

УДК 556.18.004.14

Канд. техн. наук С.П. Шиварева *

Канд. техн. наук В.И. Ли *

Канд. геогр. наук В.В. Голубцов *

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С УЧЕТОМ
ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ И В УСЛОВИЯХ
ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА***УРОВЕНЬ МОРЯ, РЕЧНОЙ СТОК, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КЛИМАТ, ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ*

В настоящее время уровень Каспийского моря достиг отметки минус 27 м. Для оценки возможного изменения уровня моря проведена серия численных экспериментов. Моделирование проводилось с использованием водобалансовой модели, двух сценариев изменения климата А2 и В2 и двух вариантов расчёта суммарного притока в море. Из приведенных результатов моделирования оба варианта не сильно отличаются друг от друга. В перспективе уровень Каспийского моря не будет превышать отметку минус 25,4 м абс. и не будет снижаться ниже отметки минус 27 м абс.

Моделирование осуществлялось с использованием водно-балансовой модели с целью оценки уровня моря на перспективу в условиях хозяйственной деятельности и изменяющегося климата. Модель позволяет рассчитывать уровни моря по стоку в водоем с учетом его изменений за счет возможных колебаний климата и водопотребления в бассейне при различных значениях эффективного испарения (испарение минус осадки) и поступления воды в залив Кара-Богаз-Гол [9, 15]. Расчет уровней водоема в этой модели производится методом последовательных приближений.

При выполнении водно-балансовых расчетов в качестве основной информации использовались сведения об уровне моря, притока воды в море, полученные путем непосредственных наблюдений. При этом уровень моря рассчитывался как среднее по данным станций Баку, Махачкала, Туркменбаши (Красноводск) и Форт Шевченко.

* Казгидромет, г. Алматы

Гидрологический режим, водный баланс и уровень Каспийского моря тесно связаны с поверхностным стоком в пределах его бассейна. В Каспийское море впадает около 160 рек, но основной объем стока приносят в море реки: Волга (до 80 %), Урал (около 5 %), Терек, Сулак, Самур (в сумме до 5 %), Кура (около 6 %). Сток рек иранского побережья, малых рек Кавказа и прочих составляет 4...5 %. Среднемноголетний годовой сток рек в море составляет около 300 км³ воды.

С конца 30-х годов 20-го века Волга начала использоваться как источник гидроэнергии. В настоящее время в бассейне Волги сосредоточено около 45 % промышленного и примерно 50 % сельскохозяйственного производства Российской Федерации (РФ). На реке построено 9 водохранилищ с гидроэлектростанциями. Начиная с 1950-х годов, началось заполнение крупнейших водохранилищ Волжско-Камского каскада, в результате за счет снижения стока Волги резко уменьшился её приток в Каспийское море. К концу 1980-х годов уменьшение притока в море за счет хозяйственной деятельности составляло уже около 40 км³/год, или 13 % нормы суммарного притока. Если с 1956 по 1975 гг. основным фактором хозяйственной деятельности, способствующим наибольшему уменьшению притока в море, были сооружение и эксплуатация водохранилищ, то уже в 1980-е годы ведущая роль принадлежала затратам воды на нужды орошения [13], затем эти затраты резко уменьшились. В бассейне Волги в 1996 г. по сравнению со средними показателями за 1986...1990 гг. они уменьшились на 21 %.

Восстановление естественного стока р. Волги в створе г. Волгоград, начиная с 1960 г., производилось путем прибавления к наблюдаемому (бытовому) стоку величины суммарного водозабора воды на хозяйственные нужды в ее бассейне за каждый год.

На рис. 1 приведена совмещенная разностная интегральная кривая восстановленных естественных и наблюдаемых (бытовых) расходов воды р. Волга – г. Волгоград, за период 1901...2010 гг., где более наглядно видна антропогенная нагрузка на речной сток рассматриваемого бассейна.

Потери воды в низовье р. Волги являются необходимым элементом при расчёте водного баланса Каспийского моря. Они состоят из потерь воды при перемещении стока по руслу на участке длиной 430 км от г. Волгограда до с. Верхнее Лебяжье и потерь воды в дельте [4]. Большинство расчетных выражений для определения величины потерь на указанном участке и в дельте реки основаны на логических построениях и прикидочных расчетах. Наиболее

обоснованными являются расчеты ежегодных потерь в низовье р. Волги, основанные на определении площадей увлажненных и покрытых водой поверхностей поймы и дельты в различные годы и испарения с водной поверхности и водной растительности с учетом выпавших атмосферных осадков.

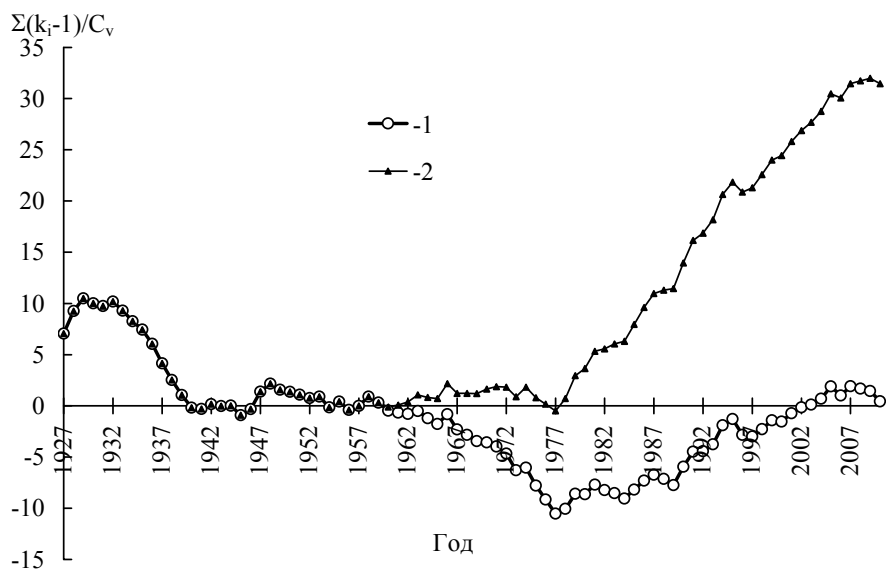


Рис. 1. Совмещенная разностная интегральная кривая 1 – наблюдаемого (бытового) и 2 – естественного (восстановленного) стока р. Волга – г. Волгоград за период 1927...2010 гг.

