

УДК 551.461 (262.1)

Канд. геогр. наук
PhDН.И. Ивкина¹
А.В. Галаева¹**ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО
БАЛАНСА КАСПИЙСКОГО МОРЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТА**

Ключевые слова: водный баланс, Каспийское море, речной сток, испарение, осадки, уровень моря

В статье рассматриваются основные элементы водного баланса Каспийского моря за различные периоды, характеризующие спад и подъем уровня моря. Показано, что их соотношение влияет на фазы трансгрессии и регрессии уровня Каспийского моря.

Введение. Бассейн Каспийского моря представляет собой область без внешнего стока, а само море является бессточным озером. В силу этого баланс прихода и расхода воды в Каспийском море имеет упрощенный вид, по сравнению с внешними морями и проточными озерами.

Исследования связей между составляющими водного баланса и положением уровня моря, проведенные рядом авторов [1, 7, 19], показывают, что изменение климата в бассейне Каспийского моря существенно влияет на режим моря в историческом прошлом и в настоящее время. Необходимо отметить, что под водным балансом понимается соотношение между приходом в море и расходом воды.

Используемые данные и методы. Для анализа использовались расчеты элементов водного баланса, выполненные в Государственном океанографическом институте им. Н.Н. Зубцов, на основе данных наблюдений, в том числе с сети РГП «Казгидромет». В качестве модели многолетней и сезонной изменчивости уровня Каспийского моря рассматривалось уравнение водного баланса [7], которое обычно записывается в виде:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{Q_{нов}}{S} + \frac{Q_{подз}}{S} - \frac{Q_{кбз}}{S} + P - E \pm \frac{dH_{\sigma}}{dt}, \quad (1)$$

¹РГП "Казгидромет, г. Алматы, Казахстан

где dH – изменение среднего уровня моря за время t ; $Q_{нов}$ – объем суммарного поверхностного притока речных вод (Волги, Куры, Урала, Терека, Сулака, Самура, иранских рек и междуречья); $Q_{подз}$ – объем подземного притока вод; $Q_{кбз}$ – объем стока каспийской воды в залив Кара-Богаз-Гол; P – количество осадков, выпавших на поверхность моря; E – величина испарения с поверхности моря; dH_{σ} – плотностные изменения уровня; S – площадь моря, км².

Наибольшее значение для водного баланса Каспийского моря имеют речной сток и испарение, соотношение между которыми в основном и определяет межгодовые изменения объема воды и уровня водоема. Ярво выраженная географическая зональность климатических составляющих обуславливает зональность в распределении годовых осадков и испарения. Как показывают исследования ряда ученых [2...5, 10, 12], влагооборот является главным процессом, который наряду с другими климатообразующими процессами играет большую роль в формировании климата Земли и, в частности, климата водосборного бассейна Каспийского моря.

Многолетние изменения характеристик водного баланса Каспийского моря. Приходная часть среднесноголетнего водного баланса Каспийского моря складывается на 20 % из атмосферных осадков, выпадающих на его зеркало, на 1 % – из притока подземных вод по водоносным слоям и на 79 % – из речного стока. Сток рек, определяющий поверхностный приток к морю – основная положительная составляющая водного баланса. В Каспийское море впадает около 130 рек, но основной объем притока приходится на реки Волга, Жайык (Урал), Терек, Кура, Сулак, Самур и реки иранского побережья. Причем основная часть (80 %) приходится на сток Волги. Гидрографические характеристики основных рек, впадающих в Каспийское море приведены в табл. 1. Площадь бассейна Каспийского моря составляет 3,5 млн. км², на сточные области приходится 62,6 % его площади, около 26,1 % – на бессточные, и 11,3 % составляет площадь моря. Все реки, впадающие в Каспийское море, за исключением Терека, имеют зарегулированный сток. Регулирование стока повлияло на изменение режима сезонного притока в море и, как следствие, изменило сезонный ход уровня Каспийского моря [7].

Речной сток очень изменчив (рис. 1). В период с 1936 по 2019 гг. при средней величине 292 км³/год он менялся от 393 км³ до 207 км³ в год. Самым маловодным годом был 1975 г., самым многоводным – 1990 г., сток Волги

составлял 166 и 308 км³ соответственно. Коэффициент вариации речного стока за период 1936...2019 гг. равен 0,15.

