

<https://doi.org/10.55764/2957-9856/2026-1-97-107.9>

MPHTI 39.27.17
УДК 556; 551.583

Ж. К. Наурузбаева*¹, М. А. Жунисова², Н. Е. Рахматулла³

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; makpal80@mail.ru)

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

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЮЖНОГО КАСПИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА УРОВЕНЬ МОРЯ

Аннотация. Приведены результаты исследования влияния климатических изменений и макромасштабных процессов атмосферной циркуляции на уровеньный режим Южного Каспия. На основе анализа данных метеорологических станций Ирана и Туркменистана за 1961–2024 гг. выявлены устойчивые тренды повышения температуры воздуха и трансформации водного баланса региона. Особое внимание уделено корреляционному анализу связи уровня моря с формами циркуляции по классификации Вангенгейма-Гирса и индексом североатлантического колебания (NAO). Установлено, что доминирующим предиктором трансгрессивных фаз уровня моря является западный тип циркуляции (W), тогда как восточный тип (E) выступает ключевым фактором регрессий. Выявлена выраженная сезонная детерминация этих связей с максимумом интенсивности в зимний период. Результаты работы имеют практическую значимость для прогнозирования гидрологических рисков и разработки адаптационных стратегий в прибрежных зонах Ирана и Туркменистана.

Ключевые слова: Каспийское море, Южный Каспий, уровень моря, атмосферная циркуляция, формы Вангенгейма-Гирса, индекс NAO, климатические изменения, водный баланс.

Введение. Каспийское море представляет собой крупнейший на планете замкнутый бассейн, гидрологический режим которого демонстрирует исключительную чувствительность к вариациям глобальной циркуляции атмосферы и долгопериодным изменениям уровня моря. В последние десятилетия в Каспийском регионе фиксируются значительные межгодовые и междесятилетние флуктуации уровня, детерминированные комплексным взаимодействием температурных аномалий, режима атмосферных осадков, интенсивности эвапотранспирации (испарения) и общего водного баланса. Особую актуальность приобретает изучение данных процессов в Южном Каспии, который отличается высокой концентрацией прибрежной инфраструктуры, нефтегазовых объектов, портовых сооружений и уязвимых экосистем.

В рамках исследования предполагается провести анализ многолетних колебаний уровня Каспийского моря, изменения климатических показателей. Особое внимание уделяется изучению влияния общей циркуляции атмосферы на климатические условия региона и уровень моря, выявлению взаимосвязей между атмосферными циркуляционными процессами и колебаниями уровня Каспийского моря, а также оценке роли совокупности климатических и гидрологических факторов в современных и долгосрочных изменениях уровня моря.

Анализ климатических характеристик в южной части Каспийского моря показывает, что в регионе наблюдаются устойчивые тенденции повышения температуры воздуха и изменений режима атмосферных осадков, что способствует увеличению испарения и трансформации водного баланса. Такие изменения оказывают влияние на колебания уровня моря через изменение соотношения между притоком и потерями воды.

Согласно результатам исследования [1], сочетанное влияние глобальных климатических изменений и интенсивной хозяйственной деятельности на территории Ирана провоцирует значимые флуктуации гидрологического режима рек, что непосредственно отражается на приходной части водного баланса и морфометрических характеристиках южного бассейна. Эти

выводы находят подтверждение в материалах профильных международных конференций, где подчеркивается, что физико-химические параметры южной шельфовой зоны, в частности прибрежных районов Северного Ирана, демонстрируют высокую чувствительность к региональной климатической волатильности. Эта изменчивость выступает ключевым фактором, определяющим динамику уровня и специфику гидродинамических процессов в рассматриваемой акватории [2]. Сложность и многофакторность происходящих климато-гидрологических трансформаций обуславливают необходимость углубления межправительственного сотрудничества прикаспийских государств, включая Иран и Туркменистан. В рамках реализации совместных научно-исследовательских программ осуществляются верификация долгосрочных климатических трендов и оценка их последствий для уровня моря. Подобные инициативы направлены на формирование научно обоснованной базы для разработки адаптационных стратегий, минимизирующих экологические и экономические риски в условиях нестабильности гидрологического состояния бассейна [3].

Анализ крупномасштабных атмосферных процессов выявляет их определяющую роль в формировании климатических условий Прикаспийского региона, где динамика циркуляции детерминирует пространственное распределение осадков и температурный режим, непосредственно влияя на составляющие водного баланса акватории [4]. С учетом географической специфики южная часть бассейна, охватывающая побережья Ирана и Туркменистана, характеризуется прогрессирующей аридизацией и интенсивным испарением, что диктует необходимость комплексного изучения метеорологических параметров в тесной корреляции с речным стоком и морской атмосферной циркуляцией [5].

Исследования подтверждают, что экстремальные флуктуации уровня Каспийского моря сопряжены с масштабной перестройкой струйных течений и трансформацией бароклиной структуры атмосферы, модулирующей режим увлажнения региона. В периоды трансгрессии уровня отмечается рост частоты явлений, связанных с южной осцилляцией (ENSO), что интенсифицирует влагонакопление и увеличивает объем региональных осадков. При этом взаимодействие в системе «море–атмосфера» носит двусторонний характер, где изменение размеров водоема потенциально способно трансформировать глобальные циркуляционные процессы [6].

Существенное воздействие на гидроклиматическую изменчивость Ирана, в частности его северных и западных областей, оказывают глобальные океано-атмосферные индексы, такие, как ENSO, AMO, NAO и AO, демонстрирующие статистически значимую связь с периодичностью осадков и засухливых циклов. Особую прогностическую ценность представляют выявленные асинхронные взаимосвязи между индексами циркуляции и климатическими параметрами, которые выражены сильнее синхронных зависимостей. Это позволяет повысить точность моделирования будущих гидрологических изменений в прикаспийской зоне [7]. Синоптический анализ суточных типов атмосферной циркуляции подтверждает, что гидротермический режим Ирана детерминирован характером адвекции воздушных масс: влажные периоды в северных и западных регионах обусловлены циклональной деятельностью восточносредиземноморских и красноморских депрессий, в то время как доминирование субтропических антициклонов инициирует продолжительную аридизацию [8].