Такая работа была выполнена в Государственном гидрологическом институте (ГГИ – г. Санкт Петербург) Шикломановым И.А. и Кожевниковым В.П., в которой впервые были определены потери в низовьях р. Волги за 1936...1970 гг. [14]. Значительно позже аналогичная работа была выполнена Голубевым В.С. и Цыценко К.В. за 1952...1990 гг. [8]. При определении потерь в низовье Волги в указанных работах были использованы результаты непосредственных наблюдений за испарением в пойме и дельте реки. Эти данные были использованы нами для оценки изменения стока в низовье р. Волги. Проведенные исследования показали, что основными факторами, определяющими изменение стока в пойме реки, являются: объем воды р. Волги в створе г. Волгоград и характеристика неравномерности его распределения внутри года. В качестве характеристики неравномерности распределения стока внутри года использован коэффициент вариации C_v месячных значений стока [2].

Математические выражения для определения изменений стока в дельте р. Волги имеют вид:

$$\Delta V_{\Pi} = \frac{0,02V_E}{2,5 - C_v} \quad (1)$$

и

$$\Delta V_D = \frac{0,003WV_E}{2 - C_v}, \quad (2)$$

где ΔV_{Π} – изменение стока в пойме на участке г. Волгоград – с. Верхнее Лебяжье, км³/год; ΔV_D – изменение стока в дельте, км³/год; W – площадь дельты, 10³ км²; V_E – объем годового стока р. Волги у г. Волгограда, км³/год; C_v – коэффициент вариации месячного стока у г. Волгограда за отдельные годы.

Несмотря на значительные различия в оценке границ и размеров дельты, удалось установить зависимость ее площади от уровня моря [4]:

$$W = \frac{20}{1 + \exp[0,67(Z + 35) - 5,97]}, \quad (3)$$

где W – площадь дельты р. Волги, 10³ км²; Z – уровень моря, м.

Подставив в выражение (2) значение W из уравнения (1), получим:

$$\Delta V_D = \frac{0,06V_E}{(2 - C_v)\{1 + \exp[0,67(Z + 35) - 5,97]\}}. \quad (4)$$

Сток из дельты р. Волги в Каспийское море может быть определен по выражению:

$$V_D = V_E - \Delta V_{\Pi} - \Delta V_D, \quad (5)$$

где V_D – сток из дельты р. Волга в Каспийское море, км³/год.

Река Урал берет начало на Южном Урале (хребет Уралтау) на территории РФ. Река протекает по территории России (Башкортостан, Челябинская и Оренбургская области), Казахстана (Западно-Казахстанская и Атырауская области) и впадает в Каспийское море.

Сток р. Урал, поступающий в Каспийское море, измеряется в створе г. Атырау (г. Гурьев). Восстановление естественного стока р. Урал в створе г. Атырау производилось с помощью зависимости его значений от стока р. Урал в створе с. Махамбет за период 1936...1956 гг..

До конца 1920-х годов сток Урала в Каспий осуществлялся по двум основным рукавам дельты (Яик и Урал) и их многочисленным боковым ответвлениям (ерикам). Свободный выход воды в море, небольшие размеры самой дельты и короткий период ее заливания (не более месяца в

многоводные годы) не способствовали формированию здесь сколько-нибудь ощутимых затрат стока. Понижение уровня моря и увеличение водозабора из Урала обусловили заметное понижение уровня воды в дельте, которое привело к сосредоточению стока в главных рукавах и отмиранию боковых ериков — они стали тупиковыми. В устьевой области р. Урал формируются значительные объемы потерь стока, которые заметно уменьшают приток в Каспийское море. Их образование происходит под влиянием как естественных, так и антропогенных факторов [7]. Согласно [7], за 1936...1990 гг. потери в дельте составили около $0,4 \text{ км}^3/\text{год}$.

Учет стока р. Урал в море тесно связан с оценкой его потерь в низовье реки. Потери стока непосредственно в дельте до недавнего времени не определялись. В 1950...1960 гг. антропогенные потери стока в устьевой области Урала не превышали 20 % его суммарного объема [15]. В последующем, влияние хозяйственной деятельности возросло, и с середины 1970-х годов потери здесь зависели, в основном, от водозабора на орошение и водоснабжение [13]. На транзитном участке от с. Кушум до с. Махамбет за период 1961...2005 гг. уменьшение стока составило $0,97 \text{ км}^3/\text{год}$. На участке Махамбет – Атырау за этот же период потери стока составили $0,45 \text{ км}^3/\text{год}$.

