

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОД СУШИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

УДК 556.5, 551.583, 551.582

ВЛИЯНИЕ НА ЭВОЛЮЦИЮ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕЖИМА ВЕТРА НАД ЕГО РЕГИОНОМ В 1948–2017 гг.¹

© 2020 г. Т. Ю. Выручалкина^a, Н. А. Дианский^{b, c, d, *}, В. В. Фомин^c

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

^cГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, 119034 Россия

^dИнститут вычислительной математики РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: nikolay.diansky@gmail.com

Поступила в редакцию 22.08.2018 г.

После доработки 17.09.2018 г.

Принята к публикации 18.10.2018 г.

По данным атмосферных реанализов NCEP/NCAR за 1948–2017 гг. (R-1) и NCEP/DOE за 1979–2017 гг. (R-2) установлено, что изменения уровня Каспийского моря тесно связаны с многолетними изменениями в поле приповерхностного ветра в регионе моря в результате перестройки атмосферной циркуляции над Евразией. Показано, что основное значение в изменениях испарения над Каспийским морем имеют ветры восточного и северного румбов. В периоды падения уровня Каспийского моря (1948–1976 и 1996–2017 гг.) преобладают восточные ветры, которые приносят в акваторию Каспийского моря сухой и теплый воздух из Средней Азии и способствуют тем самым повышению интенсивности испарения вод Каспийского моря. В период роста уровня Каспийского моря (1977–1995 гг.) доминируют северные ветры, что приводит к уменьшению интенсивности испарения. Выполненные расчеты испарения над акваторией Каспийского моря по данным реанализов R-1 и R-2 полностью подтверждают эти выводы. Показана тесная связь испарения и хода уровня Каспийского моря. Корреляции между ненормированными инкрементами испарения и уровнем Каспийского моря составляют -0.86 и -0.75 по R-1 и R-2 соответственно. Более того, по данным уточненного реанализа R-2, вклад испарения в современное понижение уровня Каспийского моря больше, чем по данным R-1, поскольку заток в акваторию Каспийского моря воздушных масс из соседнего засушливого региона Средней Азии, по данным R-2, в последнее десятилетие более интенсивен.

Ключевые слова: Каспийское море, испарение, уровень моря, скорость ветра, направление ветра.

DOI: 10.31857/S0321059620020194

Для развития прикаспийского региона важнейшая прикладная и фундаментальная задача — достоверный прогноз уровня Каспийского моря (КМ). Решение этой задачи невозможно без объективного описания и диагноза фундаментальных причин изменения водного баланса моря. В этом направлении выполнено большое количество работ [1–3, 5, 6, 13–15, 17, 18]. Из этого ряда можно особо отметить монографию [3], в которой собраны наиболее значимые работы последних лет по этой теме. Особенное внимание уделено изменениям речного притока к морю, температуры воздуха и осадков над акваторией КМ, а также и другим характеристикам: облачности, снежного и ледяного покрова и др.

За период инструментальных наблюдений в колебаниях уровня КМ неоднократно отмечались периоды его спада и подъема, обусловленные сочетанием климатических и антропогенных факторов. При этом повышение уровня КМ на 2.4 м в 1977–1995 гг. было не самым экстремальным, но самым продолжительным за весь период инструментальных наблюдений. Аналогичные изменения уровня наблюдались как в XIX в., так и в начале XX в. В 1862–1869 и 1873–1878 гг. повышение уровня моря составило соответственно ~ 1.0 и 0.6 м, а с 1914 по 1917 г. и с 1926 по 1929 г. 0.5 – 0.6 м. С 1996 г. по настоящее время отмечается тенденция к падению уровня КМ, к 2017 г. он понизился до абсолютной отметки -28.0 м БС. По данным [19], климатообразующие изменения уровня КМ в XX в. происходили в пределах от -25.0 до -28.0 м БС. В отсутствие водохозяйственной

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 17-17-01295).

деятельности на территории бассейна КМ к концу XX в. его уровень достиг бы отметок на ~1.5 м выше наблюдаемых, что, однако, значительно меньше изменения уровня за счет климатических факторов [19].

В [10, 14, 16] показано, что на изменения климата на основной стокоформирующей части водосбора КМ существенное влияние оказывает изменение климата Северной Атлантики, а колебания уровня КМ теснее всего связаны с изменением количества атмосферных осадков, выпавших в верховьях Волги и Камы за предшествующий год, и двухлетними суммами осадков за текущий и предшествующий ему год, осредненными по указанной области. Так, в 1978–1995 гг. циклоническая деятельность в Атлантико-Европейском секторе способствовало росту увлажненности в пределах водосборного бассейна КМ.

Объем стока рек и испарение — наиболее значимые слагаемые водного баланса моря. При этом большинство работ, посвященных изучению изменения уровня КМ, касались именно влиянию речного стока (например, [2, 5, 15, 18]). Однако изменения интенсивности испарения с его поверхности — даже более важная причина изменения уровня КМ, поскольку именно испарение компенсирует не только речной сток, но и осадки над акваторией КМ [3, 15, 19]. Во многом оно определяло дефицит водного баланса с 1880-х гг. до 1977 г. и падение уровня КМ. По данным [3, 4, 13], с начала XX в. до 1940-х гг. отмечалась устойчивая тенденция повышения испарения с водной поверхности КМ. Наиболее интенсивное испарение отмечалось в 1930-е гг. (в среднем 1004 мм) и в первую половину 1970-х гг. (1039 мм) [3]. Практически на всех береговых станциях, расположенных в различных частях КМ, в многолетнем ходе годовых и сезонных величин испарения до второй половины 1990-х гг. прослеживаются статистически значимые тенденции спада [4]. В 1975–1995 гг. интенсивность процессов испарения была значительно ниже, чем в предшествующие годы, и не превышала нормы (в среднем ~919 мм). В 1996–2010 гг. интенсивность процессов испарения возросла, составляя в среднем 966 мм в год [3]. По данным за 1960–1990 гг. в [4, 12] показано, что между направленными изменениями интенсивности испарения с водной поверхности и среднегодовыми значениями скорости ветра существует тесная причинно-следственная связь. Уменьшение испарения с поверхности КМ в 1975–1995 гг. связано с изменением скорости ветра.