В последние десятилетия фиксируется усиление влияния глобальных связей на формирование экстремальных климатических явлений. Анализ комплексных индексов засухи указывает на рост интенсивности и пространственного охвата аридных периодов после 2000 года, что связывается с синергетическим взаимодействием индексов ENSO, NAO и PDO, свидетельствуя о нарастающей климатической нестабильности в Прикаспийском регионе [9]. Разработка специализированных региональных индексов циркуляции, базирующихся на аномалиях температуры поверхности моря и геопотенциальной высоты, позволяет более точно идентифицировать климатические скачки и долгосрочные тренды, обусловленные глобальным потеплением [10]. Несмотря на то, что южное побережье Каспия остается наиболее увлажненной зоной Ирана с максимальными годовыми суммами осадков, здесь также прослеживается устойчивая тенденция к росту температур и трансформации сезонного распределения влаги [11, 12].

Аналогичные деструктивные процессы наблюдаются на территории Туркменистана, где экстремальная континентальность и высокая аридность определяют исключительную уязвимость экосистем к водному дефициту. Прогнозируемое усиление засухливости и сокращение осадков на

фоне повышения температур ведут к учащению засух и интенсификации процессов опустынивания. С учетом того, что устойчивое функционирование агроландшафтов региона критически зависит от искусственного орошения и стока реки Амудария, текущие климатические изменения создают долгосрочные риски для стабильного водообеспечения и экологической безопасности страны [13, 14].

Современные исследования динамики уровня Каспийского моря показывают, что его многолетние колебания формируются под воздействием совокупности климатических и антропогенных факторов. В длительных временных рядах выявлены устойчивые квазициклические компоненты наряду с вековым трендом, что позволяет использовать их при построении прогнозных моделей [15]. Существенную роль играет атмосферная циркуляция: изменения характеристик ветрового режима и их связь с крупномасштабными климатическими индексами отражаются на межгодовой изменчивости уровня моря [16].

Значимым фактором остаются атмосферные осадки в бассейне, демонстрирующие положительную корреляцию с уровнем, хотя в условиях современного потепления устойчивость этих связей ослабевает [17]. Одновременно в южной части бассейна, включая территорию Ирана, отмечается сокращение речного притока, обусловленное преимущественно антропогенным воздействием, что усиливает тенденцию к снижению уровня [18]. В целом колебания уровня рассматриваются как результат многофакторного взаимодействия геологических, климатических и хозяйственных процессов при доминирующей роли климатической изменчивости [19].

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов для оценки и прогнозирования изменений уровня Каспийского моря в условиях современного климатического потепления. Установленные закономерности влияния климатических факторов на уровень моря могут быть использованы при разработке региональных сценариев изменения водного баланса южной части Каспийского бассейна.

Материалы и методы. В работе использован комплексный подход, основанный на анализе климатических данных в целях современной оценки взаимосвязи общей циркуляции атмосферы и колебаний уровня южного сектора Каспийского моря.

Исследование выполнено в 1961-2024 гг., в качестве исторического базового периода принят интервал 1961-1990 гг., а современный климатический базовый период охватывает 1991-2020 гг. [20]. Такой подход позволит выявить долгосрочные изменения и оценить отклонения современных условий от климатической нормы. В анализе были использованы следующие метеорологические элементы: температура воздуха, атмосферные осадки, скорость ветра, относительная влажность воздуха, а также данные об уровне Каспийского моря в южном секторе (таблица 1).

Таблица 1 – Основные сведения о метеорологических станциях Южного Каспия
Table 1 – Basic information about meteorological stations in the Southern Caspian Sea

Метеорологическая станция	Широта	Долгота	Высота МС над ур. моря, м
Огурчинский	39.10	53.10	-26.00
Кара-Богаз-Гол	41.05	52.92	-22.00
Энзели	37.47	49.46	-26.00
Туркменбаши	40.68	53.00	89.00

Исходной информационной базой послужили данные Координационного комитета по гидрометеорологии Каспийского моря. Архивные и фактические данные о погоде были взяты из сводок SYNOP и METAR, которые являются международными стандартными форматами метеорологических наблюдений метеостанций. Эти сводки участвуют в международном обмене данными метеослужб и публикуются в автоматизированных базах данных [21].

Для выявления климатических изменений применялись методы статистического анализа [22], включая расчет средних многолетних значений, аномалий относительно базового периода [23], линейных трендов и коэффициентов вариации [24]. Сравнительный анализ показателей базового и современного периодов позволил оценить пространственно-временные особенности изменения климатических характеристик и их влияние на гидрологический режим. Воздействие общей

циркуляции атмосферы оценивалось на основе анализа повторяемости и сезонной изменчивости основных типов атмосферной циркуляции [25], а также их связи с изменениями температуры, осадков, ветрового режима и уровня Каспийского моря. Для установления взаимосвязей между атмосферными процессами, климатическими параметрами и колебаниями уровня моря использовались корреляционный и регрессионный анализы [26].

Пространственные особенности климатических условий Южного Каспия анализировались с применением картографического метода и обобщения данных по отдельным физико-географическим районам [27]. Полученные результаты позволили комплексно оценить роль климатических и атмосферных факторов в формировании современных изменений уровня Каспийского моря и гидрометеорологических условий прибрежной зоны.

Результаты исследования. Термический режим Ирана определяется взаимодействием географических условий, особенностей рельефа, циркуляции атмосферы и радиационных процессов, что придает ему ярко выраженную неоднородность в пространственном отношении. Зимой в районах вдоль побережья Каспийского моря (в частности, Северо-Иран, провинции Гилан, Мазандаран) отмечаются мягкие зимы с умеренными отрицательными температурами лишь на возвышенностях благодаря влиянию морской акватории, которая смягчает ночные холода и уменьшает амплитуду температурного колебания. В центральных и восточных районах зимой температура опускается значительно ниже нуля, особенно в горных хребтах (Загрос), где могут быть сильный мороз и устойчивый снежный покров. Летом в южных, юго-восточных и центральных низменностях наблюдаются высокие среднесуточные и максимальные температуры, часто свыше 35-40 °С; при этом ночные температуры могут быть ниже, особенно в пустынных областях.

