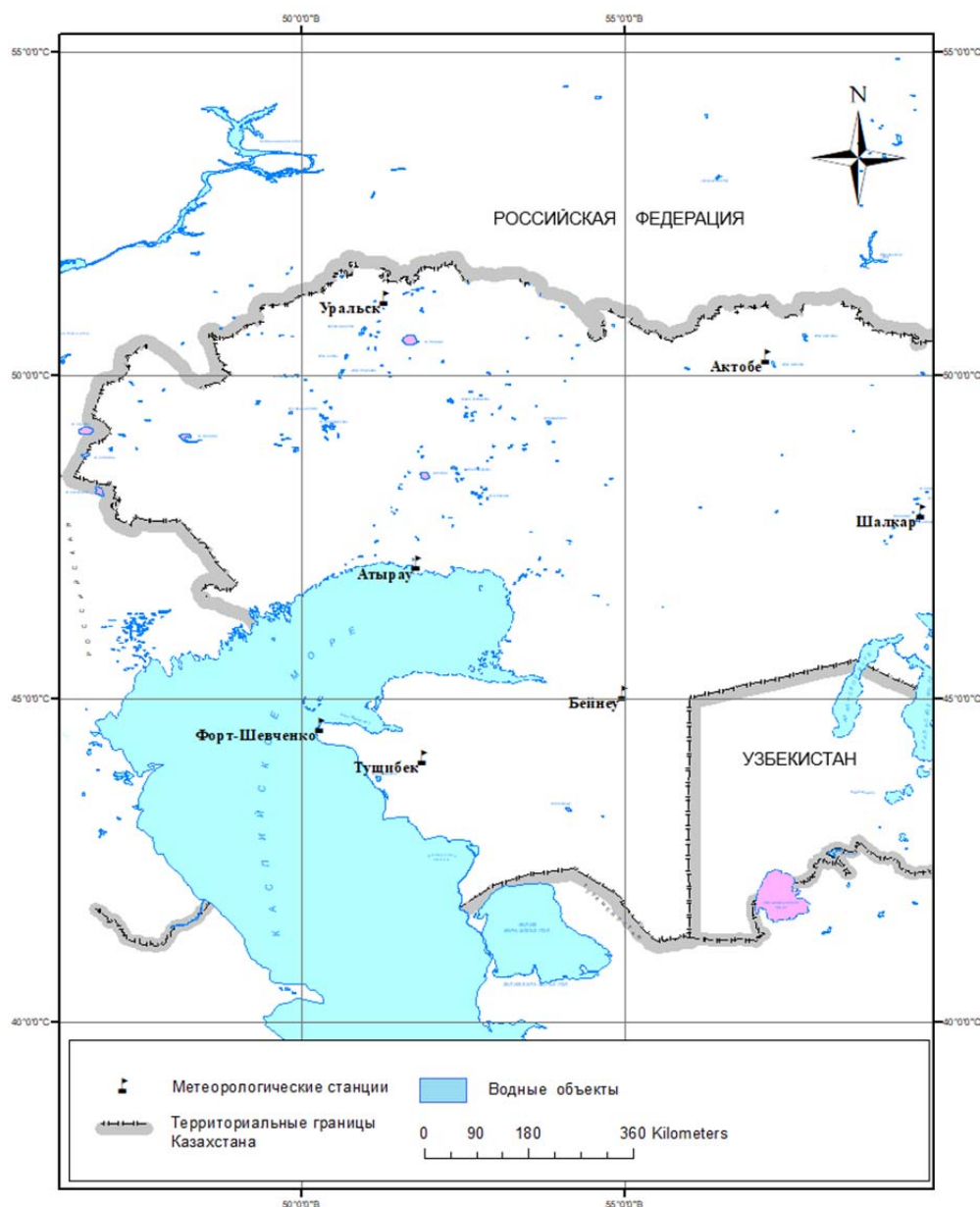


Рисунок 1 – Карта-схема Западного Казахстана

Figure 1 – Map of the West Kazakhstan

Для формирования качественной базы данных проведены статистические расчеты и критические проверки на однородность данных, которые приняты в климатической практике. При оценке однородности эмпирических рядов метеорологических параметров использованы критерии Стьюдента, Фишера, Калмыкова-Грabbса. В соответствии с принятой в настоящее время международной практикой при проверке однородности метеорологических рядов наблюдений признано наиболее целесообразным использовать комбинированный статистический подход для оценки однородности рядов [12-15]. Существенность вклада трендовой составляющей в общую дисперсию временного ряда температуры воздуха оценивалась с помощью коэффициента детерминации (D). Тренд считался значимым, если коэффициент детерминации превышал 5%. Для оценки будущих значений метеорологических параметров использованы климатические модели, разработанные МГЭИК, взятые из базы данных Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) [16].

Использовались рекомендованные МГЭИК периоды: 1) 2021–2040 гг. (среднесрочный прогноз) – позволяет оценить ближайшие изменения климата, имеющие практическую значимость для адаптации; 2) 2041–2060 гг. (долгосрочный прогноз) – подходит для анализа устойчивых трендов и оценки сценариев изменения климата; 3) 2080–2100 гг. (конец XXI века) – используется для стратегического планирования и оценки сценариев глобального потепления [12]. Общее количество моделей, которые применяются в CMIP6, более 30, для исследуемой территории отобраны наиболее подходящие, которые отличаются высокой детализацией и отражают региональные климатические условия страны. Одной из таких моделей является модель Китайского метеорологического агентства BCC-CSM1-2 с разрешением 100 км ($1,1^\circ \times 1,1^\circ$), основанная на глобальной модели циркуляции атмосферы и океана, включающая данные спутниковых наблюдений атмосферного давления, осадков и парниковых газов [17].

В работе рассматривались некоторые месяцы середины сезонов в связи с тем, что именно в эти месяцы в основном происходят изменения в барико-циркуляционных процессах, а также смена условий меридионального и зональных процессов в верхних слоях тропосферы, которые наиболее сильно влияют на приповерхностные климатические условия [18].

Результаты. На всех станциях исследуемого региона отмечается увеличение не только среднегодовой температуры воздуха, но и сезонных значений, но важно проанализировать именно ее аномалии, так как аномалии показывают изменения относительно определенного выбранного периода. По утверждению ВМО стандартные 30-летние базовые периоды должны обновляться каждые десять лет, чтобы лучше отражать меняющийся климат и его влияние на ежедневные погодные условия. Всемирной метеорологической организацией было рекомендовано использовать период 1991-2020 гг. Для исторического сравнения и мониторинга изменения климата ВМО рекомендует продолжить использовать период 1961-1990 гг. как базовый для расчета и отслеживания глобальных климатических аномалий относительно современного периода [19,20].