Таблица 1

Современные гидрографические характеристики основных рек, впадающих в Каспийское море [17]

Река	Длина реки, км	Площадь бассейна, тыс. км ²
Волга	3530	1360
Урал	2430	237
Терек	623	43,2
Сулак	169	15,2
Кура	1360	188

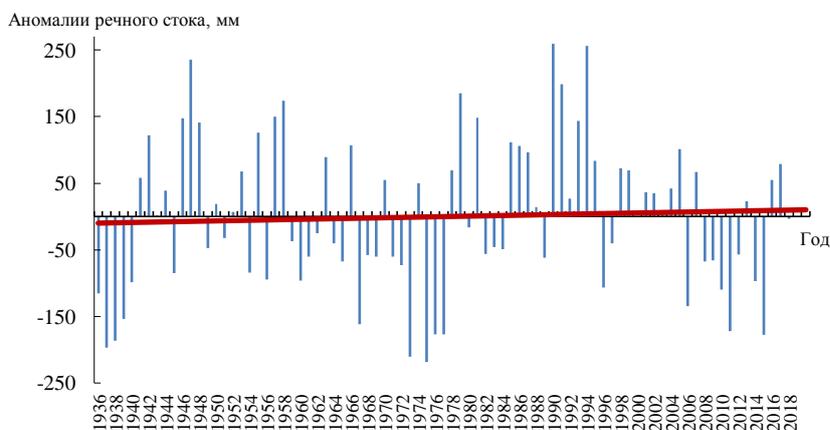


Рис. 1. Аномалии притока речных вод в Каспийское море за период с 1936 по 2019 гг.

В многолетних колебаниях стока основных рек можно выделить три характерных периода: условно-естественный (до середины 50-х годов, когда имеющиеся водохранилища не оказывали существенного влияния на сток), период, связанный со строительством крупных водохранилищ на реках Волга и Кама, и период зарегулированного режима и интенсивного водопотребления. Основная роль в формировании многолетней изменчивости стока рек принадлежит атмосферным процессам. Основными стокообразующими факторами речного стока являются зимние осадки в бассейнах рек Волги и Урала, что связано с незначительным испарением в зимний период [16].

Величины Волжского притока в море оценивались по наблюдениям на гидрологическом посту Лебяжье и в створе Волгоградской ГЭС, но фактическое поступление меньше из-за потерь в

дельте. Строительство водохранилищ привело к сезонному перераспределению речного стока. На рис. 2 приведено внутригодовое распределение стока реки Волга в створе с. Лебяжье за различные периоды и разные по водности годы.

Расчет производился методом средних распределений стока за водохозяйственный год заданной градации водности для трех периодов: относительно-естественного стока (до постройки водохранилищ) 1938...1950 гг.; период строительства водохранилищ и активного водопотребления (1951...1990 гг.); период изменения климатических характеристик (1991...2018 гг.). При расчете выделялись три группы водности: маловодные годы, с обеспеченностью более 66,7 %, средние по водности годы, с обеспеченностью от 33,3 до 66,7 % и многоводные годы, обеспеченностью менее 33,3 % [6, 15].