Термический режим Туркменистана характеризуется резко континентальными условиями и большими сезонными амплитудами температуры воздуха, что показывает высокую континентальность климата и существенно влияет на природные и хозяйственные процессы. Средние температуры летом составляют +30 – +35 °С, тогда как зимой – от –2 до +5 °С, с понижением в северных районах.

Проведен анализ долгопериодных колебаний уровня Каспийского моря в контексте динамики крупномасштабных циркуляционных процессов Северного полушария. Установлено, что региональные климатические условия, определяющие водный баланс бассейна, в значительной степени детерминированы доминированием конкретных форм атмосферной циркуляции.

Методологической основой анализа послужила типизация макроциркуляционных процессов по классификации Вангенгейма-Гирса, позволяющая количественно оценить повторяемость западной (W), восточной (E) и меридиональной (C) форм переноса. Для выявления физически обоснованных закономерностей рассчитаны коэффициенты корреляции между индексами циркуляции и вариациями уровня моря за период 1961–2024 гг. (таблица 2). Полученные результаты позволяют верифицировать устойчивость взаимосвязей в системе «атмосферная циркуляция - уровенный режим» и оценить степень отклика морской поверхности на макромасштабные атмосферные перестройки.

На основе корреляционного анализа выявлены статистически значимые закономерности влияния макроциркуляционных процессов по классификации Вангенгейма-Гирса на уровенный режим Южного Каспия. Установлено, что определяющую роль в межгодовой и сезонной изменчивости уровня играют зональная форма циркуляции W и меридиональная E, в то время как вклад типа C остается малозначимым (от -0,10 до 0,21).

Тип W (зональная западная циркуляция) демонстрирует устойчивую положительную корреляцию на всех станциях, $R = 0,28-0,74$. Максимальный отклик уровня наблюдается зимой (до 0,74) и весной ($R = 0,47-0,57$), что подтверждает систематический рост уровня при усилении западного переноса. Восточный тип (E) характеризуется стабильной отрицательной связью ($R = -0,15...-0,67$). Наиболее выраженное снижение уровня при доминировании восточных процессов фиксируется в зимний период (до -0,67), сохраняя значимость летом и весной (до -0,56).

Интенсивность выявленных связей достигает максимума в холодное полугодие, что обусловлено ростом барических градиентов и усилением ветрового воздействия на водную поверхность. Физический механизм зависимости реализуется через динамические процессы: преобладание типа W активизирует западный перенос и штормовую активность, провоцируя нагонные явления, тогда как тип E инициирует устойчивые стгонные процессы. Ослабление корреляции

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции количества дней с формами циркуляции Вангенгейма-Гирса и уровня Южного Каспия за период 1961-2024 гг.

Table 2 – Correlation coefficients between the number of days with Wangenheim-Girs circulation patterns and the South Caspian Sea level for the period 1961–2024

МС	Тип циркуляции	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Энзели	E	-0,67	-0,47	-0,56	-0,37	-0,28
	W	0,74	0,56	0,55	0,40	0,38
	C	0,06	-0,04	0,21	0,01	-0,07
Туркменбаши	E	-0,60	-0,52	-0,41	-0,39	-0,22
	W	0,67	0,48	0,53	0,43	0,32
	C	0,04	0,15	0,02	-0,02	-0,10
Кара-Богаз-Гол	E	-0,58	-0,42	-0,38	-0,40	-0,23
	W	0,66	0,40	0,51	0,44	0,34
	C	0,02	0,11	0,00	-0,02	-0,09
Огурчинский	E	-0,59	-0,51	-0,47	-0,39	-0,15
	W	0,65	0,53	0,57	0,42	0,28
	C	0,12	0,04	0,06	0,02	-0,15

лений в летний период (до $R = 0,28-0,44$ для типа W) объясняется снижением интенсивности западного переноса и возрастающей ролью локальных термических факторов. Таким образом, зональные преобразования атмосферы являются доминирующим предиктором колебаний уровня моря в исследуемом регионе, обеспечивая наиболее тесную связь в зимний сезон. В целом максимальная интенсивность корреляционных связей наблюдается в холодный период года, тогда как в теплое полугодие их величина уменьшается.

Таким образом, зимне-весенний период оказался более интересным для детального анализа. Для побережья со стороны Ирана в качестве примера представлена станция Энзели, а со стороны Туркменистана – Туркменбаши. Анализ временных рядов показывает, что в зимний сезон восточный тип циркуляции (E) в целом демонстрирует обратную связь с межгодовыми колебаниями уровня Каспийского моря. Периоды повышенной повторяемости восточного переноса, особенно в 1960-1970-е и отдельные годы 1990-х, как правило, совпадают с фазами пониженного или стагнирующего уровня моря. Усиление восточного типа циркуляции в зимнее время отражает доминирование континентальных антициклонов, что сопровождается ослаблением циклонической активности, снижением суммарных осадков в бассейне питания Каспия и усилением зимнего испарения над акваторией моря (рисунок 1).