Аномалия температуры воздуха за базовый и современный периоды показывает, что основная тенденция увеличения температуры воздуха сохраняется на всех станциях Западного Казахстана. Четко прослеживается тенденция увеличения в аномалиях среднегодовой температуры воздуха в базовом периоде 1961-1990 гг., согласно которому положительная аномалия отмечается с 1976 г., прирост температуры составляет до $1,8^\circ\text{C}$. На многих станциях начало положительных аномалий начинается с 1976 г. в историческом базовом периоде (1961-1990 гг.), а в современном базовом периоде (1991-2020 гг.) увеличение температуры после 2000 г. В целом за базовый период максимальная аномалия отмечается на станции Атырау и составляет $2,6^\circ\text{C}$, что является показательным значением и позволяет сделать вывод об увеличении влияния западного переноса и частых выходов Черноморских циклонов, теплых воздушных масс с территории Кавказа, Черного моря. Станции, расположенные в степной и пустынной зонах (Тушибек и Бейнеу), фиксируют стремительный рост температуры с 2010-х годов. Воздействие орографических условий оказывает усиливающий эффект.

Имеются два типа климатических изменений, которые отражают разные физические механизмы, действующие в климатической системе Земли: монотонные изменения в виде тренда или цикла и ступенчатые изменения. Трендовые или циклические изменения имеют место в слабо инерционной или равновесной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений или триггерный механизм характеризует неравновесную

систему, которая может компенсировать внешние воздействия и сопротивляться им до тех пор, пока эти воздействия не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, обычно также квазистационарный, уровень. Таким образом, рассчитаны годы перехода одного квазистационарного периода временного ряда к другому, с определением средних температур воздуха. При этом каждый квазистационарный период проверен на однородность с применением статистических методов, критериев Фишера, Стьюдента [12-15].

Согласно результатам расчета (рисунок 2) зимой на всех станциях год перехода отмечен как 1999, а летом – 2006 год.

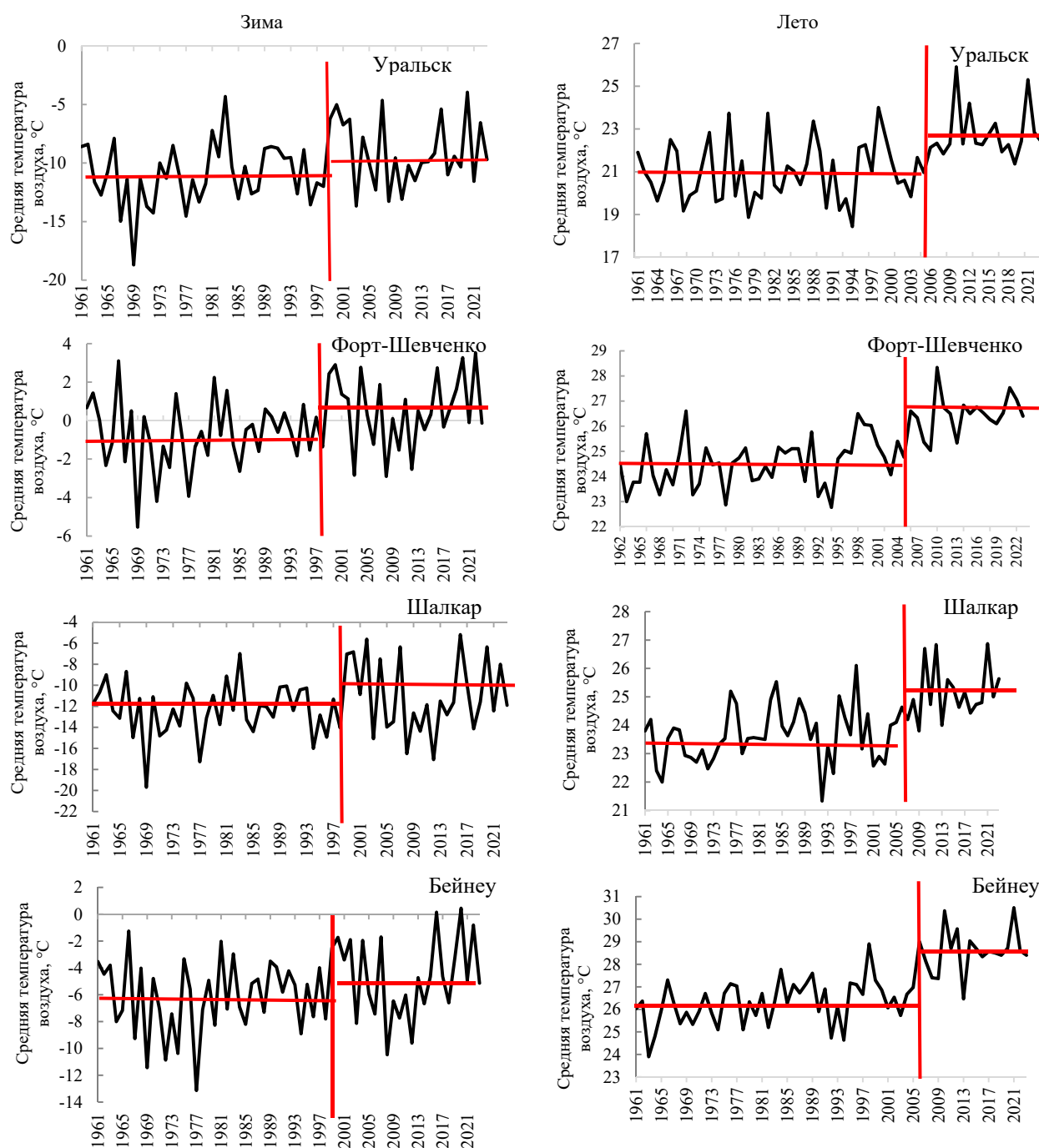


Рисунок 2 – Временной ход среднегодовых температур воздуха с переходом из одного квазистационарного периода в другой

Figure 2 – Time series of average annual air temperatures with transition from one quasi-stationary period to another

На станциях Западного Казахстана зимой год перехода в 1999 году, среднее превышение зимней температуры воздуха составило 1,6 °С, с максимальным значением 2 °С на станциях Уральск и Атырау. Летом превышение составило в среднем за сезон 1,9 °С, а максимально в Атырау и Бейнеу – 2,3 °С. В целом увеличение средней температуры воздуха за сезон 1,6-2,3 °С для исследуемого региона существенно, что может сказываться на водных ресурсах, сельском хозяйстве и экономике. Начиная с 2006 года летом рост температуры составляет около 2 °С по сравнению с прошлым веком.

Режим осадков Западного региона отличается большим разнообразием и в большей степени зависит от нескольких факторов, не только от барико-циркуляционных процессов, но и от орографии местности, подстилающей поверхности, локальных особенностей [21, 22]. Для более детального анализа необходимо провести исследование не годовых сумм осадков, а сезонных. Сезонные изменения могут дать ясное понимание характера климатических изменений. Наиболее показательны оказались зимние и летние осадки. Зимние осадки меньше по сумме в начале текущего столетия, наибольшее количество отмечено в 80-90-х годах прошлого столетия. Летние осадки практически по минимальным значениям схожи в количественном плане с зимними, меньше нормы их выпадает в последние годы. К примеру, станция Форт-Шевченко, несмотря на то, что она расположена на побережье Каспийского моря, претерпевает сокращение выпадения осадков за летний период. Если за базовый период в среднем за год выпадало 146 мм осадков, то за современный – 125 мм. А при рассмотрении летних осадков уменьшение составило от 34,6 до 26,5 мм. На других станциях также наблюдается сокращение летних осадков до 10 мм в сравнении с двумя периодами.