Испарение напрямую зависит от скорости приповерхностного ветра, влажности и температуры приповерхностных воздушных масс [12, 13]. При этом скорость и направление приповерхностного ветра — определяющие для изменчиво-

сти испарения с КМ. Скорость ветра влияет на интенсивность испарения, а от направления притока воздушных масс на акваторию КМ зависят их температура и влажность, поскольку они могут приходиться как из засушливой и теплой Средней Азии, так и с северных — более холодных и влажных прикаспийских областей. Направление притока движения воздушных масс также влияет и на количество осадков над акваторией КМ. В настоящей работе на основе анализа климатических данных современных реанализов общей циркуляции атмосферы изучается влияние изменений структуры атмосферной циркуляции над акваторией КМ, которые через фактор испарения напрямую влияют на временной ход его уровня.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования использовались имеющиеся в свободном доступе данные атмосферных реанализов National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) — Reanalysis-1 (R-1) за период с 1948 по 2017 г. [21] и National Centers for Environmental Prediction/the Department of Energy (NCEP/DOE) — Reanalysis-2 (R-2) за более короткий период — 1979–2017 гг. [22] как более точный. Относительно небольшая надежность данных о потоках тепла и влаги для суши и океана у земной поверхности заставили разработчиков архива R-1 [21] внести уточнения в рассчитываемые параметры с привлечением спутниковой информации и разработать на этой основе архив R-2 [22]. Данные R-1 и R-2 включают в себя в том числе глобальные поля скорости ветра, температуры, влажности и других характеристик атмосферной циркуляции с 6-часовым интервалом по времени. Приповерхностные характеристики, включая поля ветра на уровне 10 м, давления на уровне моря, потоков тепла и влаги и др., имеют пространственное разрешение 1.875° по широте и долготе, а на уровне ≥ 1000 мбар — 2.5° .

Вопрос о точности характеристик ветра принципиально важен, поскольку на обнаруженных климатических изменениях в полях ветра получены главные результаты. К сожалению, архив R-2 имеет меньшую продолжительность. Поэтому используем два реанализа для их сопоставления в совпадающие периоды времени.

Кроме данных о ветре, использованы поля давления на уровне моря из архива R-1 для анализа общей структуры изменений циркуляции атмосферы и поля влажности из архивов R-1 и R-2 — для расчета потока испарения с поверхности КМ.

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОЛЕ ВЕТРА НАД РЕГИОНОМ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С 1948 ПО 2017 г.

Авторами статьи обнаружено, что в эволюции ветра над регионом КМ во временных изменениях модуля скорости и доминирующих направлений ветра выделяются периоды, аналогичные периодам падения (1948–1976 и 1996–2017 гг.) и роста (1977–1995 гг.) уровня КМ, — I, II и III. На рис. 1 показаны среднегодовые поля ветра на высоте 10 м для этих периодов, полученные по R-1 и R-2.

По данным R-1, в периоды I и III, когда наблюдалось падение уровня КМ, средние климатические структуры атмосферной циркуляции схожи между собой и характеризуются затокном на акваторию КМ воздушных масс из прилегающего к морю засушливого региона Средней Азии (рис. 1). В период II — роста уровня КМ — северо-восточные ветры над Средней Азией ослабевают. Ослабевают они также над самим КМ и меняют направление на северное. Данные R-2, имеющиеся, к сожалению, только за периоды II и III, вполне согласованы с результатами осреднения по данным R-1. Более того, для периода III заток на акваторию КМ воздушных масс из прилегающего к морю засушливого региона Средней Азии усиливается. Становится очевидным, что изменения уровня КМ согласуются с изменениями региональной атмосферной циркуляции, которые способствовали усилению испарения с акватории в периоды падения уровня КМ и, наоборот, уменьшению испарения в период его роста. Таким образом, региональные изменения атмосферной циркуляции также способствовали эволюции уровня КМ, как и глобальные процессы, отвечающие за изменение речного стока в КМ.

Рис. 1 иллюстрирует среднеклиматические изменения пространственной структуры ветра над регионом КМ в периоды роста и падения уровня моря. Покажем, как эти состояния пространственной структуры ветра отражаются на межгодовой изменчивости уровня моря. Так как достаточная длина ряда характеристик ветра имеется пока только для архива R-1, этот анализ преимущественно сделан только для него. Архив R-2, благодаря привлечению разработчиками спутниковой информации, содержит уточнения по глобальным полям скорости западного и южного ветра как у поверхности, так и на высотах. Авторами статьи проверено, что в расчетах характеристик годовой и месячной дискретности характеристик ветра по данным R-1 и R-2 существенные расхождения отсутствуют. Выше представлена хорошая согласованность среднеклиматических полей архивов R-1 и R-2 для периодов II и III, поэтому с большой долей уверенности можно предполагать, что данные архива R-1 отражают общую

изменчивость приповерхностной региональной циркуляции атмосферы и для периода I. На рис. 2 приведены среднегодовые повторяемости направления и скорости осредненного над акваторией КМ ветра по четырем основным румбам: В, С, З, Ю — для периода с 1948 по 2017 г. Осреднение над акваторией КМ проводилось с учетом маски вода/суша из реанализа R-1, одинаковой для R-1 и R-2. Рис. 2 показывает, что в целом за все периоды исследований над акваторией КМ на высоте 10 м преобладали ветры восточного румба с повторяемостью 30–50% и средней скоростью от 3 до 5 м/с. При этом в 1975–1976 гг. произошла довольно резкая смена климатической циркуляции воздуха над КМ, особенно заметная именно для восточных ветров. Их повторяемость стала $\leq 30\%$, а скорости уменьшились до ~ 3.5 м/с. При этом повторяемость северных ветров существенно возросла с 30 до $\geq 40\%$, хотя среднегодовые скорости остались приблизительно такие же.

Обратная картина наблюдается для ветров западного румба, когда повторяемость в период II увеличивается с 10–20 до 30–40%, а скорость возрастает в среднем с 3 до 4 м/с. Все это хорошо согласуется с рис. 1.

Таким образом рис. 1 и 2 подтверждают то, что периоды I и III имеют приблизительно одинаковые среднеклиматические состояния, значительно отличающиеся от таковых периода II.