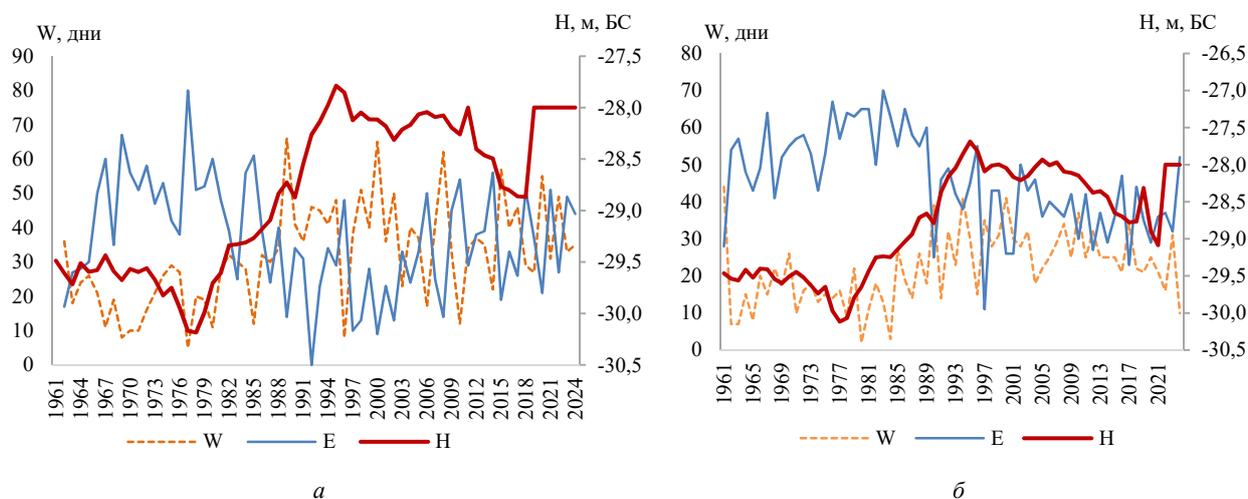


Рисунок 1 – Временной ход типов циркуляции W, E и уровня моря на МС Энзели: а – зимой; б – весной

Figure 1 – Time series of circulation types W, E and Sea level at MS Enzeli: a – in winter; b – in spring

Западный тип циркуляции (W), напротив, характеризуется преимущественно положительной связью с уровнем моря. В зимний период увеличение повторяемости западного переноса совпадает с фазами стабилизации и роста уровня Каспия, особенно заметными с конца 1980-х до начала 2000-х годов. Это указывает на ведущую роль атлантической циклонической активности, обеспечивающей поступление влажных воздушных масс и рост зимних осадков, прежде всего в бассейне Волги, что способствует увеличению притока пресных вод и формированию трансгрессивных фаз уровня моря.

Весной сохраняется отрицательная направленность связи восточного типа циркуляции (E) с уровнем Каспийского моря, однако она проявляется несколько слабее, чем в зимний сезон. Рост повторяемости восточного переноса в отдельные годы сопровождается замедлением весеннего подъема уровня моря или его снижением. Это связано с тем, что преобладание континентальных воздушных масс весной ограничивает количество осадков и может способствовать преждевременному таянию снега без последующего эффективного пополнения речного стока (рисунок 2). Западный тип циркуляции (W) в весенний период также демонстрирует устойчивую положительную связь с уровнем моря. Периоды его усиления, особенно в 1990-е и начале 2000-х годов, совпадают с фазами повышения уровня Каспия. Весной западный перенос способствует развитию активной циклонической деятельности, увеличению осадков и более равномерному формированию половодья, что усиливает приток воды в море.

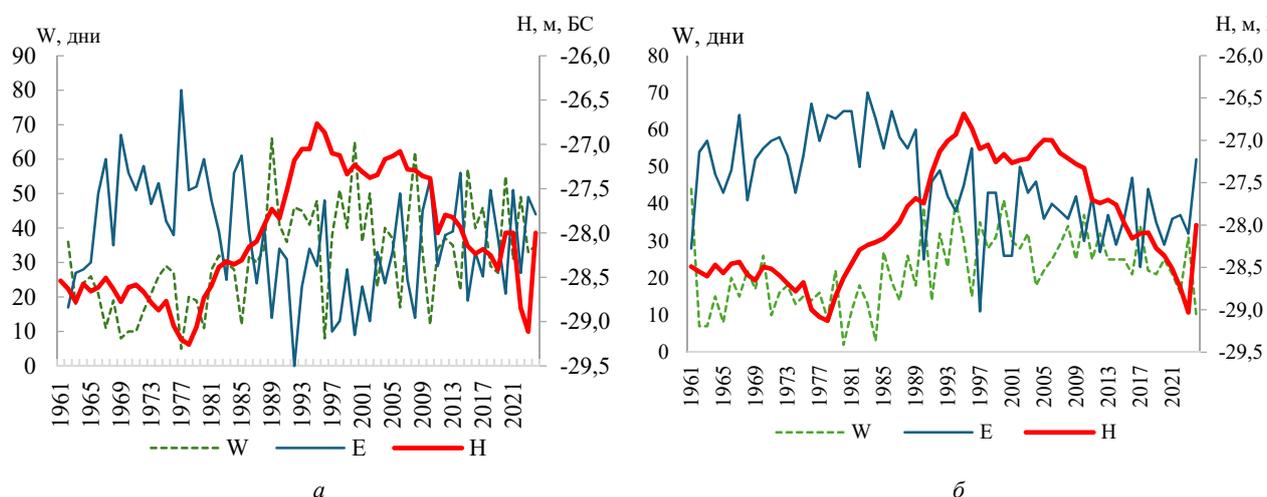


Рисунок 2 – Временной ход типов циркуляции W, E и уровня моря на МС Туркменбаши: а – зимой; б – весной
 Figure 2 – Time series of circulation types W, E and Sea level at Turkmenbashi MS: a – in winter; b – in spring

Следует отметить, что в весенний сезон влияние циркуляционных факторов на уровень моря частично модифицируется гидрологическими процессами в речных бассейнах, однако атмосферная циркуляция по-прежнему остается одним из ключевых регулирующих факторов.

Таким образом, данные метеостанции Энзели подтверждают, что восточный тип циркуляции выступает фактором регрессивных фаз уровня Каспийского моря, тогда как западный тип циркуляции играет ведущую роль в формировании трансгрессивных тенденций, особенно в холодный и переходный периоды года. Зимний сезон характеризуется наибольшей выраженностью этих связей, тогда как весной их проявление несколько сглаживается под воздействием сезонных гидрологических процессов.