Интенсивное расширение орошаемого земледелия на районы, прилегающие к Каспийскому морю (в пределах республик СССР), продолжалось примерно до конца 1970-х – начала 1980-х годов прошлого столетия, затем темпы его резко замедлились. С распадом СССР и затяжным социально-экономическим кризисом водопотребление в хозяйственных целях стало снижаться. В бассейне Волги в 1996 г. по сравнению со средними показателями за 1986...1990 гг. оно уменьшилось на 21 %, в бассейне Сулака – на 26 %, а в бассейне Терека – на 40 %. Водопотребление из рек побережья Ирана оставалось устойчивым [13].

Суммарное поступление поверхностных вод в Каспийское море складывается из стока рек Волга, Урал, рек Кавказского побережья (Кура, Терек, Сулак и Самур), стока рек Иранского побережья и Междуречья западного берега моря. Из площади бассейна Каспийского моря, равной примерно 3 млн. км^2 , речной сток поступает с водосборной площади около 2 млн. км^2 .

Наиболее длительные наблюдения за стоком на гидропостах имеются по рекам: Волга, Урал и некоторым рекам Кавказского побережья. По оценкам, выполненным в ГГИ [7], суммарный приток в низовья каспийских рек за период 1936...1996 гг. составил в среднем $302 \text{ км}^3/\text{год}$;

сток в море составил 277 км³/год. Из этого значения на долю Волги приходится 83 %, а на долю Куры – 6 %. Реки побережья Ирана доносят до моря 10,7 км³/год, или около 4 %. Суммарный сток рек Волга и Урал составляет 85,2 %, доля рек Кавказского побережья – более 10 %, около 4 % – составляют реки побережья Ирана, а реки Междуречья западного берега – 0,4 % (табл. 1).

Таблица 1
Распределение суммарного стока в море, в % (по данным ГГИ)

Река	Приток из зоны формирования, км ³	Потери в нижнем течении		Приток в море	
		км ³	%	км ³	доля, в %
Волга	242	13,7	5,7	229	82,6
Урал	8,7	1,5	17,1	7,2	2,60
Терек	9,1	2,4	25,8	6,8	2,45
Сулак	5,5	1,3	24,2	4,2	1,51
Самур	2,0	0,3	15,1	1,7	0,61
Кура*	16,0	0,4	2,7	16,6	5,98
Побережье Ирана	16,1	5,4	33,4	10,7	3,86
Междуречье западного берега	2,3	1,1	47,8	1,2	0,43
Всего	302	26,1	8,6	277,4	100,0

Примечание: * Для Куры расчет по створу г. Сальяны, приток в море с учетом коллекторов (1,3 км³/год).

Что же касается непосредственного учета стока в море, то регулярные его измерения в устьях либо совсем отсутствуют (Волга, Самур), либо имеются только за непродолжительный период (Урал, Кура, Сулак) и не по всем водотокам дельт (Терек). В связи с удаленностью гидростворов, непродолжительностью наблюдений на них возникла необходимость применения расчетных методов для оценки стока и его потерь не только в дельтах, но и в пределах придельтовых участков.

За период с 1880 по 1993 гг. для оценки притока воды в море использовались данные ГГИ, с 1994 по 2009 гг. – данные Лаборатории изучения морей Государственного океанографического института (ГОИН), опубликованные в Гидрологических Ежегодниках и статьях отдельных авторов (табл. 2) [3, 6, 7, 8, 10, 14].

Наибольший вклад в суммарный приток дает р. Волга. В среднем за период 1880...1996 гг. на долю Волги приходилось 83 % общего притока. Следует отметить, что относительный вклад Волги в приток к морю увеличился от 83 % в первой половине столетия до 85 % в 1980...1990-е годы [13].

Таблица 2

Суммарный приток поверхностных и подземных вод в Каспийское море

Год	Приток в море, км ³ /год	Год	Приток в море, км ³ /год	Год	Приток в море, км ³ /год
1880	328	1925	291	1970	303
1885	294	1930	254	1975	181
1890	259	1935	235	1980	283
1895	357	1940	242	1985	328
1900	303	1945	250	1990	368
1905	304	1950	269	1995	322
1910	206	1955	293	2000	297
1915	356	1960	238	2005	338
1920	240	1965	257	2010	267

Это связано, прежде всего, с тем, что в бассейнах рек западного и иранского побережья относительное влияние хозяйственной деятельности на их годовой сток в течение рассматриваемого периода времени было выше, чем в бассейне Волги. С 2001 г. для оценки стока использованы данные за стоком Волги в створе с. Верхнее Лебяжье, состоящие из стока Волги в основном ее русле, Волго-Ахтубинской пойме и рукаве Ахтуба.

Для оценки стока р. Урал в море использованы данные в створе с. Кушум и г. Атырау. В устьевой области р. Урал формируются значительные объемы потерь стока, которые заметно уменьшают приток в Каспийское море. Их образование происходит под влиянием как естественных, так и антропогенных факторов.

Потери стока в устьевой области р. Урал по оценкам ГГИ, полученным по зависимостям между расходами воды в створах Махамбет (Тополи) – Атырау, Атырау – устья рукавов за период 1936...1996 гг. составили 1,5 км³/год. По выполненным нами расчетам за период 1980...2009 гг. они увеличились и составили 2,55 км³/год.

Согласно исследованиям Г.Ю. Фатуллаева водные ресурсы рек северо-восточного склона Кавказа составляют 0,9 км³/год [12]. Потери их стока происходят за счет естественной фильтрации и водозабора на хозяйственные нужды. По расчетам азербайджанских ученых [1], затраты стока здесь составляют около 60 % водных ресурсов (0,54 км³/год), а приток в море равен 0,36 км³/год. В Ленкорани, по данным [12], из 1 км³/год ресурсов поверхностных вод, моря достигает примерно 0,65 км³/год.