Картина изменчивости ветра над КМ подтверждается и данными его прямых измерений. Так, в работах [7, 13] для периода 1960–1980-х гг. выявлена устойчивая статистически значимая тенденция уменьшения модуля скорости приземных ветров на береговых и островных станциях на КМ, а также на водосборах рек Волги и Урал. При этом указанная закономерность не характерна для западного побережья центрального Каспия, что, по-видимому, связано с локальными особенностями атмосферной циркуляции. В [12] показано, что, по данным станций восточного побережья центрального Каспия, в 1960–1990 гг. наибольших значений достигают отрицательные линейные тренды характеристик ветров восточного румба зимой и осенью. Указанная тенденция характерна не только для региона КМ. На ЕЧР в 1960–1980-е гг. наблюдалось статистически значимое снижение скорости приземного ветра и частоты ветров зональных румбов [7, 9, 11]. В Арктике в 1953–1990 гг. скорость ветра по большинству станций уменьшилась на ~ 1 м/с [8].

На рис. 3 представлена динамика среднегодовой средних по акватории КМ повторяемости и скорости ветра для восточного и северного румбов. Корреляция между скоростью и повторяемостью ветра как за год, так и за месяц с текущим уровнем моря мала, и, как правило, ≤ 0.3 (рис. 3а, 3б). Однако, если воспользоваться таким инструмен-

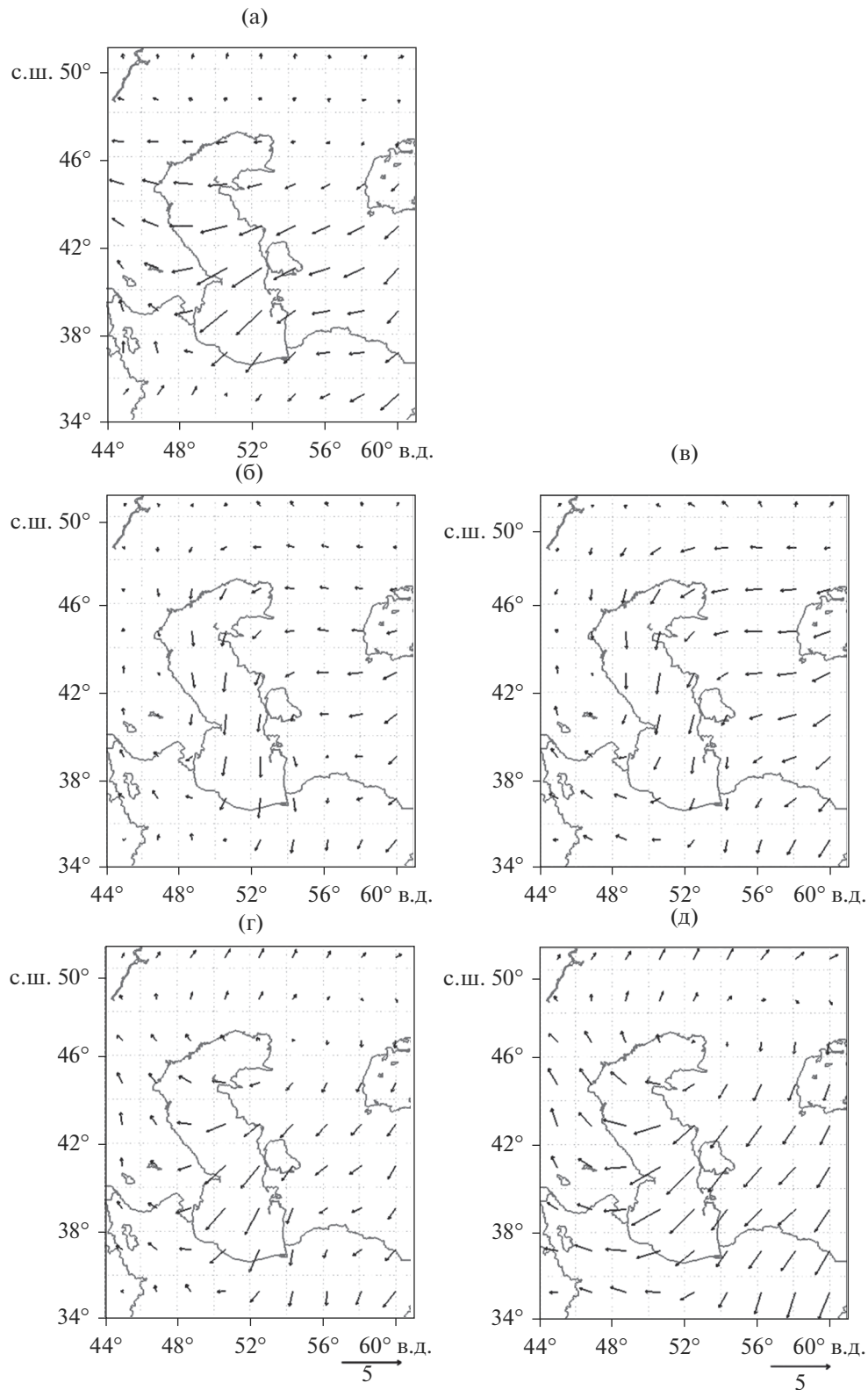


Рис. 1. Эволюция ветрового режима над акваторией Каспийского моря на высоте 10 м по данным реанализов NCEP/NCAR (а, б, г) и NCEP/DOE (в, д). Поля приповерхностного ветра (м/с) осреднены за периоды 1948–1975 (а), 1976–1995 (б, в) и 1996–2017 гг. (г, д). Масштаб величин скорости ветра показан под рисунками.