Анализ зимних рядов на станции Туркменбаши свидетельствует о наличии устойчивой отрицательной связи между восточным типом циркуляции (E) и уровнем Каспийского моря. Периоды повышенной повторяемости восточного переноса, особенно в 1960–1970-е годы и в отдельные фазы 2000-х, преимущественно соответствуют пониженным уровням моря либо его стагнации. Усиление восточной циркуляции в зимний сезон отражает активизацию континентального антициклогенеза над внутренними районами Евразии, что сопровождается поступлением сухих холодных воздушных масс, сокращением осадков в бассейне питания Каспия и усилением испарения над акваторией моря. В совокупности это формирует дефицит водного баланса и способствует

развитию регрессивных фаз уровня. Западный тип циркуляции демонстрирует положительную направленность связи с уровнем моря. В зимний период рост повторяемости западного переноса, особенно в конце 1980-х – 1990-х годах, совпадает с фазой подъема уровня Каспия. Доминирование западных потоков связано с усилением циклонической деятельности и адвекцией влажных атлантических воздушных масс, что приводит к увеличению количества зимних осадков в бассейне Волги и других притоков. Это способствует росту речного стока и формированию трансгрессивных тенденций уровня моря. В зимний сезон на станции Туркменбаши проявляется наиболее хорошая циркуляционно-уровенная зависимость, что подтверждает ведущую роль холодного периода в формировании годового водного баланса Каспия.

Весной на побережье Туркменистана характер взаимосвязей в целом сохраняется, однако выраженность несколько сглаживается (см. рисунок 2). Восточный тип циркуляции (Е) по-прежнему характеризуется преимущественно отрицательной корреляцией с уровнем моря. В годы усиления восточного переноса отмечается тенденция к стабилизации или снижению уровня, что связано с преобладанием сухих континентальных воздушных масс, ограничением осадков в водосборной области и возможным усилением испарительных процессов. Таким образом, для станции Туркменбаши подтверждается закономерность, согласно которой восточный тип циркуляции выступает атмосферным фактором регрессивных фаз уровня Каспийского моря, тогда как западный тип циркуляции является ключевым механизмом формирования трансгрессивных тенденций. Наиболее выраженная циркуляционно-уровенная связь проявляется в зимний период, тогда как весной она несколько ослабевает под влиянием сезонных гидрологических процессов.

Кроме форм общей циркуляции атмосферы в работе был использован индекс NAO (североатлантическое колебание). В таблице 3 представлены результаты коэффициентов корреляции индекса циркуляции NAO с уровнем моря на всех станциях за период 1961-2024 гг.

Таблица 3 – Коэффициент корреляции индекса циркуляции NAO с уровнем моря за период 1961-2024 гг.

Table 3 – Correlation coefficient between the NAO circulation index and Sea level for the period 1961–2024

МС	Год	Зима	Весна	Лето	Осень
Энзели	0,08	0,41	0,13	-0,22	-0,28
Туркменбаши	0,09	0,29	0,17	-0,10	-0,15
Кара-Богаз-Гол	0,05	0,23	0,19	-0,12	-0,14
Огурченский	0,09	0,34	0,14	-0,12	-0,15

Результаты корреляционного анализа между индексом циркуляции NAO и уровнем Каспийского моря, рассчитанные за период 1961–2024 гг. по данным МС Энзели, Туркменбаши, Кара-Богаз-Гол и Огурченский, показывают выраженную сезонную неоднородность влияния крупномасштабной атмосферной циркуляции.

В годовом масштабе коэффициенты корреляции имеют малые положительные значения ($R = 0,05-0,09$), что указывает на слабую линейную связь между индексом NAO и межгодовой изменчивостью уровня моря. Это подтверждает, что влияние NAO реализуется не напрямую, а через сезонные изменения гидрометеорологических условий. Наиболее значимые положительные корреляции выявлены в зимний период, когда значения R достигают $0,23-0,41$. В этот период усиление западного переноса и изменения температурного режима и осадков способны оказывать косвенное влияние на водный баланс моря. В весенний период коэффициенты корреляции сохраняют положительный знак, однако их величина незначительная. В летний и осенний периоды на всех станциях наблюдается отрицательная корреляция, что связано с доминированием процессов испарения и усилением роли локальных климатических факторов. Полученные результаты подтверждают, что воздействие индекса NAO на уровень Южного Каспия носит сезонно обусловленный характер.

Детальный анализ проведен для зимне-весеннего периода (рисунок 3).

В 1960-1970-е годы преобладали отрицательные фазы NAO и низкие отметки уровня моря, сменившиеся с начала 1980-х годов переходом к положительным фазам и резким подъемом уровня, достигшим максимума в первой половине 1990-х годов. Этот период продемонстрировал

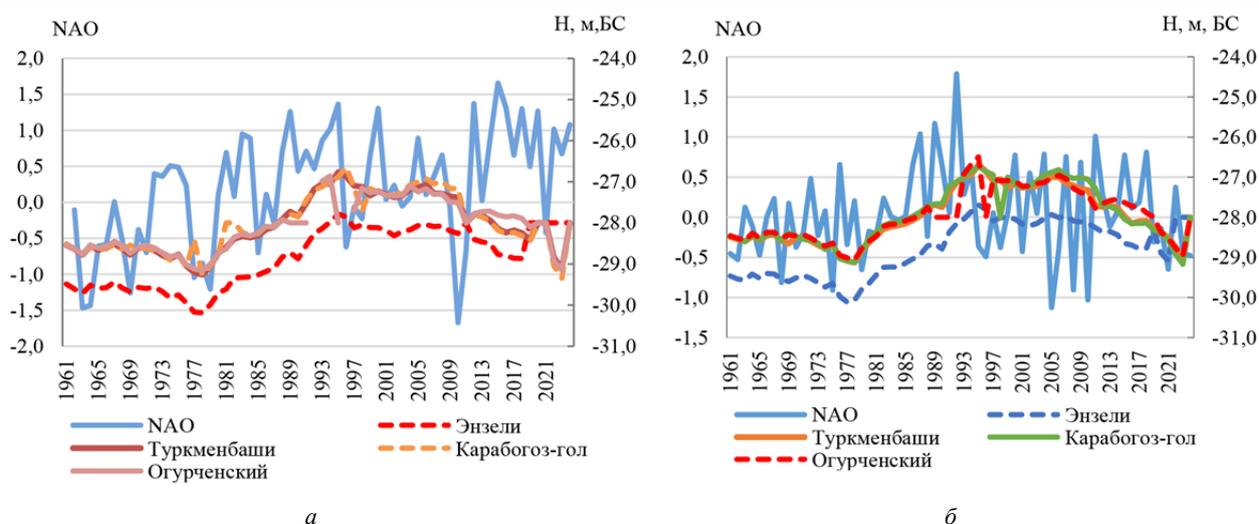


Рисунок 3 – Временной ход индекса NAO и уровня моря: а – зимой; б – весной
 Figure 3 – Time series of the NAO index and Sea level: a – in winter; b – in spring

усиление климатического влияния зимней атмосферной циркуляции на всех станциях. С конца 1990-х годов устойчивый тренд сменился высокой межгодовой изменчивостью, при которой зимние экстремумы NAO отражаются в уровне моря синхронно, но в сглаженном виде.