В особенности уменьшение наблюдается в пустынных зонах, менее 20 мм выпадает в среднем за лето, что еще раз подтверждает воздействие выходов теплых воздушных масс с территории Ирана, Каспийских циклонов. Циклоны приносят непродолжительные осадки. Теплый сектор циклонов отличается особо прогретыми воздушными массами [2, 20].

Таким образом, для Западного региона характерны тенденции увеличения средних температур воздуха и уменьшения осадков в летний период с частыми оттепелями в зимнее время.

Важно также рассмотреть, как изменяются температура воздуха и сумма атмосферных осадков зимой и летом, ведь именно вклад одного определенного периода может оказывать существенный корректив в годовом ходе.

В таблице 1 даны результаты расчета статистических характеристик температуры воздуха и осадков по сезонам относительно базового периода. Наибольшее стандартное отклонение (σ) зимней температуры воздуха наблюдается в Бейнеу (2,89 °С) и Уральске (2,79 °С), а наименьшее – в Тущибеке (1,9 °С) и Форт-Шевченко (1,91 °С). Северная часть исследуемого региона в зимний период подвержена вторжениям воздушных масс с северо-запада и севера, в суровые зимние периоды отрог Сибирского антициклона может достигать западной части Казахстана. Прибрежные станции отличаются более незначительными колебаниями температуры зимой в силу влияния самого моря. В среднем σ составляет около 2–2,5 °С, что говорит о заметной, но не экстремальной изменчивости температуры. Стоит отметить, что основной вклад в зимний период вносит декабрь, который в последние десятилетия значительно теплый, снежный покров устанавливается довольно поздно в сравнении с серединой прошлого века.

Летом значения не столь велики: максимум в Уральске (1,36 °С/ 10 лет), минимум в Форт-Шевченко (0,83 °С/10лет) и Шалкаре (0,85 °С/10лет).

Параметр a^2 (скорость изменения температуры) зимой показывает, что динамика изменения температур наиболее выражена в Атырау (0,62°С/10 лет) и Уральске (0,42°С/10лет), что связано с глобальным изменением климата, а на прибрежных станциях может быть связано с влиянием моря. Наименьшее значение наблюдается в Актобе (0,25°С/10лет) и Шалкаре (0,26°С/10лет), где температурные изменения происходят более плавно. Летом максимальные значения a^2 отмечаются в Атырау (0,88°С/10лет) и Бейнеу (0,81°С/10лет), минимальные характерны для Шалкара (0,56°С/10лет).

Рост среднегодовой температуры в холодное полугодие в Западном Казахстане за последние двадцать лет обусловлен ослаблением Сибирского антициклона и частыми вторжениями теплых воздушных масс с юго-запада и со Средиземноморья. Кроме того, выходы теплых воздушных масс с территории Ирана способствуют возникновению оттепелей в Прикаспийском регионе.

Таблица 1 – Статистические характеристики, рассчитанные относительно 1961-1990 гг.
по температуре воздуха и осадкам зимой и летом

Table 1 – Statistical characteristics calculated relative to 1961–1990 for air temperature in winter and summer

№ п/п	Станция	Температура, °С		Осадки, мм		Температура, °С		Осадки, мм	
		Зима				Лето			
		σ	a^2	σ	a^2	σ	a^2	σ	a^2
1	Уральск	2,79	0,42	32,41	-1,8	1,36	0,68	37,93	-13,42
2	Атырау	2,46	0,62	12,95	2,94	0,96	0,88	33,08	-9,38
3	Форт-Шевченко	1,91	0,39	14,07	1,2	0,83	0,72	28,92	-3,82
4	Бейнеу	2,89	0,39	11,78	-0,24	0,89	0,81	32,13	-4,97
5	Тушибек	1,9	0,37	12,82	0,9	0,94	0,66	30,05	-0,44
6	Актобе	2,62	0,25	27,45	0,1	0,91	0,62	40,21	-2,28
7	Шалкар	2,59	0,26	14,87	-0,8	0,85	0,56	26,48	-3,16
Примечание. σ – стандартное отклонение, a^2 – наклон линии тренда (скорость изменения).									

Атмосферные осадки также претерпели некоторые изменения. Так, скорость изменения осадков зимой наибольшая в Атырау и достигает 2,94 мм на каждые 10 лет, в Форт-Шевченко – 1,2 мм/10 лет. Для остальных станций значения близки к нулю, что указывает на более равномерное распределение. Летом наибольшая скорость изменения осадков наблюдается в Уральске (-13,42 мм/10 лет), а также в Атырау (-9,38 мм/10 лет), что отражает резкие перепады количества осадков год от года.

Наибольшее среднеквадратическое отклонение осадков наблюдается в Уральске (32,41 мм) и Актобе (27,45 мм), что связано с активным прохождением циклонов в северной части региона. Минимальные значения в Бейнеу (11,78 мм) и Тушибеке (12,82 мм), где климат более сухой и осадков выпадает мало. Самое высокое стандартное отклонение зафиксировано в Актобе (40,21 мм) и Уральске (37,93 мм), что указывает на большие межгодовые различия летних осадков. Минимальная изменчивость отмечается в Шалкаре (26,48 мм) и Форт-Шевченко (28,92 мм), где осадков мало и их количество меняется не столь резко. В среднем σ летом выше, чем зимой, что объясняется неравномерностью летних ливней и их локальным характером.

Таким образом, север региона более подвержен колебаниям зимних осадков, а южные и прикаспийские районы более устойчивы.

Динамика пространственно-временного распределения метеопараметров показывает изменения климата в исследуемом регионе. Согласно поставленной цели необходима оценка ожидаемых изменений этих параметров для выработки рекомендательных мер.

Таким образом, на основе существующих климатических моделей и их адаптации к местным условиям проведено калибрование будущих значений средней температуры воздуха и количества осадков в регионе. При сравнении модельных данных с фактическими наблюдаемыми выявлены систематические погрешности модельных значений температуры воздуха и атмосферных осадков, которые связаны с недоучетом азональных факторов и региональных особенностей Прикаспийского региона. Вполне естественно, что эти погрешности будут проявляться и в сценарных оценках. Поэтому необходимо корректировать сценарные средние температуры воздуха и вводить как систематическую, так и градиентную поправки, как предложено и реализовано в работе [17]. Также стоит отметить, что в данном исследовании для более точного оценивания периоды на перспективу были поделены по 20-летиям, которые рекомендованы МГЭИК [5, 23].