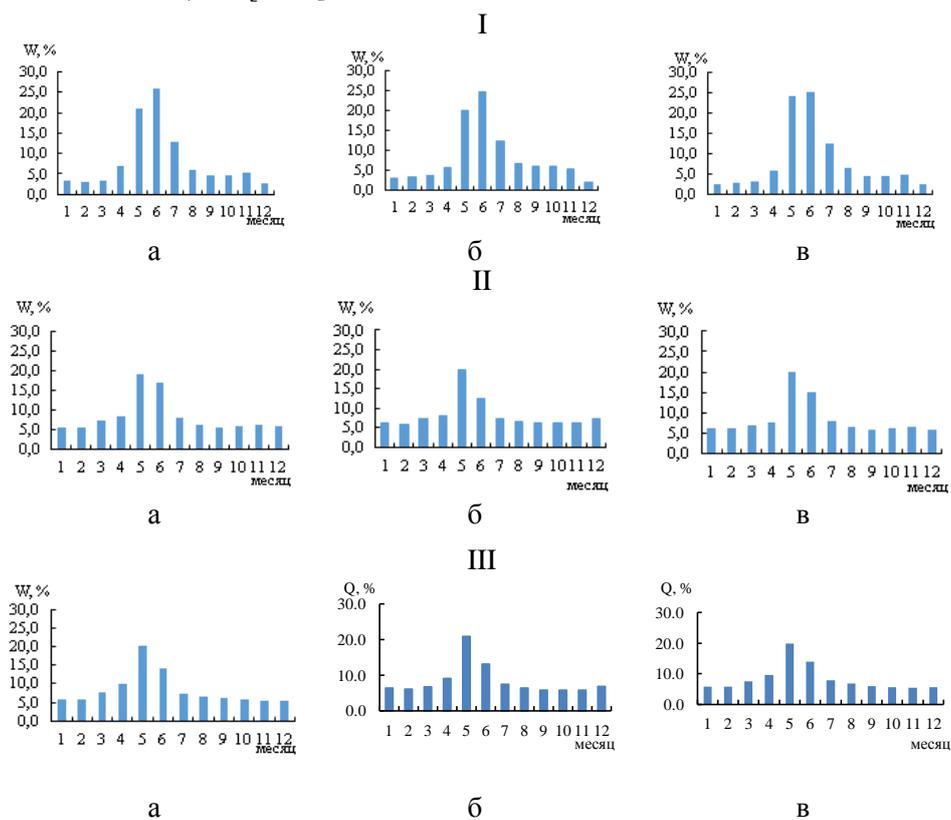


Рис. 2. Внутригодовое распределение стока р. Волга – с. Лебяжье в процентах от годового для трех различных градаций водности: а – маловодные годы, б – средние по водности годы; в – многоводные годы; за три периода: I – 1938...1950 гг., II – 1951...1990 гг., III – 1991...2018 гг.

В естественный период 1938...1950 гг. на реке Волга в створе с. Лебяжье наблюдалось весенне-летнее половодье, начинавшееся в апреле и заканчивающееся в июле. Пик максимального прохождения объема стока приходился на июнь месяц; в многоводные годы он составлял 26,1 % от годового объема, в средние по водности – 24,6 %, и в маловодные годы – 25,1 %. Минимальный объем стока наблюдался с декабря по март и составлял от 2,2 до 3,9 % в месяц от годового объема стока.

Внутригодовое распределение стока начало меняться с 50-х годов прошлого века, после активного строительства водохранилищ. Меженный период стал менее выраженным, половодье сократилось до двух месяцев (май-июнь). Максимальный объем стока наблюдается в мае и составляет 18,9 % от годового объема в многоводные годы, 20 % – в средние по водности и маловодные годы. В табл. 2 также приведено распределение стока р. Волга по кварталам.

Таблица 2

Внутригодовое распределение стока р. Волга – с. Лебяжье в % за различные кварталы

Периоды	Квартал, %			
	1	2	3	4
Многоводные годы				
1938...1950	9,7	54,1	23,4	12,8
1951...1990	18,4	44,2	19,4	18,0
Разница	8,7	-9,9	-4,0	5,2
Средние годы				
1938...1950	10,6	50,5	25,4	13,6
1951...1990	19,3	40,3	20,2	20,1
Разница	8,8	-10,2	-5,2	6,6
Маловодные годы				
1938...1950	8,5	55,3	24,0	12,2
1951...1990	19,0	42,6	19,9	18,5
Разница	10,5	-12,7	-4,1	6,3

Данные, приведенные в табл. 2 и на рис. 3, показывают, что объем стока во втором и третьем кварталах уменьшился за период 1951...1990 гг., по сравнению с периодом естественного стока в разные по водности годы от 9 до 12,7 % во втором квартале и от 4 до 5,2 % в третьем квартале. Сток первого и второго кварталов, наоборот, увеличились. Это увеличение составило в разные по водности годы от 5 до 10,5 %. Причем максимальное увеличение наблюдалось в маловодные годы.