В весенний период связь между индексом и уровнем моря сохраняется, однако после 1995 года она заметно ослабевает: при высокой повторяемости NAO динамика уровня остается более стабильной. Такая рассинхронизация обусловлена возрастающей ролью региональных факторов – изменением условий речного стока, активизацией испарения и локальным перераспределением тепла и влаги. Таким образом, влияние крупномасштабной циркуляции на уровень Каспийского моря доминирует в зимний период и закономерно нивелируется весной под воздействием местных гидрометеорологических процессов.

Обсуждение. Анализ многолетней динамики гидрометеорологических показателей Южного Каспия подтверждает гипотезу о ведущей роли макроциркуляционных процессов Северного полушария в формировании уровня замкнутого бассейна. Полученные результаты демонстрируют, что западный перенос (тип W) выступает основным фактором повышения уровня моря. Физический механизм данной связи обусловлен активизацией атлантических циклонов, обеспечивающих приток влаги в бассейн Волги, что влияет на рост речного стока и развитие нагонных явлений в южной акватории. А доминирование восточной формы циркуляции (тип E) инициирует устойчивые регрессивные фазы. Усиление континентального антициклоногенеза над Евразией в эти периоды приводит к дефициту осадков и интенсификации испарения, что особенно критично для аридных побережий Туркменистана и Ирана. Стоит отметить, что влияние меридиональной формы (тип C) оказалось статистически мало значимым, что позволяет исключить данный фактор из числа приоритетных предикторов при краткосрочном моделировании. Особый интерес представляет выявленная сезонная асимметрия отклика морской поверхности на атмосферные воздействия. Максимальная теснота связи (R до 0,74) фиксируется в зимний период, что объясняется ростом барических градиентов. В весенне-летний период влияние циркуляционных индексов (включая NAO) нивелируется за счет возрастающей роли локальных факторов: термической трансформации воздушных масс, испарения и специфики формирования речного половодья. Ослабление корреляции с индексом NAO после 1995 года указывает на возможную перестройку региональных климатических механизмов под влиянием глобального потепления, что требует дальнейшего изучения с применением нелинейных моделей.

Заключение. Проведенное исследование климатических условий и уровня режима Южного Каспия позволяет сформулировать следующие выводы:

1. В регионе наблюдается устойчивая тенденция к аридизации и повышению температуры воздуха, что ведет к трансформации структуры водного баланса и усилению испарения в прибрежных зонах Ирана и Туркменистана.

2. Установлена высокая чувствительность уровня Каспийского моря к формам атмосферного переноса. Западный тип (W) является индикатором трансгрессивных тенденций, в то время как восточный тип (E) достоверно коррелирует с фазами снижения уровня.

3. Влияние североатлантического колебания на уровень моря носит сезонный характер и наиболее выражено зимой ($R = 0,23-0,41$), выполняя роль косвенного регулятора через модуляцию путей влагопереноса.

4. Выявленные асинхронные и сезонные связи между макроциркуляционными индексами и уровнем моря могут служить основой для совершенствования региональных гидрологических прогнозов.

С учетом прогрессирующего опустынивания на восточном побережье и уязвимости инфраструктуры на южном результаты работы подчеркивают необходимость углубления межгосударственного мониторинга и разработки совместных адаптационных программ для минимизации социально-экономических рисков в условиях климатической нестабильности.

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] Nouri H., Ghayour H., Masoodian A., Azadi M., Ildoromi A. (2013) The effect of sea surface temperature and 2-m air temperature on precipitation events in the southern coasts of the Caspian Sea // *Mediterranean Journal of Social Sciences*. – No. 1(4). – P. 369-383
- [2] Komijani F., Chegini V., Siadatmousavi S. M. (2019) Seasonal variability of circulation and air–sea interaction in the Caspian Sea based on a high-resolution circulation model // *Journal of Great Lakes Research*. – No. 45(6). – P. 1113-1129. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.09.026>
- [3] Molavi-Arabshahi M., Arpe K., Leroy S. A. G. (2016) Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena // *International Journal of Climatology*. – No. 36(5). – P. 2156-2172. <https://doi.org/10.1002/joc.4483>
- [4] Serykh I. V., Kostianoy A. G. (2020) Links of climate change in the Caspian Sea with the Atlantic and Pacific Oceans // *Russian Meteorology and Hydrology*. – No. 45(6). – P. 430-437. <https://doi.org/10.3103/S1068373920060060>
- [5] Hoseini S. M., Soltanpour M., Zolfaghari M. R. (2024) Climate change impacts on temperature and precipitation over the Caspian Sea // *International Journal of Water Resources Development*. – P. 1-26. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2313050>
- [6] Molavi-Arabshahi M., Arpe K. Interactions between the Caspian Sea size (level) and atmospheric circulation // *International Journal of Climatology*. – 2022. – Vol. 42. – P. 9626-9640. <https://doi.org/10.1002/joc.7852>
- [7] Mohamadrezaei M., Soltani S., Modarres R. Evaluating the effect of ocean-atmospheric indices on drought in Iran // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2020. – Vol. 140. – P. 219-230. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03058-6>
- [8] Ghassabi Z., Fattahi E., Habibi M. Daily Atmospheric Circulation Patterns and Their Influence on Dry/Wet Events in Iran // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – Art. 81. <https://doi.org/10.3390/atmos13010081>
- [9] Rezaei A. Ocean-atmosphere circulation controls on integrated meteorological and agricultural drought over Iran // *Journal of Hydrology*. – 2021. – Vol. 603. – Art. 126928. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126928>
- [10] Ahmadi M., Salimi S., Hosseini S.A., Habibi M., Hosseinzadeh T., Yarmoradi Z. Introduction to New Synoptic Teleconnection Indexing and their relation to other global forcings and the climate of Iran // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2025. – Vol. 156, No. 4. – Art. 226. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05446-7>
- [11] Najafi M. S., Alizadeh O. Climate zones in Iran // *Meteorological Applications*. – 2023. – Vol. 30, No. 5. <https://doi.org/10.1002/met.2147>
- [12] Sharafi S., Mir Karim N. Investigating trend changes of annual mean temperature and precipitation in Iran // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2020. – Vol. 13. – Art. 05695. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05695-y>
- [13] Lioubimtseva E. Climate Change in Turkmenistan // *Handbook of Environmental Chemistry*. Springer, Berlin/ – Heidelberg, 2012. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-1116-4_3
- [14] Nikolai S. O. Climate of Turkmenistan // *Monographiae Biologicae*. – Springer, 2019. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-1116-4_3
- [15] Ермаков В. Б. Многолетние изменения уровня Каспийского моря и современные варианты их прогнозирования // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. – 2023. – Т. 87, № 6. – С. 930-940. <https://doi.org/10.31857/S2587556623060067>
- [16] Safarov E., Bayramov E., Safarov S., et al. Impact of changes in the wind regime on the Caspian sea level fluctuation and its relationship with SOI and NAO // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 36380. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20346-6>
- [17] Холопцев А. В., Наурызбаева Ж. К. Связи межгодовых вариаций среднемесячных уровней Каспия, а также сумм атмосферных осадков в его бассейне и их изменения при современном потеплении климата // *География и водные ресурсы*. – 2024. – № 3. – С. 21-36. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-21-36.23>