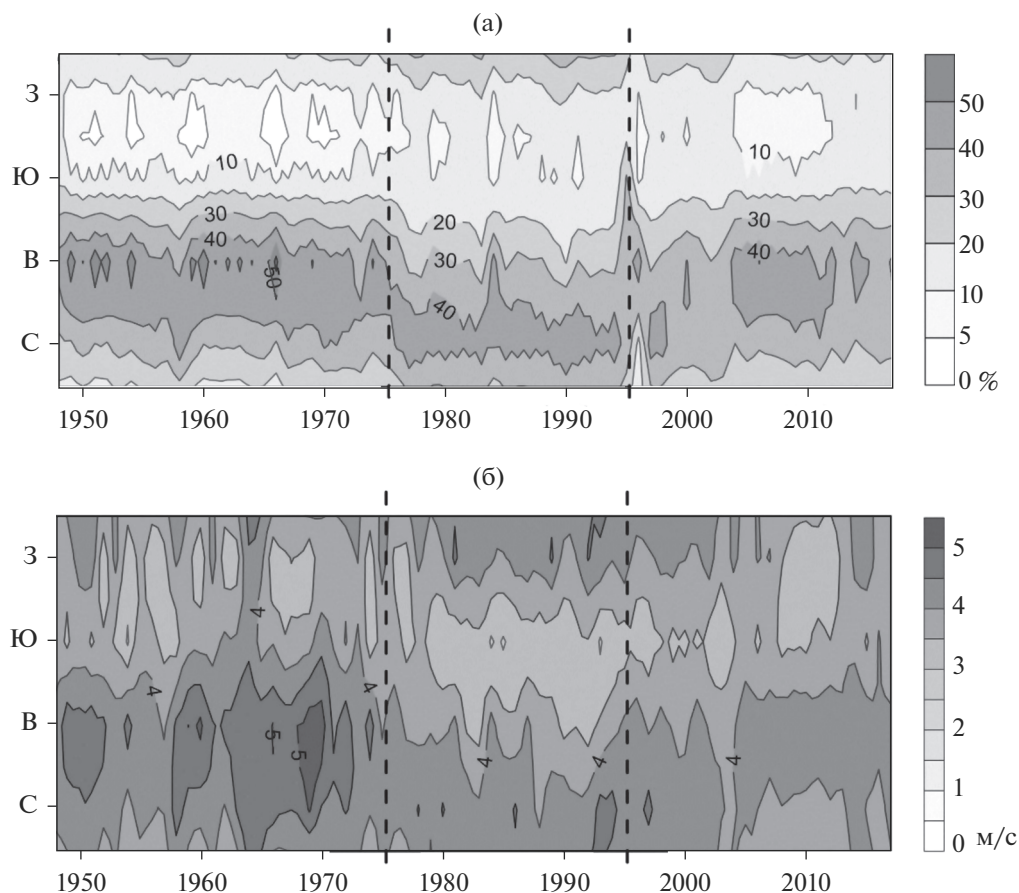


Рис. 2. Временная изменчивость среднегодовой повторяемости (%) (а) и скорости (м/с) (б) ветра, осредненного над акваторией КМ, по румбам. Пунктирными линия обозначены периоды 1948–1975, 1976–1995 и 1996–2017 гг.

тариом, применяемым в гидрологии, как расчет интегрально нормированных значений (так называемый инкремент), то становится очевидным, что изменение повторяемости ветра восточного и северного румбов над акваторией Каспия, скорости ветра восточного румба имеют тесную связь с колебаниями уровня КМ. Инкрементирование некой равномерно распределенной дискретной по времени величины — это операция суммирования этой величины по интервалу времени ее задания согласно формуле:

$$\text{Incr}_i = \text{Incr}_{i-1} + \frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}}, \quad (1)$$

где Incr_i — безразмерный инкремент изучаемой величины X ; X_i — ее текущее значение на i -й дискретный момент времени из диапазона $i = 1, 2, \dots, N$; $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$ — ее среднее значение за период наблюдений. Полагая $\text{Incr}_0 = 0$, получим $\text{Incr}_N = 0$.

Таким образом, инкрементирование аналогично интегрированию по времени. А если при-

нять во внимание, что испарение напрямую влияет на скорость изменения уровня моря, то становится очевидным, почему связь временного хода уровня КМ должна быть более выражена именно с инкрементами величин, определяющих испарение, к которым и относится скорость приводного ветра. Поэтому инкремент как аналог интегрирования по времени от составляющих скорости ветра, а не их исходные значения, сильнее связан с ходом уровня КМ во времени [10]. Так, корреляция по времени уровня КМ с инкрементами повторяемости восточных ветров составляет -0.85 , а северных ветров $+0.95$ (рис. 3в). Аналогично с инкрементами скорости ветра они составляют -0.71 и $+0.5$ (рис. 3г). Знаки плюс и минус при этих величинах выражают то, что восточные ветры увеличивают испарение, а северные, наоборот, его уменьшают.

Таким образом, смена режима атмосферной циркуляции над КМ, приводящая к преобладанию ветров то восточного, то северного румбов, обуславливает интенсификацию или уменьшение испарения с поверхности моря и, как следствие, оказывает влияние на колебания его уров-