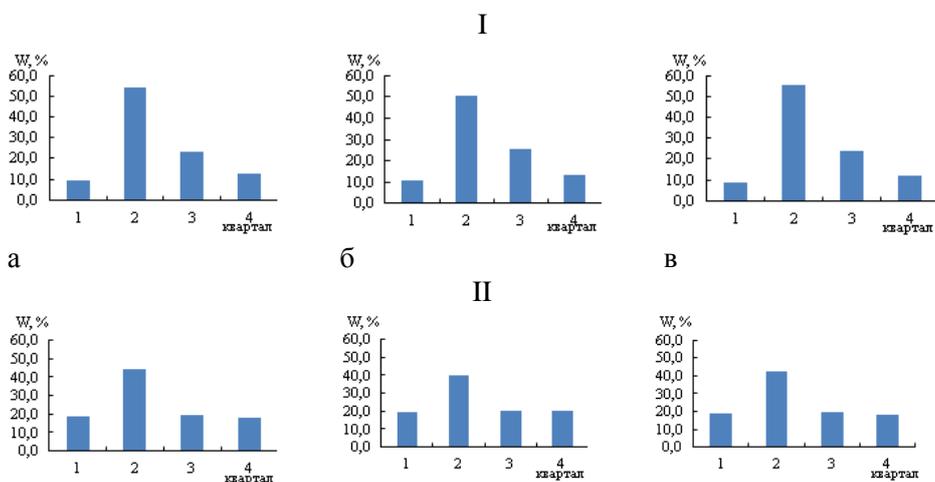


Рис. 3. Внутригодовое распределение стока р. Волга – с. Лебяжье по кварталам в % для трех различных градаций водности: а – маловодные годы, б – средние по водности годы; в – многоводные годы; за: I – 1938...1950 гг., II – 1951...1990 гг.

Начиная с 1990 г. наступил новый период – период изменения климата и климатических характеристик, влияющих на сток рек, хотя на внутригодовое распределение стока это почти никак не повлияло (рис. 2, III), но значительно увеличился объем стока. За 1990...2018 гг. средний объем стока р. Волга увеличился на 10 км³, по сравнению с периодом 1951...1990 гг.

Анализ количества лет различной водности за периоды 1951...1990 гг. и 1991...2018 гг. показывает, что за последний период (табл. 3) процентное содержание многоводных лет практически не изменилось, заметно увеличилось количество средних по водности лет в процентном отношении (на 24 %), а количество маловодных лет, наоборот, уменьшилось на 17 %.

Таблица 3

Сток реки Волга – с. Лебяжье за различные периоды по группам водности

Градации водности	1951...1990 гг.		1991...2018 гг.	
	число лет	%	число лет	%
	40		28	
многоводные годы	15	38	10	38
средние по водности	9	23	12	46
маловодные	16	40	6	23

Приведенные расчеты еще раз доказывают, что человеческий фактор, а именно зарегулированность стока играет большую роль в его перераспределении внутри года. В последнее время также добавился климатический фактор, который значительно влияет на объем стока.

Осадки, являющиеся второй по значимости приходной части водного баланса, по площади моря распределены неравномерно. Наибольшее количество осадков (до 1700 мм/год) выпадает на юго-западном побережье моря во влажных субтропиках Ленкоранской низменности, через которую проходит с запада на восток основная масса средиземноморских циклонов; наименьшее количество осадков выпадает на восточном побережье моря. В центральной части западного побережья в зоне субтропиков годовая сумма осадков составляет 115...220 мм, уменьшаясь в направлении моря (Нефтяные Камни – 110 мм/год). На большей части восточного побережья годовая сумма осадков не превышает 95...125 мм [9, 11, 18]. Роль атмосферных осадков в сезонных колебаниях уровня моря, по сравнению со стоком рек и испарением, относительно невелика. Ежегодный прирост уровня моря в результате выпадения осадков составляет примерно 20 см. Отклонения количества осадков от нормы могут обуславливать отклонения в годовых приращениях уровня на $\pm 3...7$ см, что составляет 10...15 % размаха его внутригодовых колебаний [7]. Коэффициент вариации осадков для 1936...2019 гг. равен 0,23. Относительный вклад атмосферных осадков в приходную часть водного баланса составляет в среднем 23 %. С начала прошлого столетия прослеживалась общая тенденция увеличения количества атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Каспия (рис. 4).