- [18] Sharifi A., Baubekova A., Patro E.R., Klöve B., Haghghi A.T. The combined effects of anthropogenic and climate change on river flow alterations in the Southern Caspian Sea region // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, Issue 11. – Art. e31960. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31960>
- [19] Mammadov R. M. Impact of Climate Changes on the Caspian Sea Level // *Journal of Resources and Ecology*. – 2015. – Vol. 6, No. 2. – P. 87-92. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2015.02.004>
- [20] World Meteorological Organization. Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO-No. 1203). – Geneva: WMO.
- [21] Dyakonov G. S., Ibrayev R. A. (2019) Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model // *Ocean Science*. 15(3):527–541. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>
- [22] Wilks D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. – 3rd ed. – Amsterdam: Academic Press, 2011. – P. 676.
- [23] *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021. – P. 2391.
- [24] Kendall M. G. *Rank Correlation Methods*. – London: Griffin, 1975. – P. 202.
- [25] Дзердзеевский Б. Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX столетии. – М.: Гидрометеоздат, 1968. – С. 240.
- [26] Draper N. R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. – 3rd ed. – New York: Wiley, 1998. – P. 736.

REFERENCES

- [1] Nouri H., Ghayour H., Masoodian A., Azadi M., Ildoromi A. (2013) The effect of sea surface temperature and 2-m air temperature on precipitation events in the southern coasts of the Caspian Sea // *Mediterranean Journal of Social Sciences*. No. 1(4). P. 369-383.
- [2] Komijani F., Chegini V., Siadatmousavi S. M. (2019) Seasonal variability of circulation and air–sea interaction in the Caspian Sea based on a high-resolution circulation model // *Journal of Great Lakes Research*. No. 45(6). P. 1113-1129. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.09.026>
- [3] Molavi-Arabshahi M., Arpe K., Leroy S. A. G. (2016) Precipitation and temperature of the southwest Caspian Sea region during the last 55 years: trends and teleconnections with large-scale atmospheric phenomena // *International Journal of Climatology*. No. 36(5). P. 2156-2172. <https://doi.org/10.1002/joc.4483>
- [4] Serykh I. V., Kostianoy A. G. (2020) Links of climate change in the Caspian Sea with the Atlantic and Pacific Oceans // *Russian Meteorology and Hydrology*. No. 45(6). P. 430-437. <https://doi.org/10.3103/S1068373920060060>
- [5] Hoseini S. M., Soltanpour M., Zolfaghari M. R. (2024) Climate change impacts on temperature and precipitation over the Caspian Sea // *International Journal of Water Resources Development*. P. 1-26. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2313050>
- [6] Molavi-Arabshahi M., Arpe K. Interactions between the Caspian Sea size (level) and atmospheric circulation // *International Journal of Climatology*. 2022. Vol. 42. P. 9626-9640. <https://doi.org/10.1002/joc.7852>
- [7] Mohamadrezaei M., Soltani S., Modarres R. Evaluating the effect of ocean-atmospheric indices on drought in Iran // *Theoretical and Applied Climatology*. 2020. Vol. 140. P. 219-230. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03058-6>
- [8] Ghassabi Z., Fattahi E., Habibi M. Daily Atmospheric Circulation Patterns and Their Influence on Dry/Wet Events in Iran // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, No. 1. Art. 81. <https://doi.org/10.3390/atmos13010081>
- [9] Rezaei A. Ocean-atmosphere circulation controls on integrated meteorological and agricultural drought over Iran // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 603. Art. 126928. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126928>
- [10] Ahmadi M., Salimi S., Hosseini S.A., Habibi M., Hosseinzadeh T., Yarmoradi Z. Introduction to New Synoptic Teleconnection Indexing and their relation to other global forcings and the climate of Iran // *Theoretical and Applied Climatology*. 2025. Vol. 156, No. 4. Art. 226. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05446-7>
- [11] Najafi M. S., Alizadeh O. Climate zones in Iran // *Meteorological Applications*. 2023. Vol. 30, No. 5. <https://doi.org/10.1002/met.2147>
- [12] Sharafi S., Mir Karim N. Investigating trend changes of annual mean temperature and precipitation in Iran // *Arabian Journal of Geosciences*. 2020. Vol. 13. Art. 05695. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05695-y>
- [13] Lioubimtseva E. Climate Change in Turkmenistan // *Handbook of Environmental Chemistry*. Springer, Berlin. Heidelberg, 2012. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-1116-4_3
- [14] Nikolai S. O. Climate of Turkmenistan // *Monographiae Biologicae*. Springer, 2019. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-1116-4_3
- [15] Ermakov V. B. Long-term changes in the level of the Caspian Sea and modern methods of forecasting them // *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geography series*. 2023. Vol. 87, No. 6. P. 930-940. [https://doi.org/10.31857/\(in Russ.\)](https://doi.org/10.31857/(in Russ.))
- [16] Safarov E., Bayramov E., Safarov S., et al. Impact of changes in the wind regime on the Caspian sea level fluctuation and its relationship with SOI and NAO // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 36380. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20346-6>
- [17] Kholoptsev A. V., Naurozbaeva Zh. K. Links between interannual variations in average monthly levels of the Caspian Sea, as well as atmospheric precipitation totals in its basin and their changes under current climate warming // *Geography and Water Resources*. 2024. No. 3. P. 21-36. <https://doi.org/10.55764/2957-9856/2024-3-21-36.23> (in Russ.).
- [18] Sharifi A., Baubekova A., Patro E. R., Klöve B., Haghghi A. T. The combined effects of anthropogenic and climate change on river flow alterations in the Southern Caspian Sea region // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Issue 11. Art. e31960. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31960>
- [19] Mammadov R. M. Impact of Climate Changes on the Caspian Sea Level // *Journal of Resources and Ecology*. 2015. Vol. 6, No. 2. P. 87-92. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2015.02.004>
- [20] World Meteorological Organization. Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO-No. 1203). Geneva: WMO.