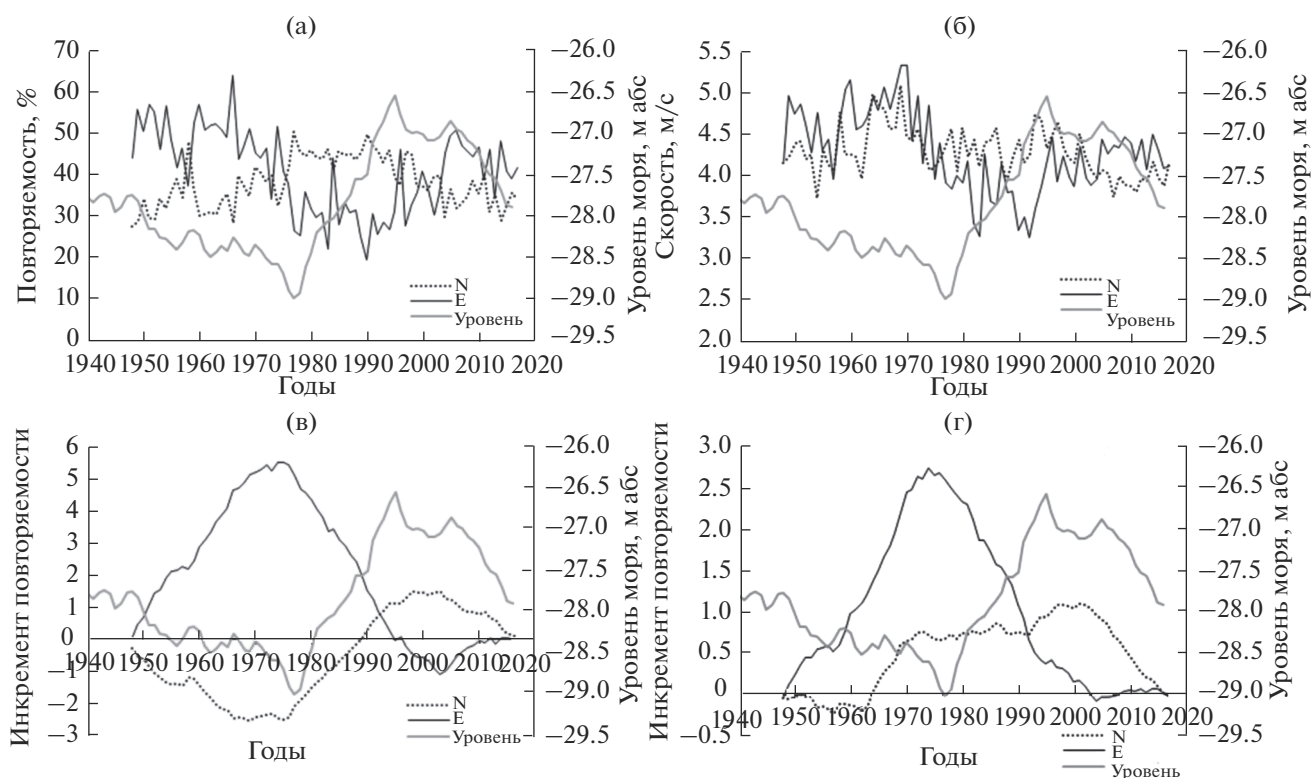


Рис. 3. Изменение по времени среднегодовых, средних по акватории КМ повторяемости (а) и скорости (б) ветров восточного (сплошная линия) и северного (пунктир) румбов, а также их инкременты (в) и (г) соответственно на фоне изменений уровня КМ (светло-серая кривая).

ня. Ветры восточного румба приносят в акваторию КМ сухой и теплый воздух из Средней Азии, который способствует повышению интенсивности испарения. Они интенсифицируются в I и III периоды спада уровня КМ и ослабляются во II период его роста. При этом можно сделать заключение, что в I и II периоды большую роль в этом процессе играли восточные ветры, а в III период – северные.

СВЯЗЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И ИСПАРЕНИЯ С ЕГО ПОВЕРХНОСТИ В ПЕРИОД С 1948 ПО 2017 г.

Для подтверждения ожидаемой высокой корреляции хода уровня КМ с изменениями испарения с его поверхности по данным R-1 и R-2 проведены расчеты среднего по акватории КМ среднемесячного испарения в период с 1948 по 2017 г.

Испарение над акваторией КМ пересчитывалось через среднемесячный поток скрытого тепла, имеющегося в архивах R-1 и R-2. Для этого использовалось известное соотношение, связывающее поток скрытого тепла и скорость испарения в следующем виде:

$$EVP = LH/\lambda, \quad (2)$$

где EVP – испарение, имеющее физическую размерность скорости; LH – поток скрытого тепла; λ – теплота парообразования. Осреднение над акваторией КМ проводилось с учетом маски вода/суша, аналогичной той, которая использовалась при расчете повторяемости и величины скорости ветра над КМ.

Чтобы более полно показать связь испарения и ветра над КМ, на рис. 4 показаны хроноизоплеты в координатах “календарные месяцы года – годы с 1948 по 2017” осредненных по акватории КМ соответствующих характеристик. На нем представлены изменения повторяемости направления ветра (рис. 4а–4г) по румбам, скорости ветра (рис. 4д) и испарения по данным R-1 (рис. 4е) и R-2 (рис. 4ж).

Рассмотрим вначале внутригодовую изменчивость ветра и испарения над КМ. Из хроноизоплет на рис. 4а–4г следует, что повторяемость ветра северного румба наибольшая в теплый период года – особенно в летние месяцы; а восточного, наоборот, – в осенние, зимние и весенние месяцы. Ветры южного и западного направлений имеют схожую структуру с минимумом повторяемости в теплый период года и ее увеличением в зимние месяцы. Здесь главное различие в том, что минимум повторяемости ветров южного румба