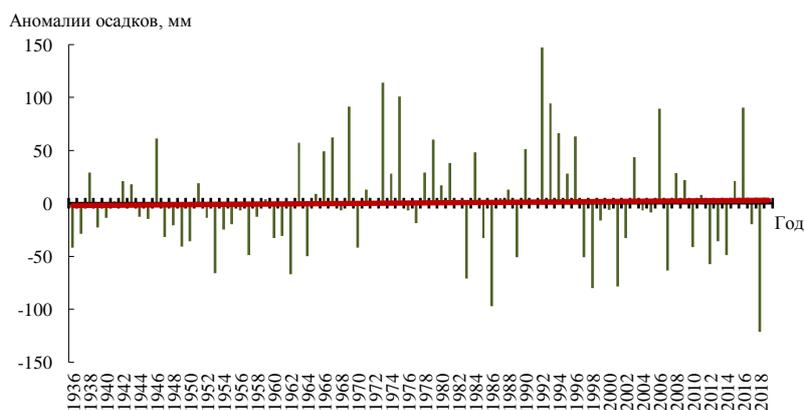


Рис. 4. Аномалии осадков, выпадающих на поверхность Каспийского моря за период с 1936 по 2019 гг.

Расходная часть определяется испарением с зеркала моря, которое зависит от режима влажности и ветра, и оттоком в залив Кара-Богаз-Гол. Испарение во внутригодовых колебаниях уровня моря стоит на втором месте после стока. Его величина зависит от свойств воздушных масс над морем и в значительной степени определяется тепловым состоянием подстилающей поверхности [1]. Значительная меридиональная протяженность моря и различные климатические условия приводят к существенным различиям в интенсивности процессов испарения, так, например, они наиболее развиты в Северном Каспии, где ежегодно испаряется в среднем 740 мм слоя воды. С поверхности всего моря с июня по декабрь испаряется около 70 % годового объема испарившихся вод, а с поверхности Северного Каспия с мая по сентябрь – 75 % годового объема. Минимальные значения отмечаются в зимние месяцы и в начале весны (с января по март), максимальные – летом. В районах Среднего и Южного Каспия процессы испарения наиболее развиты в конце лета и начале осени [14]. По сравнению с речным стоком, межгодовые изменения величины испарения существенно меньше. Как видно из данных, приведенных на рис. 5, наиболее интенсивно процессы испарения были развиты до 70-х годов. Прслеживается тенденция уменьшения испарения.

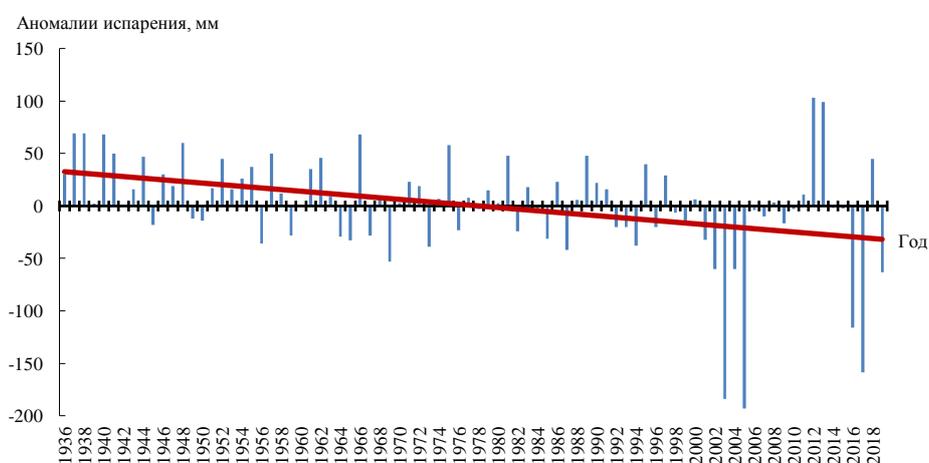


Рис. 5. Аномалии испарения с поверхности Каспийского моря за период с 1936 по 2019 гг.