Потери стока в устьевых областях водотоков по оценкам составляют 26 км³/год, или примерно 9 % суммарного стока, поступившего в эти

районы. В низовьях Волги расходуется 53 % всех затрат поверхностных вод, а в дельтовых равнинах Ирана – 17 %.

Так как наблюдения за стоком рек Кавказа носят эпизодический характер или имеются периоды с отсутствием наблюдений, а за последний период их получить достаточно сложно, возникла необходимость определения суммарного поступления стока в море по данным на основе использования суммарного стока рек Волга и Урал. Сток рек Кавказского и Иранского побережий, а также Междуречья западного берега рассчитан на основе суммарного стока рек Волги и Урала.

На основании соотношений притока в море различных рек приведенных выше, были получены уравнения для определения суммарного стока рек Кавказского побережья моря (W_K) за период 2001...2010 гг.:

$$W_K = 0,105 \cdot \left(\frac{1,0}{0,876} \right) \cdot (W_B + W_V), \quad (6)$$

где W_B – сток р. Волги, км³/год; W_V – сток р. Урал, км³/год.

Суммарный сток рек Иранского (W_{II}) побережья может быть определен с помощью следующего уравнения:

$$W_{II} = 0,032 \cdot \left(\frac{1,0}{0,876} \right) \cdot (W_B + W_V). \quad (7)$$

Общий сток рек междуречья западного берега ($W_{ЗБ}$) может быть определен с помощью следующего уравнения:

$$W_{ЗБ} = 0,0046 \cdot \left(\frac{1,0}{0,876} \right) \cdot (W_B + W_V). \quad (8)$$

В этих условиях сток р. Урал в море может быть принят равным 2,6 %, сток рек Кавказского побережья – 9,2 %, сток Иранского побережья – 2,8 %, сток Междуречья западного берега – 0,4 %.

В табл. 3 приведены данные по стоку рек, впадающих в Каспийское море, с учетом притока подземных вод в размере 4 км³/год за 2001...2010 гг.

Сопоставление средних значений суммарного притока в море, приведенных в табл. 3 с данными ГОИН за 2001...2009 гг. показывает, что они составляют соответственно 301 км³/год и 298 км³/год. Это указывает на то, что приведенная расчетная схема может быть использована при оценке притока в море на ближайшую перспективу.

Таблица 3

Поступление речных и подземных вод в Каспийское море за
2001...2010 гг., км³/год

Год	Река		Сток Кавказских рек	Сток Иранских рек	Сток рек Западного берега	Подземный сток в море	Суммарный сток в море
	Волга	Урал					
2001	273	9,15	33,8	10,3	1,48	4,00	332
2002	254	11,3	31,8	9,69	1,39	4,00	312
2003	243	8,00	30,1	9,19	1,32	4,00	296
2004	255	8,60	31,6	9,64	1,39	4,00	311
2005	280	8,69	34,7	10,6	1,52	4,00	340
2006	200	2,28	24,2	7,37	1,06	4,00	238
2007	276	7,12	34,0	10,4	1,49	4,00	333
2008	228	4,61	27,9	8,50	1,22	4,00	274
2009	228	5,75	28,0	8,53	1,23	4,00	275
2010	194	5,03	23,9	7,28	1,05	4,00	236

Безвозвратное водопотребление речного стока является основным фактором сокращения суммарного стока воды в море и понижения его уровня. Для оценки безвозвратного водопотребления в бассейне р. Волги за период с 1955 по 2010 гг. использованы данные ГГИ [6]. В бассейне р. Урал водопотребление рассчитывалось как разность восстановленного естественного и наблюдаемого (бытового) стока.

Для оценки безвозвратного водопотребления в бассейнах рек Терек и Сулак были использованы данные, приведенные в работе [6]. Для бассейнов рек Кура и Самур его величина определялась на основе отрывочных сведений, приведенных в работе В.Ю. Георгиевского и др. [7]. Для уровня 1960 г. оно было принято равным 0,2 км³, для уровня 1971 г. – 0,25 км³. Наиболее надежные сведения о безвозвратном водопотреблении в бассейнах этих рек имеются для уровня 1985 г., в котором оно составило 1 км³ в год. Для реки Самур безвозвратное водопотребление на уровне 1960 г. принималось равным 0,2 км³, для уровня 1980...1985 гг. оно было равным 0,5 км³. Начиная с 1985 г., водопотребление рек Куры и Самура рассчитывалось в соответствии с его динамикой в бассейнах рек Терек и Сулак. Для этого для 1985 г. определялось отношение водопотребления рек Терек и Сулак к суммарному водопотреблению рек Кура, Терек, Сулак и Самур. Оно оказалось равным 0,87. Суммарное водопотребление указанных рек в дальнейшем определялось путем деления водопотребления рек Терек и Сулак на указанный коэффициент 0,87.

Водопотребление в бассейнах рек Иранского побережья из-за отсутствия достоверных данных на данном этапе расчетов во внимание не принималась.

В результате суммирования безвозвратного водопотребления стока указанных рек была определена его суммарная величина для бассейна Каспийского моря (рис. 2).

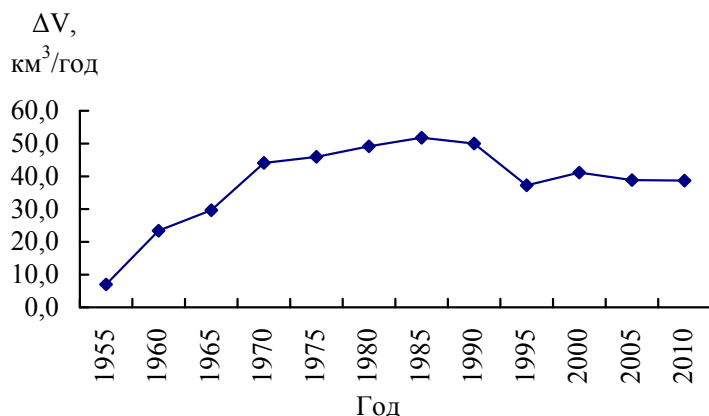


Рис. 2. Суммарное безвозвратное водопотребление стока речных вод, впадающих в Каспийское море, за период 1955...2010 гг.