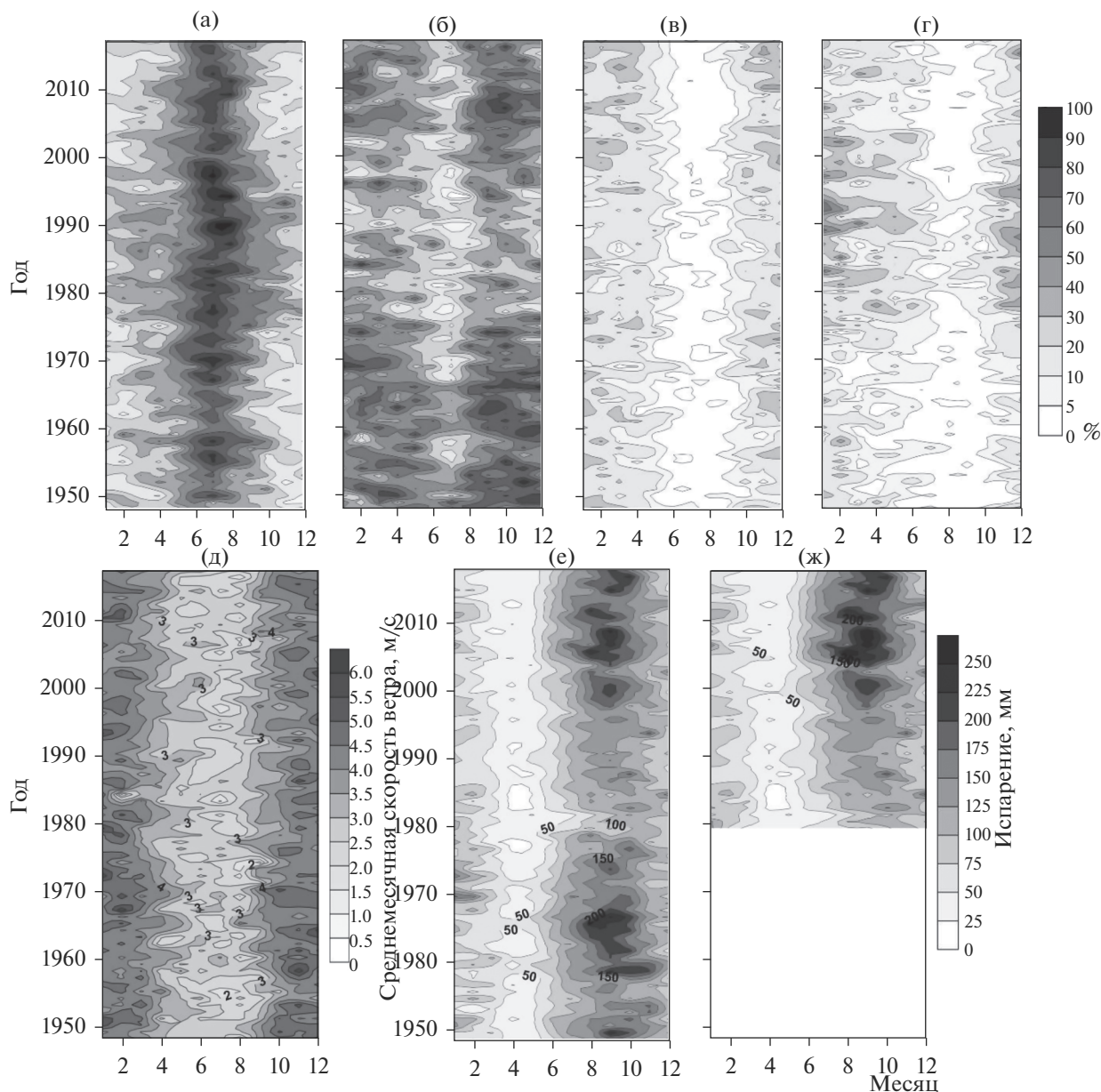


Рис. 4. Среднемесячные повторяемости (%) ветров по румбам, скорость ветра (м/с) без учета направления (д) и испарение (мм/мес), осредненные по акватории КМ. а – повторяемость ветров северного румба, б – восточного, в – южного, г – западного, е – испарение по данным R-1, ж – испарение по данным R-2.

приходится на июль–август, а западного – на август–сентябрь. В целом можно констатировать, что “главную погоду” над КМ делают ветры северного и восточного румбов, у которых средняя повторяемость (70–90%) в периоды своего развития гораздо больше, чем у ветров южного и западного румбов (10–40%). Это подтверждает картину повторяемости среднегодовых направлений ветров, показанных на рис. 2, и делает оправданным выполненный выше анализ влияния ветров се-

верного и восточного румбов на ход уровня КМ (рис. 3).

Хроноизоплеты скорости ветра (рис. 4д) показывают ослабление ветров в теплый период года и, наоборот, их усиление в холодный период года.

Из хроноизоплет испарения по данным R-1 (рис. 4е) и R-2 (рис. 4ж) следует, что оно максимально в осенний период – с августа по ноябрь. Это объясняется разностью значений температу-

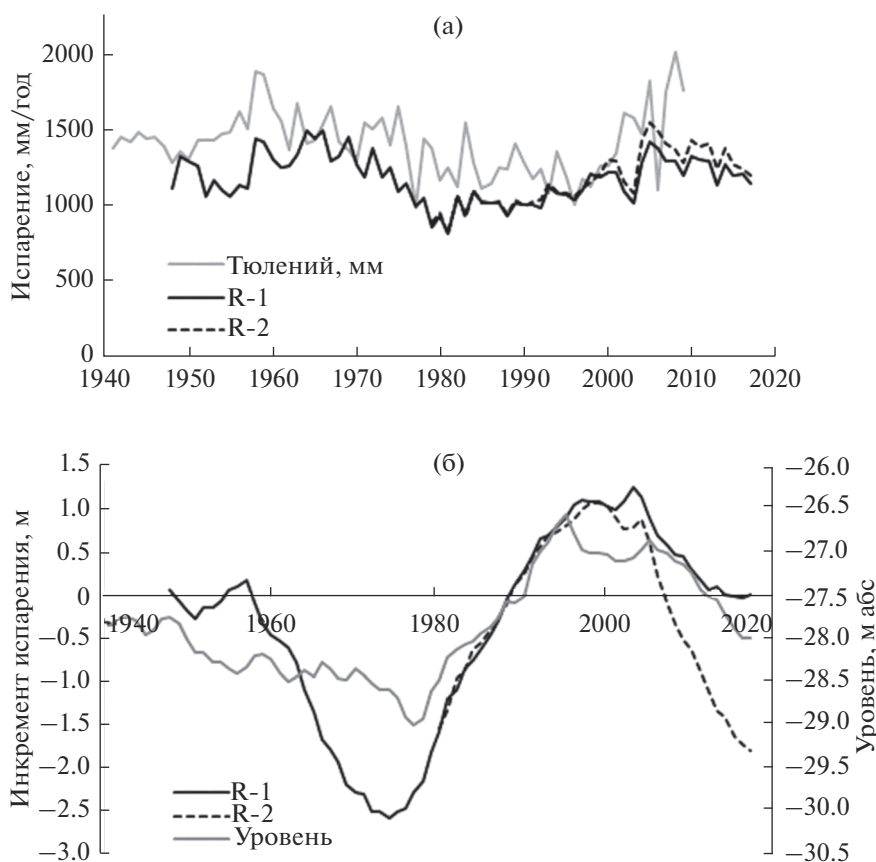


Рис. 5. Эволюции среднегодового, среднего по акватории КМ испарения (а) в период с 1948 по 2017 г., рассчитанные по данным реанализов R-1 и R-2; испарение, рассчитанное по данным наблюдений на ст. о. Тюлений [3], эволюции размерных инкрементов испарения, рассчитанных по данным реанализов R-1 и R-2, взятые с обратным знаком, вместе с ходом уровня КМ за тот же период времени (б).

ры теплой воды и более холодного воздуха, а также усилением ветров в этот период года.

Рассмотрим теперь межгодовую изменчивость характеристик (рис. 4). На всех панелях рис. 4, за исключением модуля скорости ветра без разделения по направлениям и повторяемости ветров южного румба, ясно выражены периоды I, II и III спада и роста уровня КМ. Особенно сильно они проявляются в повторяемости ветров северного и восточного румбов, а также испарения. Напомним, что ветры северного румба способствуют уменьшению испарения, а ветры восточного — его увеличению. В месяцы максимального испарения с акватории моря (август—ноябрь) повторяемость ветров северного румба во II период выше в среднем на ~40%, а восточного — ниже на те же ~40%. В I и III периоды все характеристики, показанные на рис. 4, имеют приблизительно одинаковые значения. При этом контраст величин испарения между периодами II и III, по данным R-2, более выражен, что подтверждает этот же вывод, сделанный выше по климатическим полям ветра (рис. 1).

Таким образом, можно сделать заключение, что скорость и направление ветра играют главную роль в формировании изменений режима испарения над КМ.