Как видно из данных, приведенных на рис. 6, в течение года наиболее сильное испарение происходит с июня по декабрь. Необходимо отметить, что в современный период испарение увеличилось в зимнее время и уменьшилось в летнее.

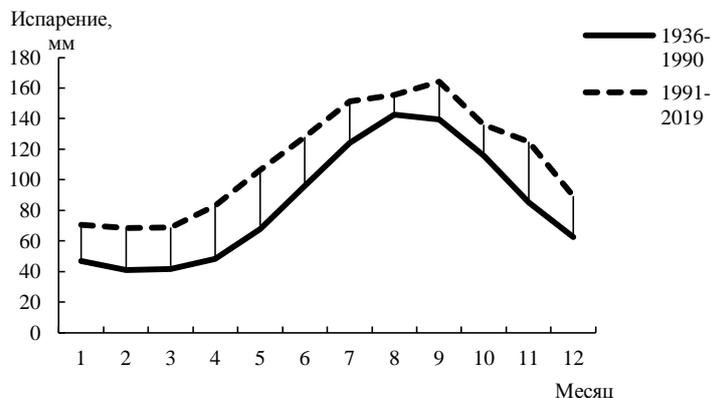


Рис. 6. Интенсивность испарения в течение года.

Роль испарения во внутригодовых колебаниях уровня моря стоит на втором месте после стока. Отклонение испарения от среднего многолетнего значения в отдельные годы достигает $\pm 10 \dots 20$ см, что соответствует примерно 30...50 % амплитуды внутригодовых колебаний уровня. За счет испарения уровень моря понижается в среднем за год на 97 см.

К расходным составляющим водного баланса Каспия относится также сток морской воды в залив Кара-Богаз-Гол. С целью сокращения дефицита водного баланса Каспия в период интенсивного понижения уровня Каспия, в 1980 г. сток в залив был перекрыт земляной дамбой. Однако, когда уровень Каспия начал повышаться, в 1984 г. в дамбе было открыто водопропускное устройство, а в 1992 г. возобновлено свободное поступление каспийской воды в залив. Начиная с 2000 г. ежегодный объем стока в среднем составляет 19...20 км³/год. Роль подземного стока в водном балансе Каспия незначительна. Согласно косвенным оценкам, его средняя величина по периметру моря принимается 4 км³/год.

Для того чтобы графически отобразить колебания величин водного баланса, были построены разностные интегральные кривые в относительных величинах – модульных коэффициентах (рис. 7).

Как видно из данного рисунка, начиная с 2005 г. интегральная кривая речного стока наклонена вниз, что соответствует маловодной фазе.

Для испарения с поверхности Каспия характерны незначительные межгодовые изменения, свидетельствующие об относительной устойчивости этого фактора. Коэффициент вариации испарения для 1936...2019 гг. равен 0,05. Однако следует отметить, что в связи с понижением уровня моря и соответствующим сокращением площади его зеркала происходит изменение объема испаряющейся воды. Происходит выравнивание береговой ли-

нии, так как отсекаются мелководные заливы, например, Кайдак и Мертвый Култук, которые испаряют много воды.

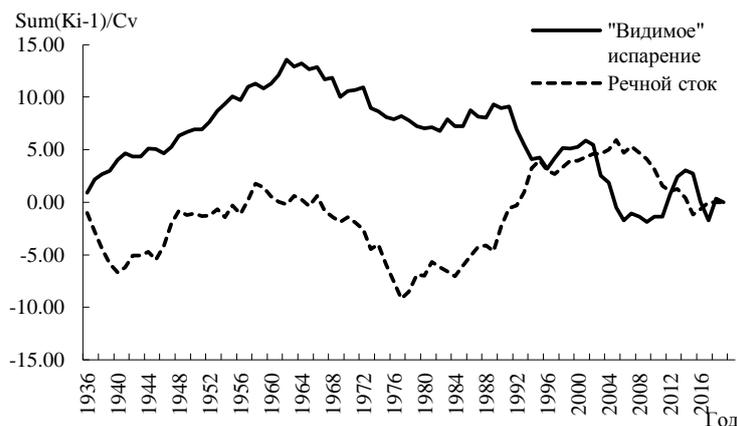


Рис. 7. Сопоставление разностно-интегральных кривых "видимого" испарения и речного стока за период с 1936 по 2019 гг.