По результатам моделирования BCC-CSM1 во всех сценариях наблюдается устойчивая положительная аномалия температуры к концу XXI века (таблица 2). При сравнении с базовым периодом 1961–1990 гг. рост более выраженный, чем в 1991–2020 гг.

Таблица 2 – Ожидаемое изменение температуры воздуха, рассчитанное относительно 1961-1990 гг. по сценарию BCC-CSM1 SSP4.5

Table 2 – Expected change in air temperature calculated relative to 1961-1990 according to the BCC-CSM1 SSP4.5

Станция	Январь			Апрель			Июль			Октябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Уральск	3,6	3,9	6,7	0,7	0,3	2,0	5,4	5,7	6,8	4,3	3,8	3,9
Актобе	4,1	4,1	7,2	0,1	0,4	2,4	4,8	5,2	6,2	4,5	3,9	4,5
Шалкар	4,9	5,0	8,1	0,0	0,3	1,9	4,4	5,0	6,1	4,0	3,4	4,4
Форт-Шевченко	1,4	1,5	3,9	-0,4	0,0	0,9	-0,7	0,0	0,6	0,2	-0,7	0,1
Тушибек	2,9	3,2	5,5	0,7	1,3	2,4	3,7	4,2	5,2	3,7	2,7	3,4
Атырау	3,9	4,1	6,6	-0,1	-0,1	1,3	3,7	4,1	5,0	4,0	3,2	3,7
Бейнеу	4,0	4,1	6,7	0,3	0,6	2,0	3,3	3,9	4,8	4,3	3,3	4,3

Примечание. Здесь и в таблице 3: 1 – 2041-2060 гг.; 2 – 2061-2080 гг.; 3 – 2081-2100 гг.

Таблица 3 – Ожидаемое изменение температуры воздуха, рассчитанное относительно 1961-1990 гг. по сценарию BCC-CSM1 SSP8.5

Table 3 – Expected change in air temperature calculated relative to 1961-1990 according to the BCC-CSM1 SSP8.5

Станция	Январь			Апрель			Июль			Октябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Уральск	5,4	7,3	7,8	2,8	3,1	4,7	5,4	5,7	6,8	4,3	3,8	3,9
Актобе	4,1	5,3	6,3	1,8	2,4	3,8	6,9	9,1	9,4	3,5	5,1	5,5
Шалкар	6,2	7,3	8,3	3,0	3,3	4,6	6,0	8,5	9,0	3,9	5,7	6,2
Форт-Шевченко	3,0	3,8	3,8	1,5	2,0	2,7	0,6	2,0	2,8	-0,3	1,3	1,9
Тушибек	4,7	5,2	5,1	3,2	3,6	4,5	4,9	7,0	7,8	3,2	4,8	5,6
Атырау	5,7	6,6	6,7	2,3	2,8	3,9	5,3	7,1	7,8	3,7	5,3	5,8
Бейнеу	0,0	0,5	0,5	3,1	3,1	4,5	7,0	9,2	9,8	0,3	2,2	2,8

Согласно таблицам 2 и 3 в период с 2041 по 2060 г. будет наблюдаться умеренное потепление: +1,5-+3 °C (SSP4.5) и +3-+5 °C (SSP8.5). Это стадия, где климат ещё «отыгрывает инерцию» накопленных выбросов конца XX – начала XXI в. В период 2061–2080 гг. ожидается ускорение темпов роста значений: по SSP4.5 аномалии достигают +4-+5 °C летом, по SSP8.5 – уже +6-+8 °C. В этот период возможно ощутимое усиление климатической положительной обратной связи (таяние снежного/ледового покрова, снижение значений альбедо, усиление испаряемости с водных объектов и пр.). К третьему периоду текущего столетия будут ярко выраженные изменения: +5-+7 °C (SSP4.5) и +8-+10 °C (SSP8.5). Это связано с кумулятивным эффектом парниковых газов и истощением компенсаторных возможностей экосистем.

На рисунках 3 и 4 в качестве примера представлены карты распределения ожидаемого изменения среднегодовой температуры воздуха за период 2081–2100 гг. – для января и июля.

Относительно 1961–1990 к 2081–2100 гг. по сценарию 4.5 ожидается рост температуры: зимой (январь) – на +6-+8 °C в континентальных районах (Уральск, Актобе, Шалкар), меньше – на побережье Каспия (Форт-Шевченко – +3-+4 °C); летом (июль) – на +6-+7 °C; весной и осенью – от +2 до +4 °C. Относительно 1991–2020 гг. рост к 2100 г. в среднем составит +3-+5 °C летом и +2-+3 °C зимой.

Относительно 1961–1990 к 2081–2100 гг. по сценарию 8.5 зимой температуры возрастут на +7-+8 °C (особенно в Актобе, Шалкаре, Атырау), летом – на +9-+10 °C (внутренние районы), осенью – на +5-+6 °C. Относительно 1991–2020 гг. аномалии достигают: летом – +8-+9 °C, зимой – +4-+5 °C, весной/осенью – +3-+4 °C.

Согласно сценарию SSP8.5 предполагается экстремальное потепление с угрозой для водных ресурсов, сельского хозяйства и экосистемы в целом.