- [21] Dyakonov G. S., Ibrayev R. A. (2019) Long-term evolution of Caspian Sea thermohaline properties reconstructed in an eddy-resolving ocean general circulation model // *Ocean Science*. 15(3):527–541. <https://doi.org/10.5194/os-15-527-2019>
- [22] Wilks D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2011. P. 676.
- [23] *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 2391.
- [24] Kendall M. G. *Rank Correlation Methods*. London: Griffin, 1975. P. 202.
- [25] Dzerzhevsky B. L. *Circulation Mechanisms in the Atmosphere of the Northern Hemisphere in the 20th Century*. Moscow: Hydrometeoizdat, 1968. P. 240 (in Russ.).
- [26] Draper N. R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. 3rd ed. New York: Wiley, 1998. P. 736.

Ж. К. Наурызбаева^{*1}, М. А. Жунисова², Н. Е. Рахматулла³

¹ PhD, Аймақтық климаттық өзгерістер зертханасының меңгерушісі
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; naurozbaeva.zhanar@mail.ru)

² Аймақтық климаттық өзгерістер зертханасының ғылыми қызметкері
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; makpal80@mail.ru)

³ Аймақтық климаттық өзгерістер зертханасының кіші ғылыми қызметкері
(«География және су қауіпсіздігі институты» АҚ, Алматы, Қазақстан; nurkanat.rakhmatulla@mail.ru)

ОҢТҮСТІК КАСПИЙДІҢ КЛИМАТТЫҚ ӨЗГЕРІСТЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ТЕҢІЗ ДЕҢГЕЙІНЕ ӘСЕРІ

Аннотация. Мақалада климаттық өзгерістер мен атмосфералық айналымның макро масштабты процестерінің Оңтүстік Каспийдің деңгейлік режиміне әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. 1961–2024 жылдар кезеңінде Иран мен Түрікменстанның метеорологиялық станцияларының деректерін талдау негізінде ауа температурасының жоғарылауының және аймақтың су балансының өзгеруінің тұрақты тенденциялары анықталды. Вангенгейм-Гирс классификациясы және Солтүстік Атлантикалық тербеліс индексі (NAO) бойынша теңіз деңгейінің айналым формаларымен байланысын корреляциялық талдауға ерекше назар аударылады. Теңіз деңгейінің трансгрессивті фазаларының басым болжаушысы Батыс айналым түрі (W), ал Шығыс түрі (E) регрессияның негізгі факторы болып табылады. Бұл байланыстардың айқын маусымдық детерминациясы қыста максималды қарқындылықпен анықталды. Жұмыс нәтижелері Иран мен Түрікменстанның жағалау аймақтарында гидрологиялық тәуекелдерді болжау және бейімделу стратегияларын әзірлеу үшін практикалық маңызы бар.

Түйін сөздер: Каспий теңізі, Оңтүстік Каспий, теңіз деңгейі, атмосфералық айналым, Вангенгейм-Гирс формалары, NAO индексі, климаттың өзгеруі, су балансы.

Zh. K. Naurozbaeva^{*1}, M. A. Zhunissova², N. Ye. Rakhmatulla³

¹ PhD, Head of the Regional Climate Change Laboratory
(JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; naurozbaeva.zhanar@mail.ru)

² Researcher of the Regional Climate Change Laboratory
(JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; makpal80@mail.ru)

³ Junior Researcher, Regional Climate Change Laboratory
(JSC «Institute of Geography and Water Security», Almaty, Kazakhstan; nurkanat.rakhmatulla@mail.ru)

CLIMATE CHANGE IN THE SOUTHERN CASPIAN SEA AND ITS IMPACT ON SEA LEVEL

Abstract. The article presents the results of a study of the impact of climate change and large-scale atmospheric circulation processes on the level regime of the southern Caspian Sea. Based on an analysis of data from meteorological stations in Iran and Turkmenistan for the period 1961–2024, stable trends in air temperature increase and water balance transformation in the region have been identified. Particular attention is paid to the correlation analysis of the relationship between sea level and circulation patterns according to the Wangenheim-Girs classification and the North Atlantic Oscillation (NAO) index. It has been established that the dominant predictor of transgressive sea level phases is the western circulation type (W), while the eastern type (E) is a key factor in regressions. A pronounced seasonal determination of these relationships has been identified, with maximum intensity in the winter period. The results of the study are of practical importance for forecasting hydrological risks and developing adaptation strategies in the coastal areas of Iran and Turkmenistan.

Keywords: Caspian Sea, Southern Caspian, sea level, atmospheric circulation, Wangenheim-Girs forms, NAO index, climate change, water balance.