В начальный период водопотребления, наблюдавшегося в 50-х годах прошлого века, оно было принято изменяющимся от 7,0 км³ в 1955 г. до 23,4 км³ в 1960 г. Начиная с 60-х годов, водопотребление значительно увеличивалось и достигло своего наибольшего значения в середине 80-х годов прошлого века. Начиная с 90-х годов прошлого века, водопотребление в хозяйственных целях стало снижаться в связи с сокращением посевных площадей и экономическим кризисом в Прикаспийском регионе. В первом десятилетии 21-го века суммарное безвозвратное водопотребление в бассейне Каспийского моря сократилось до 31...33 км³ в год.

Используя воднобалансовую модель, выполнены расчёты уровня Каспийского моря по измеренному стоку (бытовому) и по суммарному речному стоку (естественный) за вычетом водопотребления в бассейнах впадающих в море рек (рис. 3). На рис. 3 видно, что в случае отсутствия водопотребления в бассейне уровень Каспийского моря может достигать высоких значений (минус 24 м).

В последние десятилетия отмечаются существенные изменения климата, которые в значительной мере влияют на водные ресурсы. В связи с этим возникла необходимость определения суммарного стока рек, впадаю-

щих в Каспийское море, на перспективу до 2035 г. В данной работе использовано два варианта определения суммарного стока. В первом варианте применялись климатические модели для расчёта осадков и коэффициента стока. Во втором варианте речной сток рассчитывался с использованием методики Борзенковой И.И. [5].

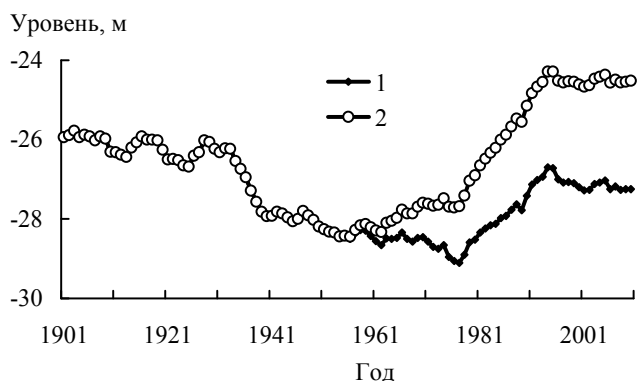


Рис. 3. Многолетний ход моделированных уровней Каспийского моря. 1 – бытовой (измеренный), 2 – естественный (без водопотребления).

Вариант первый. Оценка среднего значения притока речных вод на перспективу в Каспийское море по р. Волге производилась путем использования среднего многолетнего коэффициента стока, определенного за период 1980...1999 гг. Для этого были использованы осадки, расчёт которых был произведен с использованием программного комплекса MAGICC/SCENGEN (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change/SCENario GENerator, version 5.3.v2) по данным ансамбля из 9 моделей.

Будущие изменения количества осадков рассматриваются для двух сценариев SRES («Special report on emission scenarios» – Специальный доклад МГЭИК о сценариях выбросов): A2 и B1 (Nakicenovic et al., 2000), и для временного периода 2006...2035 гг., осредненного за 30 лет по отношению к базовому климатическому периоду 1980...1999 гг. Осадки в бассейне р. Волги за базовый период (1980...1999 гг.) составляют 547 мм, на перспективу (2006...2035 гг.) по сценарию A2 – 547 мм, а по сценарию B2 – 558 мм. Естественный сток р. Волги для замыкающего створа – г. Волгоград оказался равным 9264 м³/с, а среднемноголетний коэффициент стока – 0,39. Использование среднего многолетнего коэффициента стока позволило рассчитать средний сток на перспективу (2006...2035 гг.), который по сценарию A1 равен 9264 м³/с, а по сценарию B2 – 9450 м³/с.

Далее, используя процедуру нормирования стока, был определен сток р. Волги в створе г. Волгоград за каждый год, начиная с 2006 г. и по 2035 г. по (9).

$$Q_i = Q_{cp} + \alpha \cdot \sigma, \quad (9)$$

где α – параметр нормирования, равен:

$$\alpha = \frac{(Q_i - Q_{cp})}{\sigma}, \quad (10)$$

где Q_i – расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$), приведенные в табл. 4 (графы 2 и 5); Q_{cp} – среднееголетние расходы воды ($\text{м}^3/\text{с}$), σ – среднеквадратическое отклонение. Q_{cp} для естественного периода принято равным $9264 \text{ м}^3/\text{с}$, а $\sigma = 1197$.