Анализ сопоставления разностно-интегральной кривой речного стока и "видимого" испарения (испарение минус осадки) показал, что они изменялись асинхронно. Особенно хорошо прослеживается асинхронность изменения стока и "видимого" испарения за период современного повышения (1978...1995 гг.) и падения (2005...2019 гг.) уровня Каспия.

Средний сток в море за 1978...1995 гг. превышал норму примерно на 11 %, что соответствует обеспеченности около 25 %, "видимое" испарение было ниже нормы на 2 %, что оценивается обеспеченностью 63 %. За указанный период сток увеличился более чем на 30 км³/год относительно его среднегодовой величины – 292 км³/год.

В период современного падения уровня моря (2006...2019 гг.) средний приток в море уменьшился на 7,5 % относительно его среднегодовой величины, в то время как "видимое" испарение было в пределах его среднегодового значения.

Результаты исследований, приведенные в работах А.Н. Косарева и Р.Е. Никоновой [13] показали, что наибольшие колебания уровня моря характерны для периода, когда в Атлантико-Европейском секторе устанавливается одинаковый барико-циркуляционный режим. Наиболее значительна связь уровня с западной циркуляцией. При развитии восточного переноса воздушных масс связь с уровнем моря отрицательная. Табл. 4, где приведены основные характеристики водного баланса за различные периоды, характеризующие спад и подъем уровня

моря, наглядно показывает, что их соотношение влияет на фазы трансгрессии и регрессии уровня Каспийского моря.

Таблица 4

Основные составляющие водного баланса за различные периоды, мм*

Характеристика	Месяц												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1936...1977 гг.													
Осадки	21	17	19	18	16	10	6	7	17	28	32	27	216
Речной сток	37	36	43	73	175	114	55	42	37	40	40	33	725
Испарение	46	41	42	48	68	97	125	142	140	115	85	63	1012
1978...1995 гг.													
Осадки	21	21	23	20	17	8	5	7	15	33	35	29	237
Речной сток	54	51	60	87	171	87	60	53	48	52	55	55	831
Испарение	48	42	42	49	69	93	121	141	136	115	85	61	1000
1996...2005 гг.													
Осадки	19	16	17	18	11	10	5	10	21	35	22	16	200
Речной сток	46	45	53	67	156	113	60	50	46	43	41	47	771
Испарение	53	48	43	43	55	91	88	128	127	113	89	63	943
2006...2019 гг.													
Осадки	20	17	20	18	12	8	7	9	25	30	28	22	217
Речной сток	47	46	55	75	153	95	59	49	44	43	43	49	759
Испарение	71	69	69	83	106	128	151	156	164	136	125	89	974

* *Примечание: Расчет произведен по данным, подготовленным в Государственном океанографическом институте (ГОИИ) Росгидромета.*

Как следует из приведенной выше таблицы, в период с 2006 по 2019 гг. на акваторию Каспийского моря выпадало наименьшее количество осадков, а процессы испарения были более интенсивные, к тому же, из-за серии маловодных лет в бассейне р. Волга, средний приток воды также был наименьшим. Главная причина этой маловодности – потепление климата, охватившее все северное полушарие [8]. В результате значительно уменьшилось количество атмосферных осадков, главным образом осенне-зимних, формирующих основной объем стока Волги.