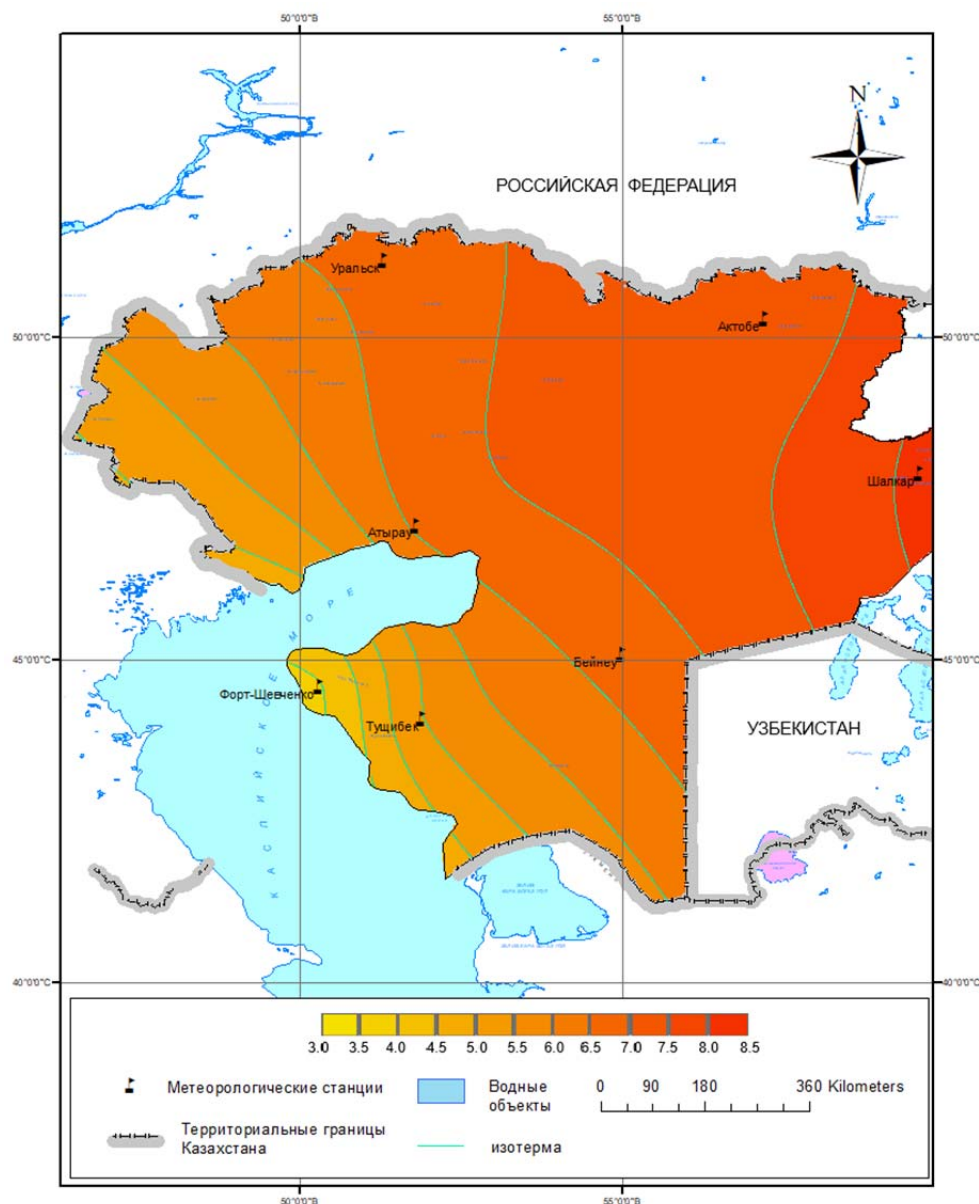


Рисунок 3 – Ожидаемое изменение температуры воздуха Жайык-Каспийского бассейна на 2081–2100 гг. за январь по модели BCC-CSM1, рассчитанное относительно 1961–1990 гг. по сценарию 4.5

Figure 3 – Expected change in air temperature in the Zhayik-Caspian Basin for 2081–2100 for January according to the BCC-CSM1 model, calculated relative to 1961–1990 under scenario 4.5.

В условиях глобального изменения климата одним из ключевых факторов, определяющих гидрометеорологические риски и водохозяйственные условия, является режим атмосферных осадков. Для Западного Казахстана, где наблюдаются как дефицит влаги, так и высокая межгодовая изменчивость температуры воздуха, понимание сезонных изменений осадков является некорректным определением для сельского хозяйства, водных ресурсов и устойчивости экосистем.

В таблице 4 представлен анализ изменений количества атмосферных осадков по данным климатической модели BCC-CSM1-2 для сценария SSP4.5 относительно базового периода 1961–1990 гг. Рассмотрены прогнозные периоды 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 и 2081–2100 гг. Особое внимание уделено сезонным различиям (зима и лето) и региональным особенностям.

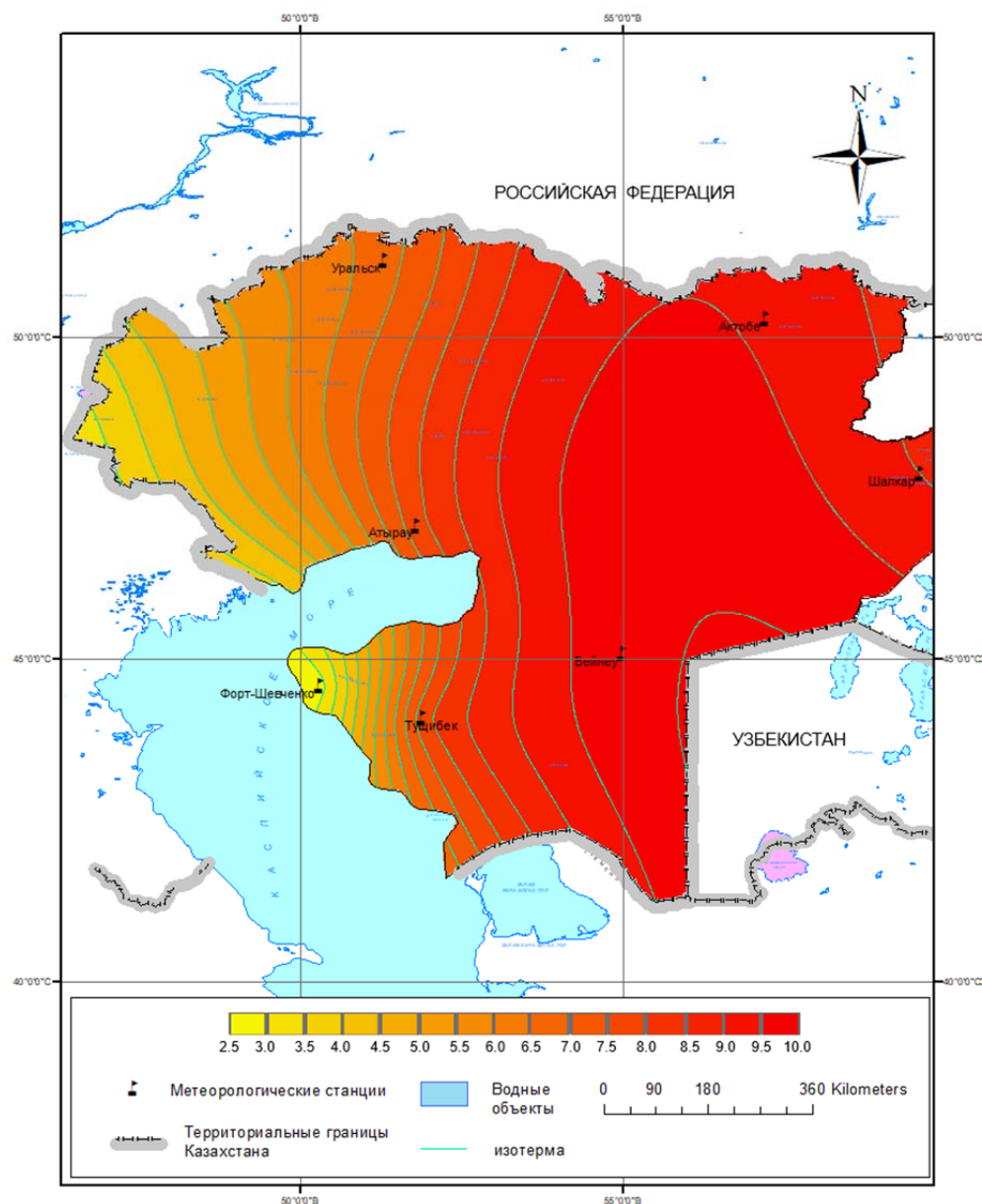


Рисунок 4 – Ожидаемое изменение температуры воздуха Жайык-Каспийского бассейна на 2081-2100 гг. за июль по модели BCC-CSM1, рассчитанное относительно 1961-1990 гг. по сценарию 4.5