Таблица 4

Определение параметра α для процедуры нормирования естественного стока р. Волга – г. Волгоград

Год	Сток, $\text{м}^3/\text{с}$	α	Год	Сток, $\text{м}^3/\text{с}$	α
1	2	3	4	5	6
1980	8935	-0,27	1995	9672	0,34
1981	10406	0,95	1996	6465	-2,34
1982	8232	-0,86	1997	8519	-0,62
1983	8625	-0,53	1998	9811	0,46
1984	8257	-0,84	1999	9995	0,61
1985	10361	0,92	2000	8563	-0,59
1986	10376	0,93	2001	9923	0,55
1987	9883	0,52	2002	9517	0,21
1988	8409	-0,71	2003	9081	-0,15
1989	8106	-0,97	2004	9491	0,19
1990	11638	1,98	2005	10424	0,97
1991	11150	1,58	2006	7322	-1,62
1992	8951	-0,26	2007	9967	0,59
1993	9856	0,49	2008	8288	-0,82
1994	11554	1,91	2009	8279	-0,82

Сток р. Волга – г. Волгоград за период 2006...2035 гг. был восстановлен для двух различных сценариев смоделированных осадков с учётом среднееголетнего стока рассматриваемой реки (табл. 5).

Восстановление значений естественного стока на перспективу до 2035 г. из дельты р. Волги в Каспийское море производилось по уравнениям (1...5). Сток р. Волги в Каспийское море на перспективу до 2035 г. рассчитывался как разность восстановленного естественного стока и водозабора.

Естественный годовой сток р. Волга – г. Волгоград (Q_i), восстановленный на перспективу до 2035 г. по двум сценариям

Год	Сценарий В1	Сценарий А2	Год	Сценарий В1	Сценарий А2
	$Q_{cp} = 9264 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{cp} = 9450 \text{ м}^3/\text{с}$		$Q_{cp} = 9264 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{cp} = 9450 \text{ м}^3/\text{с}$
2011	10361	10548	2024	9811	9998
2012	10376	10562	2025	9995	10182
2013	9883	10070	2026	8563	8749
2014	8409	8595	2027	9923	10109
2015	8106	8293	2028	9517	9703
2016	11638	11824	2029	9081	9267
2017	11150	11336	2030	9491	9678
2018	8951	9137	2031	10424	10610
2019	9856	10043	2032	7322	7508
2020	11554	11741	2033	9967	10154
2021	9672	9858	2034	8288	8475
2022	6465	6652	2035	8279	8465
2023	8519	8705			

Для оценки стока р. Урал, поступающего в Каспийское море, в начале был определен сток этой реки в основной зоне его формирования – у с. Кушум. Для этого были использованы осадки, расчёт которых был произведен с использованием сценарных прогнозов климата программного комплекса MAGICC/SCENGEN. Будущие изменения количества осадков рассчитаны в соответствии с двумя сценариями выбросов парниковых газов SRES: А2 и В1 для временного периода 2006...2035 гг., осредненного за 30 лет по отношению к базовому климатическому периоду 1980...1999 гг.

Имея значение смоделированных осадков за период 2006...2035 гг., а также среднееголетний коэффициент стока, рассчитанный за период 1980...1999 гг. и равный 0,15, был восстановлен средний естественный сток р. Урал за период 2006...2035 гг. Сток Урала на перспективу до 2035 г. восстанавливался как разность естественного восстановленного стока и средней величины водопотребления в бассейне, равной $64,3 \text{ м}^3/\text{с}$. Восстановление стока Кавказских, Иранских рек, а также рек западного побережья рассчитывалось в зависимости от суммарного восстановленного на перспективу стока рек Волга и Урал по уравнениям (6...8). На перспективу до 2035 г подземный сток в Каспийское море был принят равным 4 км^3 .

В табл. 6 приведен суммарный приток речного стока в Каспийское море, рассчитанный на перспективу до 2035 г. с учётом изменения климата (естественный) и с учётом водопотребления (бытовой).

Таблица 6

Суммарное поступление стока рек в Каспийское море на перспективу до 2035 г, (км³) по сценариям А2 и В1

Год	Водопотребление, км ³	Сценарий А2		Сценарий В1	
		естественный	бытовой	естественный	бытовой
2006	37,6	325	287	332	294
2007	43,6	390	346	396	353
2008	38,7	303	265	310	271
2009	34,8	314	280	321	286
2010	38,7	304	265	311	272
2011	38,3	379	341	386	348
2012	37,8	378	339	385	346
2013	39,1	363	324	370	331
2014	39,4	309	270	316	276
2015	39,8	297	257	304	264
2016	40,2	429	388	436	395
2017	40,7	406	366	413	373
2018	41,2	326	285	333	292
2019	41,6	367	325	374	332
2020	42,1	425	383	432	390
2021	42,5	352	309	359	316
2022	43,0	238	195	245	202
2023	43,5	312	268	319	275
2024	43,9	360	316	367	323
2025	44,4	363	319	370	326
2026	44,9	320	275	326	282
2027	45,3	365	319	371	326
2028	45,8	354	308	361	315
2029	46,2	333	286	340	293
2030	46,7	349	302	356	309
2031	47,2	383	336	390	343
2032	47,6	267	219	274	226
2033	48,1	368	320	375	327
2034	48,5	303	255	310	261
2035	49,0	301	252	308	259
Среднее	42,7	343	300	350	307

Результаты проведенных исследований показали, что средний приток в море на перспективу до 2035 г. может составить 300 км³ для сценария А2 и 307 км³ для сценария В1.

На рис. 4 показаны результаты моделирования уровней по притоку в море в условиях современного климата и по притоку, рассчитанному по варианту 1 с учетом антропогенного изменения климата согласно сценариям А2 и В1 на перспективу до 2035 г.