Таким образом, колебания уровня Каспийского моря в основном обусловлены соотношением характеристик водного баланса, изменяющихся под влиянием антропогенного изменения климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абузьяров З.К., Нестеров Е.С. Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря // Труды государственного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации». – Вып. 345. – 2011. – С. 5-22.
2. Арпе К., Спорышев П. В., Семенов В. А. и др. Исследование причин колебаний уровня Каспийского моря с помощью моделей общей цир-

- куляции атмосферы // Изменения климата и их последствия. – СПб.: Наука, 2002. – С. 165-179.
3. Архипова Е.Г., Крюков В.В. и др. Возможные изменения уровня Каспийского моря в связи с изменениями климатических условий // Труды ГОИН. – 1975. – Вып. 125. – С. 75-85.
 4. Бабкин В.И., Постников А.Н. и др. Влияние циклонической активности на сток Волги // Труды ГГИ. – 1992. – Вып. 360. – С. 48-57.
 5. Вительс Л.А. Синоптическая метеорология и гелиогеофизика: избранные труды / Под ред. Т.В. Покровской. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 255 с.
 6. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 365 с.
 7. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / Под ред. Е.С. Нестерова. – М.: Триала лтд, 2016. – 378 с.
 8. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: ФГБУ «НИЦ «Планета»», 2014. – 59 с.
 9. Гидрометеорология и гидрохимия морей. – Т. IV. Каспийское море. – Вып. 1. Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 359 с.
 10. Зайцева И.С. Многолетние колебания стока Волги и глобальные изменения климата // Изв. АН РАН. Сер. географ. – 1996. – № 5. – С. 45-54.
 11. Каспийское море. – М.: Из-во МГУ, 1969. – 264 с.
 12. Клиге Р.К., Ковалевский В.С., Федорченко Е.А. Влияние глобальных климатических изменений на водные ресурсы Волжского бассейна // Глобальные изменения природной среды (климат и водный режим). – М.: Научный мир, 2000. – С. 220-236.
 13. Косарев А.Н., Никонова Р.Е. О причинах и последствиях колебаний уровня Каспийского моря в XX-XXI столетиях. // Труды ГОИН. – 2008. – Вып. 211. – С. 127-151.
 14. Лебедев С.А., Сирота А.М., Остроумова Л.П., Костяной А.Г. Расчет испарения с акватории Каспийского моря по данным дистанционного зондирования [Электронный ресурс]. – URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/18.pdf. (дата обращения 15.08.2020).
 15. Методические рекомендации по определению основных расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений – Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. – 134 с.

16. Мещерская А.В., Александрова Н.А., Голод М.П. Температурно-влажностный режим на водосборах Волги и Урала и оценка его влияния на изменения уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. – 1993. – Т 21. – № 4. – С. 463-470.
17. Никонова Р.Е. Многолетняя изменчивость составляющих водного баланса Каспийского моря и ее роль в колебаниях уровня // Материалы Всесоюзного совещания по проблеме Каспийского моря. – Гурьев, 3-5 июня, 1991.
18. Основные гидрометеорологические сведения о морях СССР. – Т.2. Каспийское море. – Вып. 1 (водный кадастр). – Л.: Гидрометеиздат, 1940. – 320 с.
19. Шикломанов И.А. Гидрологические аспекты проблемы Каспийского моря. Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 78 с.

Поступила 08.10.2020

География ғылым. канд.
PhD

Н.И. Ивкина
А.В. Галаева

КАСПИЙ ТЕҢІЗІНІҢ СУ БАЛАНСЫНЫҢ НЕГІЗГІ ҚҰРАМДАС БӨЛІКТЕРІНІҢ КЛИМАТҚА БАЙЛАНЫСТЫ ӨЗГЕРУІ

Түйін сөздер: су балансы, Каспий теңізі, өзен ағысы, булану, жауын-шашын, теңіз деңгейі

Мақалада Каспий теңізінің су деңгейінің төмендеуі мен көтерілуін сипаттайтын әр кезеңдегі су балансының негізгі элементтері қарастырылған. Олардың арақатынасы Каспий теңізі деңгейінің трансгрессия және регрессия фазаларына әсер ететіндігі көрсетілген.

N.I. Ivkina, A.V. Galayeva

CHANGES IN THE MAIN COMPONENTS OF THE CASPIAN SEA WATER BALANCE UNDER THE CLIMATE CHANGE INFLUENCE

Keywords: water balance, Caspian Sea, river flow, evaporation, precipitation, sea level

The article examines the main elements of the water balance of the Caspian Sea for different periods, characterizing the decline and rise in sea level. It is shown that their ratio affects the phases of transgression and regression of the Caspian Sea level.