Figure 4 – Expected change in air temperature in the Zhayik-Caspian Basin for 2081–2100 in July according to the BCC-CSM1 model, calculated relative to 1961–1990 under scenario 4.5

Зимние осадки. Анализ показывает, что на большей части региона ожидается устойчивое уменьшение зимних осадков. Наибольшие аномалии прогнозируются для северо-западных станций – Актобе и Уральск (53-60 % относительно базового периода). Для побережья Каспия (Форт-Шевченко) и юго-западных районов (Бейнеу, Тушибек) уменьшение менее выражено и колеблется от 2 до 19 %. Минимальные изменения фиксируются для станции Шалкар (1-4 %). Учитывая будущие температуры воздуха за зимний период, ожидается, что осадки будут в большей степени жидкие.

Летние осадки. Прогноз демонстрирует ярко выраженное уменьшение летних осадков, особенно в засушливых регионах. Так, в Бейнеу, Шалкаре и Тушибеке уменьшение достигнет 60-71 %. В Актобе сокращение на 60-69 %, в то время как в Уральске и Атырау – на 21-40 %. В Прикаспийском регионе (Форт-Шевченко) падение составляет 20-33 %. Таким образом, в регионе ожидается сильный дефицит осадков, особенно в засушливых районах.

Таблица 4 – Изменение среднего количества осадков (%) за зиму и лето по модели BCC-CSM1, рассчитанное относительно базового периода 1961-1990 гг. по сценариям SSP4.5

Table 4 – Change in average precipitation (%) for winter and summer according to the BCC-CSM1 model calculated relative to the base period 1961–1990 according to SSP4.5 scenarios

МС	Месяц/Период							
	Зима				Лето			
	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100	2021-2040	2041-2060	2061-2080	2081-2100
Форт-Шевченко	16	13	19	16	20	33	24	29
Бейнеу	14	17	4	18	49	48	56	50
Атырау	11	17	9	10	34	35	26	40
Актобе	57	58	57	54	60	69	64	65
Уральск	55	60	53	55	13	25	21	23
Шалкар	3	4	1	3	67	71	65	68
Тушибек	13	2	11	5	62	67	64	69
<i>Примечание.</i> Оранжевый цвет – дефицит осадков, зеленый – незначительное увлажнение, белый – осадки в норме.								

Обсуждение. Климатические изменения в Западном Казахстане, проявляющиеся в виде повышения температуры и изменения в режиме осадков, требуют комплексных мер. Основная цель – адаптировать регион к новым условиям и смягчить негативные последствия. В первую очередь, необходимо сосредоточиться на управлении водными ресурсами. Это включает модернизацию ирригационных систем, внедрение технологий капельного и спринклерного орошения, а также строительство малых водохранилищ для сбора и сохранения воды. Помимо этого, крайне важно рационально использовать водные ресурсы, вводить нормативы потребления и внедрять технологии опреснения подземных солёных вод. Необходимо адаптировать методы ведения и забора водных ресурсов для сельского хозяйства. Также важно внедрение засухоустойчивых сортов сельскохозяйственных культур и применение современных технологий, таких, как «умное» земледелие и обучать фермеров новым, адаптивным методам ведения сельского хозяйства.

Исполнительным органам местной власти необходимо привлечь финансирование из Международных экологических фондов на проекты по агролесомелиорации и оптимизации нагрузки на территорию Прикаспийской низменности. Необходимо поддерживать научные исследования и проекты для лесовосстановления и борьбе с опустыниванием в данном регионе, где ключевыми мерами будут являться озеленение в крупных городах, посадка деревьев и кустарников в сельской местности, устойчивых к засухе, и проводить меры по рекультивации деградированных земель региона.

Наконец, для успешного внедрения всех этих мер необходимы информационное обеспечение и образование населения и фермерских хозяйств.

Заключение. В ходе исследования проанализированы исторические данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам Прикаспийского региона, проведена статистическая и аналитическая работа, а также выявлены годы перехода одного квазистационарного периода к другому с последующим расчетом роста средней многолетней температуры воздуха.

Согласно оценке получены следующие результаты:

1. По температуре: зимой максимальный рост в Атырау на 0,62 °C/10 лет и в Уральске на 0,42 °C/10 лет, минимальные изменения в Актобе на 0,25 °C/10 лет, а в Шалкаре на 0,26 °C/10 лет. Летом в Атырау максимальная скорость изменения температуры воздуха составила 0,88 °C/10 лет, в Бейнеу – 0,81 °C/10 лет, минимальные изменения в Шалкаре – 0,56 °C/10 лет.

2. По осадкам зафиксировано увеличение количества выпавших осадков зимой на МС Атырау (+2,94 мм/10 лет) и на Форт-Шевченко (+1,2 мм/10 лет). Летом наблюдается уменьшение осадков в Уральске (–13,42 мм/10 лет) и в Атырау (–9,38 мм/10 лет).

Причинами этого могут являться ослабление Сибирского антициклона и частые вторжения тёплых воздушных масс с юго-запада, Средиземноморья и Ирана.

Ожидаемое изменение температуры в Прикаспийском регионе согласно сценариям на долгосрочные периоды:

- 1) 2041–2060 гг.: +1,5–+3 °C (SSP4.5) и +3–+5 °C (SSP8.5).
- 2) 2061–2080 гг.: +4–+5 °C (SSP4.5) и +6–+8 °C (SSP8.5).
- 3) 2081–2100 гг.: +5–+7 °C (SSP4.5) и +8–+10 °C (SSP8.5).

Ожидаемое изменение осадков в Прикаспийском регионе согласно сценариям на долгосрочные периоды:

1. Зимой: сокращение на большей части региона, особенно в Актобе и Уральске (–53-60%); на побережье Каспия и юго-западе – 2-19%; в Шалкаре –1-4%. Осадки будут в основном жидкими.

2. Летом: сильный дефицит в Бейнеу, Шалкаре, Тушибеке (–60-71%), Актобе (–60-69%), Уральске и Атырау (–21-40%), Форт-Шевченко (–20-33%).