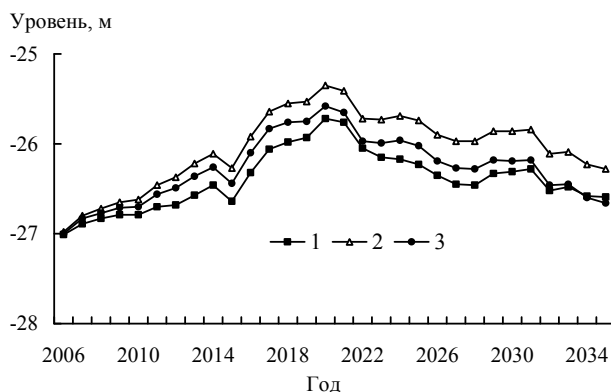


Рис. 4. Вероятные изменения фонового уровня Каспийского моря (м БС) на перспективу до 2035 г. (вариант 1). 1 – моделированный уровень с учетом хозяйственной деятельности в условиях современного климата, 2 – моделированный уровень (сценарий А2), 3 – моделированный уровень (сценарий В1).

График, приведенный на рис. 4 показывает, что в случае если антропогенные изменения климата будут развиваться в соответствии со сценарием А2, то уровень моря будет повышаться до отметки минус 25,4 м в период до 2020...2021 гг., затем он станет ниже этой отметки с последующей тенденцией к стабилизации к 2034...2035 гг. на отметке близкой к минус 26,0 м.

Если же антропогенные изменения климата будут развиваться в соответствии со сценарием В1 – уровень моря будет повышаться до отметки минус 25,90 м к 2020 г., затем он станет ниже этой отметки с последующей тенденцией к стабилизации к 2034...2035 гг. на отметке, близкой к минус 27 м.

Как сказано выше, в данном исследовании проведен расчет изменения притока с речными водами р. Волги и общего стока в Каспийское море в двух вариантах. По варианту 2 сток в море рассчитывался по методике Борзенковой И.И. В основу этой методики положен комплексный метод расчета испаряемости и испарения с поверхности суши, разработанный Будыко М.И., с помощью которого можно рассчитать все основные составляющие теплового и водного баланса путем использования широко распространенной гидро-

метеорологической информации. В работе Борзенковой И.И. [5] проведена оценка составляющих водного баланса р. Волги при глобальном потеплении климата, параметры которого были определены путем использования палеоклиматической информации. Значения этих составляющих водного баланса рассчитаны ею по данным 30 метеорологических станций, расположенных в бассейне Волги. Модель, разработанная автором, может быть использована и при других параметрах изменения температуры воздуха и атмосферных осадков. Эти параметры могут быть получены с помощью указанных выше моделей общей циркуляции атмосферы. Представим рассматриваемую модель Борзенковой И.И. в виде уравнения для расчета отклонений годового испарения в бассейне р. Волга при антропогенном изменении климата от его значений при современных условиях в зависимости от изменений годовой температуры воздуха и годовых сумм осадков в ее бассейне:

$$\Delta E = \Delta T [A_1 (\Delta P / \Delta T)^m + B_1], \quad (11)$$

где $A_1 = 0,0208$; $B_1 = 2,2$; $m = 1,8608$ – эмпирические параметры.

Из уравнения водного баланса за многолетний период ΔR равно:

$$\Delta R = \Delta P - \Delta E. \quad (12)$$

Подставив (11) в (12) получим

$$\Delta R = \Delta P - \Delta T [A_1 (\Delta P / \Delta T)^m + B_1]. \quad (13)$$

Изменение объема стока р. Волга, как известно, может быть определено с помощью выражения:

$$\Delta W_V = \Delta R \cdot S \cdot 10^6, \quad (14)$$

где ΔW_V – изменение стока, км³/год; S – площадь водосбора, равная 1 360 000 км².

Изменение суммарного речного стока в Каспийское море будет равно:

$$\Delta W = K \Delta R \cdot S \cdot 10^6, \quad (15)$$

где ΔW – суммарный речной сток в Каспийское море, км³/год, $K = 1,25$, при условии, что среднемноголетнее значение стока Волги составляет 80 % от суммарного стока в Каспийское море.

В табл. 7 приведены результаты расчета изменения речного стока в Каспийское море по методике Борзенковой И.И. при изменении климата.

Результаты моделирования уровня Каспийского моря по стоку, рассчитанному по методике Борзенковой И.И., представлены на рис. 5.

Кривые, приведенные на рис. 5 и построенные по стоку, рассчитанному по методике Борзенковой И.И. показывает, что в случае если антропогенные изменения климата будут развиваться в соответствии со сценарием А2, то уровень моря будет повышаться до отметки минус 25,7 м к 2022 г., затем он станет ниже этой отметки с последующей тенденцией к стабилизации к 2034...2035 гг. на отметке, близкой к минус 26,0 м.

Таблица 7

Изменение речного стока в Каспийское море при изменении климата

Изменения	Сценарии изменения климата	
	А2	В1
Температура воздуха ΔT , °С	1,52	2,31
Осадки ΔP , мм	11,78	1,89
$\Delta P/\Delta T$, мм/°С	7,75	0,82
Суммарное испарение ΔE , мм/год	4,77	5,11
Общий сток ΔR , мм/год	7,00	-3,22
Объем стока р. Волги ΔW_v , км ³ /год	9,52	-4,38
Суммарный речной приток ΔW , км ³ /год	11,9	-5,48