На рис. 5а представлена эволюция среднегодового среднего по акватории КМ испарения в период с 1948 по 2017 г., рассчитанная по R-1 и R-2. Для сравнения приведены также и величины испарения на ст. о. Тюлений [3]. Эти графики показывают, что долгопериодная изменчивость испарения, по данным наблюдений на о. Тюлений, хорошо согласуется по фазам роста и падения со средним по акватории КМ испарением воды.

Имея временной ход испарения, осредненно по акватории моря, можно оценить его вклад в эволюцию уровня КМ. Для этого по данным архивов R-1 и R-2 рассчитаны размерные инкременты испарения (рис. 5б). Для их расчета использовалась формула (1), в которой, однако, нормирование на среднюю величину не применялось. Здесь следует отметить, что инкрементирование напрямую зависит от среднего значения и продолжительности расчетных периодов. Соот-

ветственно, инкременты для R-1 и R-2 в совпадающие временные периоды будут сильно отличаться друг от друга. Поэтому при расчете инкремента по данным R-2 в качестве начального значения использовалась величина инкремента в 1979 г. по данным из R-1 для того, чтобы эти инкременты были сопоставимы между собой. В этом случае значения инкремента будут соответствовать изменениям уровня КМ, вызванным испарением. Поскольку испарение способствует уменьшению уровня КМ, то для сопоставления вклада испарения в изменение уровня размерные инкременты изображены на рис. 5б с обратным знаком. Из рис. 5б видна тесная связь испарения и хода уровня моря. Во временном ходе уровня и, особенно, ненормированных инкрементов испарения в 1948–2017 гг. хорошо выражена мультидекадная (квазишестидесятилетняя) изменчивость. Корреляции между колебаниями уровня моря и этими инкрементами, рассчитанными за 1948–2017 гг. по R-1 и R-2, составляют $|0.86|$ и $|0.75|$ соответственно. Амплитуды изменчивости инкрементов испарения, в пересчете на изменения уровня КМ, выше, чем амплитуды хода уровня КМ. Это связано с тем, что физически испарение отвечает только за понижение уровня, которому препятствуют сток рек и осадки. Поэтому реконструкция хода уровня моря возможна только с привлечением всех факторов водного баланса, но эта задача в данной статье не ставилась. При этом испарение, рассчитанное по данным уточненного R-2, соответствует современному понижению уровня КМ сильнее, чем R-1 (рис. 5б; последнее десятилетие). Это полностью согласуется с картиной ветров на рис. 1в, где видно, что для периода III заток на акваторию КМ воздушных масс из прилегающего к морю засушливого региона Средней Азии, по данным R-2, только усиливается.

В данной работе авторы не ставили задачу восстановления хода уровня КМ по данным реанализов и стока рек, оставляя ее для последующих изысканий. Задача представленной работы – показать очевидные, на взгляд авторов, связи изменения региональной циркуляции атмосферы и хода уровня КМ через регулирование испарения. При этом природа выявленных в данной работе изменений атмосферной циркуляции, проявляющихся в обнаруженных нами изменениях полей ветра, также требует своего объяснения. Бассейн КМ находится в зоне влияния влажных воздушных масс, формирующихся над Северной Атлантикой, и сухих континентальных воздушных масс из Сибири. Ранее в [10, 16] установлено, что на климат бассейнов Камы и Волги существенное влияние оказывает изменение климата Северной Атлантики. Атмосферные процессы непосредственно над КМ находятся под воздействием Североатлантического колебания (САК), которое, в

зависимости от фазы, усиливает или ослабляет воздействие на них Сибирского антициклона (СА) с востока. В периоды I и III (во время отрицательной фазы САК [20]) преобладали ветры восточных румбов, которые приносят в акваторию КМ сухой и теплый воздух из Средней Азии. При этом обнаруживается приблизительно десятилетнее опережение мультидекадных изменений индекса САК по отношению к инкременту стока р. Волги, который согласуется с ходом уровня КМ [14]. В положительную фазу САК (II период) западный отрог СА был смещен севернее, вследствие этого воздушные массы поступали в область КМ с ветрами северного румба и над акваторией моря преобладал меридиональный перенос. Корреляция между среднегодовой скоростью и повторяемостью ветров зональных румбов над КМ с годовыми значениями САК составляет $r = |0.4|$. Корреляция среднего атмосферного давления в области формирования СА – между 40° – 65° с.ш. и 80° – 120° в.д. со скоростью и повторяемостью ветров зональных и северных румбов над КМ за июнь–октябрь составляет $\geq |0.5|$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Один из главных факторов изменений уровня КМ – смена режима ветров над КМ. При этом периоды I (1948–1976 гг.) и III (1996–2017 гг.) падения и II (1977–1995 гг.) роста уровня КМ особенно сильно проявляются в повторяемости ветров северного и восточного румбов, у которых средняя повторяемость (70–90%) в периоды своего развития гораздо больше, чем у ветров южного и западного румбов (10–40%). Это связано с тем, что ветры восточного румба приносят в акваторию КМ сухой и теплый воздух из Средней Азии, который, в свою очередь, способствуют повышению интенсивности испарения. Эти ветры интенсифицируются в периоды I и III падения уровня КМ и ослабляются в период II его роста, когда преобладают северные ветры. В результате в период II происходит уменьшение интенсивности испарения, что способствует росту уровня КМ.

При этом повторяемость ветра северного румба наибольшая в теплый период года – особенно в летние месяцы, а восточного, наоборот, – в осенние, зимние и весенние месяцы. Средняя скорость ветра над акваторией КМ в годовом цикле демонстрирует ослабление ветра в теплый период года и, наоборот, усиление в холодный период года.

Проведенный анализ показывает, что основную роль в изменениях испарения над КМ играют ветры восточного и северного румбов, для которых в модуле средней по акватории скорости ветра и его повторяемости отчетливо выражены периоды I, II и III спада и роста уровня КМ.

Испарение по данным R-1 и R-2 максимально в осенний период — с августа по ноябрь. Это легко объясняется большей разностью температуры между более теплой водой и более холодным воздухом, а также усилением ветра в этот период года.

Выполненные расчеты испарения над акваторией КМ по данным R-1 и R-2 полностью подтверждают эти выводы. В статье продемонстрирована тесная связь испарения и хода уровня КМ. Так, корреляции между ненормированными инкрементами испарения и уровня КМ составляют -0.86 и -0.75 по R-1 и R-2 соответственно.