Долгосрочные тенденции климата в Западном Казахстане показывают значительный рост температуры и изменения в режиме осадков, что требует комплексного подхода для адаптации региона. В период 2041–2060 гг. будет наблюдаться максимальное уменьшение летних осадков, особенно в засушливых районах. В дальнейшем (2061–2100 гг.) характер изменений стабилизируется, но при этом останется на низком уровне. Региональные особенности (влияние Каспийского моря, континентальность климата) обуславливают различия между станциями. Так, внутренние районы (Шалкар, Бейнеу) демонстрируют наибольшее уменьшение летних осадков, в то время как прикаспийские территории отличаются более сглаженной динамикой.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по теме: «Динамика ледового режима Каспийского моря и реки Жайык в условиях климатических изменений», № ИРН: AP26199145.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ежегодный бюллетень мониторинга состояния и изменения климата Казахстана 2023. – Астана: РГП «Казгидромет», 2023. – 65 с.
- [2] Панин Г. Н., Мамедов Р. М., Митрофанов И. В. Современное состояние Каспийского моря. – М.: Наука, 2005. – 356 с.
- [3] Кожакметов П.Ж., Кожакметова Э.П. Экстремальные метеорологические явления в Казахстане в условиях глобального потепления климата// Гидрометеорология и экология. – 2016. – № 2. – С.7-17.
- [4] Информационный бюллетень о состоянии уровня Каспийского моря. Официальный сайт КАСПКОМ. – [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа – <http://caspcom.com/wp-content/uploads/2025>
- [5] МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р. К. Па-чаури и Л. А. Мейер (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария. – С. 163.
- [6] Eyring V., Bony S., Meehl G. A., et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9, 1937-1958.
- [7] Meehl G. A. et al. (2014). Climate Model Intercomparisons: Preparing for the Next Phase // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 95(9). – С. 77-78.
- [8] Carvalho D., Rafael S., Monteiro A. V., Rodrigues M., Lopes & Rocha I. A. How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming // Sci Rep. – 2022. – No. 12. 11983 p. doi: 10.1038/s41598-022-16264-6.
- [9] IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC.
- [10] Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis IPCC (2021).
- [11] База данных для открытого использования результатов наблюдений на метеорологических станциях РГП «Казгидромет»: https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/
- [12] Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
- [13] Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2008. – 408 с.
- [14] Grubbs, Frank E. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples // Technometrics. – Vol. 11, No. 1.
- [15] Закс Л. Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
- [16] European Centre for Medium-Term Weather Forecasts (ECMWF). (n.d.). Copernicus Climate Data Store (CDS). Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu>
- [17] Наурызбаева Ж. К., Монкаева Г. Е., Жунисова М. А., Рахматулла Н. Е., Еркинова Г. А. Ожидаемые изменения температуры воздуха и осадков по климатической модели BCC-CSM1-2 для бассейна реки Сырдария // География и водные ресурсы. – 2025. – № 1. – С. 109-124. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-1-109-124.11>

- [18] Бакулина Е. А., Угрюмов А. И. Весенние перестройки циркуляции в стратосфере в 1958–2003 г.: Автореф. дис. ... к. г. н. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 12-13.
- [19] 8-е Национальное сообщение и 5-й Двухгодичный доклад Республики Казахстан Рамочной Конвенции ООН об изменении климата. – Астана, 2022. – 491 с.
- [20] Климатический центр Росгидромета, официальный сайт <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/novosti/novosti-partnerov/2411-vmo-publikuet-globalnoe-obnovlenie-naborov-klimaticheskikh-dannykh>
- [21] Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VI. Каспийское море. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – Вып. 1. – 359 с.
- [22] Зонн И. С., Костяной А. Г., Косарев А. Н., Жильцов С. С. Моря России. Энциклопедия. Каспийское море. – М.: Международные отношения, 2015. – 544 с.
- [23] Sillmann J., Kharin V. V., Zwiers F. W., Zhang X., & Bronaugh D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4), 1716-1733.

REFERENCES

- [1] Annual Bulletin on Monitoring the State and Changes in the Climate of Kazakhstan 2023. Astana: RSE Kazhydromet, 2023. 65 p. (in Russ.).
- [2] Panin G. N., Mamedov R. M., Mitrofanov I. V. The Current State of the Caspian Sea. Moscow: Nauka, 2005. 356 p. (in Russ.).
- [3] Kozhakhmetov P. Zh., Kozhakhmetova E. P. Extreme meteorological phenomena in Kazakhstan in the context of global warming// *Hydrometeorology and Ecology*. 2016. No. 2. P. 7-17 (in Russ.).
- [4] Information sheet on the state of the Caspian Sea. Official website of CASPCOM. [Electronic resource]. 2025. Access mode – <http://caspcom.com/wp-content/uploads/2025> (in Russ.).
- [5] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Group of Authors, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. P. 163 (in Russ.).
- [6] Eyring V., Bony S., Meehl G. A., et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geoscientific Model Development*. 9, 1937-1958.
- [7] Meehl G. A. et al. (2014). Climate Model Intercomparisons: Preparing for the Next Phase // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 95(9). P. 77-78.
- [8] Carvalho D., Rafael S., Monteiro A. V., Rodrigues M., Lopes & Rocha I. A. How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming // *Sci Rep*. 2022. No. 12. 11983 p. doi: 10.1038/s41598-022-16264-6
- [9] IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC.
- [10] Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis IPCC (2021).
- [11] Database for open use of observation results at meteorological stations of the Kazhydromet State Agency: https://meteo.kazhydromet.kz/database_meteo/ (in Russ.).
- [12] Draper N. Applied Regression Analysis. Moscow: Statistics, 1973. 392 p. (in Russ.).
- [13] Malinin V. N. Statistical Methods for Analyzing Hydrometeorological Information. St. Petersburg: Published by RSHMU, 2008. 408 p. (in Russ.).
- [14] Grubbs, Frank E. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples // *Technometrics*. Vol. 11, No. 1.
- [15] Zaks L. Statistical Evaluation. Moscow: Statistics, 1976. 598 p. (in Russ.).
- [16] European Centre for Medium-Term Weather Forecasts (ECMWF). (n.d.). Copernicus Climate Data Store (CDS). Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu>
- [17] Naurozbayeva Zh. K., Monkayeva G. E., Zhunisova M. A., Rakhmatulla N. E., Erkinova G. A. Expected changes in air temperature and precipitation according to the BCC-CSM1-2 climate model for the Syrdarya river basin // *Geography and Water Resources*. 2025. No. 1. P. 109-124. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2025-1-109-124.11> (in Russ.).
- [18] Bakulina E. A., Ugryumov A. I. Spring changes in stratospheric circulation in 1958–2003: abstract of dissertation. St. Petersburg, 2009. P. 12-13 (in Russ.).
- [19] 8th National Communication and 5th Biennial Report of the Republic of Kazakhstan to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Astana, 2022. 491 p. (in Russ.).
- [20] Roshydromet Climate Center, official website <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/novosti/novosti-partnerov/2411-vmo-publikuet-globalnoe-obnovlenie-naborov-klimaticheskikh-dannykh> (in Russ.).
- [21] Hydrometeorology and Hydrochemistry of the Seas. Vol. VI. The Caspian Sea. Hydrometeorological Conditions. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992. Issue 1. 359 p. (in Russ.).
- [22] Zonn, I. S., Kostyanoy, A. G., Kosarev, A. N., and Zhiltsov, S. S. Seas of Russia. Encyclopedia. Caspian Sea. Moscow: International Relations, 2015. 544 p. (in Russ.).
- [23] Sillmann J., Kharin V. V., Zwiers F. W., Zhang X., Bronaugh D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(4), 1716-1733.