Амплитуды изменчивости инкрементов испарения в пересчете на изменения уровня КМ выше, чем амплитуды хода уровня КМ. Это связано с тем, что физически испарение отвечает только за понижение уровня, в то время как сток рек и осадки способствуют его повышению. Поэтому реконструкция хода уровня моря возможна только с привлечением всех факторов водного баланса. Более того, вклад испарения в современное понижение уровня КМ по данным уточненного R-2 больше, чем по данным R-1, поскольку заток в акваторию КМ воздушных масс из соседнего засушливого региона Средней Азии по данным R-2 в последнее десятилетие более интенсивен. Наряду с испарением вод КМ, на ход его уровня влияют речной сток и осадки над зеркалом КМ. В данной работе авторы не касались этой проблемы, поскольку связь речного стока с ходом уровня КМ изучалась во многих, в том числе и авторов настоящей статьи, работах [2, 3, 6, 10, 14–18]. Увеличение выноса влажных атлантических воздушных масс в бассейн водосбора КМ в период II сопровождается ослаблением ветра восточных румбов над поверхностью КМ. Обратные процессы наблюдаются в периоды I и III. Таким образом, изменения обоих климатических факторов — речного стока и испарения — с точки зрения изменения уровня КМ действуют согласованно, практически синхронно способствуя его понижению и повышению. Необходимо в дальнейшем изучить относительные вклады этих процессов в изменение хода уровня КМ. При этом они оба являются следствием перестройки глобальных атмосферных процессов, изучение которой также требует своего исследования.

Данные современных реанализов предоставляют хорошую возможность комплексного подхода к изучению связи эволюции уровня КМ с глобальными и региональными перестройками атмосферной циркуляции. При этом данные этих реанализов позволяют с высокой степенью точности восстанавливать все составляющие водного баланса КМ: осадки, испарение и сток рек. Последний определяется балансом испарения и осадков в бассейне водосбора КМ. На основе этого подхода в дальнейшем предполагается прове-

сти комплексное исследование основных факторов, определяющих изменения уровня КМ.

ВЫВОДЫ

Показано, что изменения уровня КМ тесно связаны с многолетними изменениями характеристик поля приповерхностного ветра в регионе моря, поскольку последние регулируют интенсивность испарения с его поверхности. Во временном ходе уровня и ненормированных инкрементов испарения в 1948–2017 гг. хорошо выражена квази-шестидесятилетняя изменчивость. Выявлены особенности перестройки приземной циркуляции атмосферы в регионе КМ по данным атмосферных реанализов R-1 и R-2. Природа этих региональных изменений в циркуляции атмосферы, вызванные перестройкой атмосферной циркуляции над Евразией в целом, будет целью дальнейших исследований.

Проведенные сопоставления долгопериодной изменчивости уровня КМ и пространственно-временных изменений региональной циркуляции атмосферы, делающих значительный вклад в формирование водного баланса КМ, еще раз подтвердили их обусловленность климатическими изменениями, на фоне которой влияние водохозяйственной деятельности на гидрометеорологический режим моря носит второстепенный, хотя и ощутимый характер. Смена режима циркуляции атмосферы, в том числе определяющая изменение генерального направления и скорости перемещения воздушных масс, являются главным фактором изменения уровня КМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С., Мохов И.И., Семенов В.А., Спорышев П.В. Анализ и моделирование изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // Докл. РАН. 1999. Т. 366. № 2. С. 248–252.
2. Будыко М.И., Ефимова Н.А., Лобанов В.В. Будущий уровень Каспийского моря // Метеорология и гидрология. № 5. 1988. С. 86–94.
3. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
4. Георгиевский В.Ю., Голубев В.С. Испарение с поверхности Каспийского моря и его многолетняя изменчивость // Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеопиздат, 2003. С. 230–238.
5. Голицын Г.С., Раткович Д.Я., Фортус М.И., Фролов А.В. О современном подъеме уровня Каспийского моря // Вод. ресурсы. 1998. Т. 25. № 2. С. 133–139.
6. Казанский А.Б. Возможный подход к прогнозу возрастания уровня Каспийского моря // ДАН. 1994. Т. 338. № 4. С. 531–537.

7. Мещерская А.В., Гетман И.Ф., Борисенко М.М., Шевкунова Э.И. Мониторинг скорости ветра на водосборе Волги и Урала в XX веке // Метеорология и гидрология. 2004. № 3. С. 83–97.
8. Мещерская А.В., Еремин В.В., Баранов А.А., Майстрова В.В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // Метеорология и гидрология. 2006. № 9. С. 46–58.
9. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Тенденции климатических изменений в высоких широтах Северного полушария: Диагностика и моделирование проб // Лед и снег. 2013. Т. 2. № 122. С. 53–62.
10. Панин Г.Н., Выручалкина Т.Ю., Соломонова И.В. Воздействие Северной Атлантики на гидрологический режим бассейна Каспийского моря // Вод. ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 442–452.
11. Панин Г.Н., Дзюба А.В. Изменение скорости и направления ветра от Арктики до Каспийского моря как проявление современных изменений климата // Вод. ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 737–753.
12. Панин Г.Н., Дзюба А.В. Современные изменения вектора скорости ветра и интенсивности испарения с поверхности Каспийского моря // Вод. ресурсы. 2003. Т. 30. № 2. С. 198–207.
13. Панин Г.Н., Дзюба А.В., Осипов А.Г. О возможных причинах изменения испарения за последние десятилетия в районе Каспийского моря // Вод. ресурсы. 1991. № 3. С. 5–16.
14. Панин Г.Н., Дианский Н.А. О связи колебаний уровня Каспийского моря и климата Северной Атлантики // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 304–316.
15. Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. СПб.: Наука, 2005. 356 с.
16. Панин Г.Н., Соломонова И.В., Выручалкина Т.Ю. Режим составляющих водного баланса Каспийского моря // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. № 5. С. 488–495.
17. Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Архипкин В.С., Никонова Р.Е. Многолетняя изменчивость гидрологического режима Каспийского моря в связи с вариациями климата // Вестн. МГУ. Сер. 5, География. 2011. № 2. С. 62–71.
18. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: ГЕОС, 2003. 174 с.
19. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние хозяйственной деятельности на водный баланс и изменение уровня Каспийского моря // Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. С. 267–277.
20. Hurrell J.W. Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation // Sci. 1995. V. 269. P. 676–679.
21. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds B., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. P. 437–470.
22. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // Bul. of the Atmos. Met. Soc. 2002. V. 83. P. 1631–1643.