Ж. К. Наурызбаева^{*1}, Г. Е. Монкаева², М. А. Жунисова³,
Н. Е. Рахматулла⁴, Г. А. Еркинова⁵, Ж. Х. Кенжина⁶

- ¹ *PhD Аймақтық климаттық өзгеруі зертханасының меңгерушісі
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru)
² Аймақтық климаттық өзгеруі зертханасының ғылыми қызметкері
(География және су қауіпсіздігі институты АҚ, Алматы, Қазақстан; gulsara.monkayeva@mail.ru)
³ Аймақтық климаттық өзгеруі зертханасының ғылыми қызметкері
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; makpal80@mail.ru)
⁴ Аймақтық климаттық өзгеруі зертханасының кіші ғылыми қызметкері
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; nurkanat.rakhmatulla@mail.ru)
⁵ Аймақтық климаттық өзгеруі зертханасының жетекші инженері
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; yerkinova.gaukhar@mail.ru)
⁶ Аймақтық климаттық өзгеруі зертханаларының жетекші инженері
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; kenzhina03@mail.ru)

КАСПИЙ АЙМАҒЫНДАҒЫ ВСС-CSM1-2 КЛИМАТТЫҚ МОДЕЛІ АРҚЫЛЫ АУА ТЕМПЕРАТУРАСЫ МЕН ЖАУЫН-ШАШЫННЫҢ ӨЗГЕРІСІНІҢ КЕЛЕШЕККЕ БОЛЖАУЫ

Аннотация. Мақалада ВСС-CSM1-2 климаттық моделі және SSP4.5 және SSP8.5 климаттық сценарийлері арқылы Каспий аймағындағы ауа температурасы мен жауын-шашынның өзгеруі бағаланады. Зерттеу 1961-2024 жылдар аралығын қамтиды. Ауа температурасының айтарлықтай жоғарылауы және жауын-шашын мөлшерінің өзгеруі анықталды. Орташа жылдық температура 1976 жылдан бері байқалған оң ауытқулармен өсуде. Дала және шөл аймақтарында орналасқан станциялар (Түшібек және Бейнеу) 2010 жылдардан бастап ерекше қарқынды өсуді көрсетті. Қытайлық климаттық модельдің нәтижелері ХХІ ғасырдың аяғында SSP4.5 сценарийі бойынша қыста ауа температурасы континенттік аймақтарда +6-+8 °C және жағалауда +3-+4 °C, ал жазда +6-+7 °C жоғарылауы мүмкін екенін көрсетеді. SSP8.5 қатаң сценарийіне сәйкес, ғасырдың соңына қарай температура қыста +7-+8 °C, ал жазда +9-+10 °C жоғарылауы мүмкін. Қыста да, жазда да жауын-шашынның азаюымен, жауын-шашын үлгілерінің өзгеруі де ғасырдың соңына қарай күтілуде. Қысқы жауын-шашынның барынша азаюы облыстың солтүстік-батысында (Ақтөбе мен Оралда 53–60%) күтіледі. Жазда құрғақ аймақтарда (Бейнеу, Шалқар, Түшібек) жауын-шашынның айтарлықтай төмендеуі болжануда, ол 60–71%-ға жетеді, бұл инфрақұрылым мен ауыл шаруашылығына қауіп-қатерді күшейтуі мүмкін. Өңірді осы өзгерістерге бейімдеу үшін кешенді шаралар қажет, соның ішінде сумен жабдықтау жүйелерін жаңғырту, smart егіншілік технологияларын енгізу, агроорман шаруашылығы мен ормандарды қалпына келтіру.

Түйін сөздер: Жайық-Каспий су шаруашылығы бассейні, климаттың өзгеруі, климаттық сценарийлер, ВСС-CSM1-2 модель, ауа температурасы, жауын-шашын.

Zh. K. Naurozbaeva^{*1}, G. Ye. Monkayeva², M. A. Zhunisova³,
N. Ye. Rakhmatulla⁴, G. A. Erkinova⁵, Zh. Kh. Kenzhina⁶

- ¹ *PhD Head of the Regional Climate Change Laboratory
(JSC 'Institute of Geography and Water Security', Almaty, Kazakhstan; naurozbaeva.zhanar@mail.ru)
² Researcher at the Regional Climate Change Laboratory
(JSC 'Institute of Geography and Water Security', Almaty, Kazakhstan; gulsara.monkayeva@mail.ru)
³ Researcher at the Regional Climate Change Laboratory
(Institute of Geography and Water Security, Almaty, Kazakhstan; makpal80@mail.ru)
⁴ Junior Researcher, Regional Climate Change Laboratory
(Institute of Geography and Water Security JSC, Almaty, Kazakhstan; nurkanat.rakhmatulla@mail.ru)
⁵ Lead Engineer, Regional Climate Change Laboratory
(Institute of Geography and Water Security JSC, Almaty, Kazakhstan; yerkinova.gaukhar@mail.ru)
⁶ Lead Engineer, Regional Climate Change Laboratory
(JSC Institute of Geography and Water Security, Almaty, Kazakhstan; kenzhina03@mail.ru)

CHANGES IN AIR TEMPERATURE AND PRECIPITATION IN THE CASPIAN REGION BASED ON THE BCC-CSM1-2 CLIMATE MODEL

Abstract. The article assesses changes in air temperature and atmospheric precipitation in the Caspian region using the BCC-CSM1-2 climate model and the SSP4.5 and SSP8.5 climate scenarios. The study covers the period from 1961 to 2024. Significant increases in air temperature and changes in precipitation patterns have been identified. The average annual temperature has been rising with positive anomalies observed since 1976. Stations located in steppe and desert areas (Tushchebek and Beineu) have recorded a particularly sharp increase since the 2010s. The results of the Chinese climate model show that by the end of the 21st century, under the SSP4.5 scenario, winter air temperatures could increase by +6-+8 °C in continental areas and by +3-+4 °C on the coast, and by +6-+7 °C in summer. Under the severe SSP8.5 scenario, by the end of the century, temperatures may rise by +7-+8 °C in winter and +9-+10 °C in summer. Changes in precipitation patterns are also expected by the end of the century, with a decrease in both winter and summer precipitation. The greatest reduction in winter precipitation is expected in the north-west of the region (53–60% in Aktobe and Uralsk). In summer, a significant decrease in precipitation of up to 60–71% is forecast for arid areas (Beineu, Shalkar, Tushchebek), which may exacerbate risks to infrastructure and agriculture. Comprehensive measures are needed to help the region adapt to these changes, including the modernisation of water supply systems, the introduction of smart farming technologies, agroforestry and forest restoration.

Keywords: Zhayik-Caspian water basin, climate change, climate scenarios, BCC-CSM1-2 model, air temperature, precipitation.