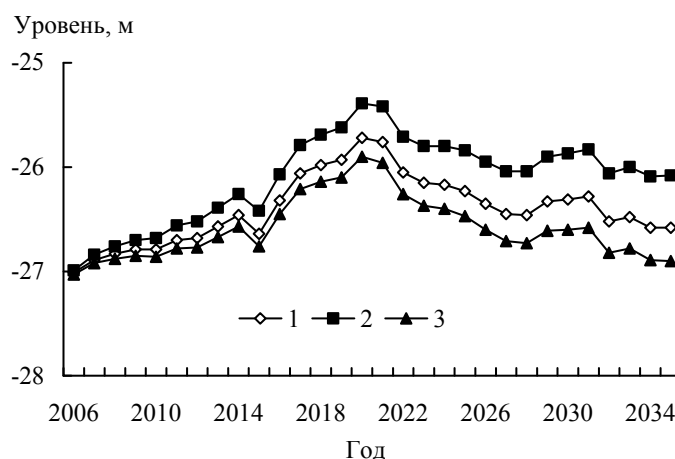


Рис. 5. Вероятные изменения фонового уровня Каспийского моря (м БС) на перспективу до 2035 г. (вариант 2). 1 – моделированный уровень с учетом хозяйственной деятельности в условиях современного климата; 2 – моделированный уровень (сценарий А2); 3 – моделированный уровень (сценарий В1).

Если же антропогенные изменения климата будут развиваться в соответствии со сценарием В1 – уровень моря будет повышаться до отметки минус 26,26 м к 2022 г., затем он станет ниже этой отметки с последующей тенденцией к стабилизации к 2034...2035 гг. на отметке близкой к минус 27,0 м.

Как видно из приведенных результатов моделирования оба варианта не сильно отличаются друг от друга. В перспективе уровень Каспийского моря не будет превышать отметку минус 25,4 м абс. и не будет ниже отметки минус 27 м абс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азимов С. А., Махмудов Р. Н. Запасы речных вод на устьевых участках рек северо-восточного склона Большого Кавказа. / В сб.: Вопросы гидрометеорологии Каспийского моря и устьев рек. Вып. 1. Часть 1. – Баку: изд. АЗУГКС, 1988. – С.133-136.
2. Актуальные проблемы гидрометеорологии озера Балхаш и Прибалхашья / Под ред. Скоцеляса И.И. – СПб.: Гидрометеиздат, 1995. – 269 с.
3. Байдин С.С. Сток и уровни дельты Волги. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 335 с.
4. Байдин С.С., Линберг Ф.Н., Самойлов Н.В. Гидрология дельты Волги. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 331 с.
5. Борзенкова И.И. Влияние возможных изменений климата на осадки, испарение и сток в бассейне р. Волги. / Сб. «Анализ изменений уровня Каспийского моря технико-экономического доклада по защите народно-хозяйственных объектов и населенных пунктов прибрежной полосы Каспийского моря в пределах Дагестана, Калмыкии и Астраханской области». – М.:1992. – С. 494-537.
6. Водные ресурсы России и их использование. / Под редакцией профессора И.А. Шикломанова. – СПб.: ГГИ, 2008. – 598 с.
7. Георгиевский В.Ю., Цыценко К.В., Шалыгин А.Л. Оценка притока поверхностных вод в Каспийское море. / В кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб.: Гидрометеиздат, 2003. – С. 217-229.
8. Голубев В.С., Цыценко К.В. Структура и динамика потерь речного стока в низовьях Волги // Метеорология и гидрология. – 1995. – №8. – С. 85-93.
9. Голубцов В.В., Ли В.И. О расчете уровней Каспийского моря на перспективу с учетом возможных изменений климата // Гидрометеорология и экология. – 1995. – №1. – С. 28-38.
10. Полонский В. Ф., Горелиц О. В., Остроумова Л. Н. Особенности водного режима дельт Волги и Урала в условиях повышения уровня Каспия. // Водные ресурсы. – 1997. – Т. 24, № 4. – С. 430-436.

11. Тленбеков О.К. Распределение стока по водотокам и будущее дельты Урала. // Труды ГОИН. – 1967. – Вып. 89. – С. 125-139.
12. Фатуллаев Г. Ю. Водный режим Азербайджана и антропогенные факторы. // Труды ИГ АН Азербайджана. – 1999. – Т. 11. – С. 283-287.
13. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние хозяйственной деятельности на баланс и изменение уровня Каспийского моря. / В кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. – СПб.: Гидрометеоздат, 2003. – С. 267-277.
14. Шикломанов И.А., Кожевников В.П. Потери стока в Волго-Ахтубинской пойме и дельте и их изменение под влиянием хозяйственной деятельности // Труды ГГИ. – 1974. – Вып. 221. – С. 3-46.
15. Golubtsov V.V., Lee V.I. The method of prospective calculation (probability forecast) of the Caspian Sea level taking into consideration possible changes in climate, water consumption in its basin and runoff into Kara-Bogaz-Gol Bay, Proceedings of the world Coast Conference in Nordwijk, the Netherlands, November, 1993, Vol 2. – p. 885-886.

Поступила 21.02.2013

Техн. ғылымд. канд.	С.П. Шиварева
Техн. ғылымд. канд.	В.И. Ли
Геогр. ғылымд. канд.	В.В. Голубцов

СУ ПАЙДАЛАНУ МЕН КЛИМАТТЫҢ ӨЗГЕРУ ЖАҒДАЙЛАРЫН ЕСКЕРЕ ОТЫРЫП КАСПИЙ ТЕҢІЗІ ДЕҢГЕЙІН МОДЕЛДЕУ

Қазіргі уақытта Каспий теңізінің деңгейі минус 27 м белгіге жетті. Теңіз деңгейінің өзгеру мүмкіншілігін бағалау үшін сандық тәжірбиелер сериясы жүргізілді. Моделдеу су балансты моделін қолданумен жүргізілді, климаттың өзгеруін А2 және В2 екі сценариінде және теңізге түсетін сомалық саланы екі нұсқада есептелінді. Келтірілген нәтижелерден моделдеудің екі нұсқасында айтарлықтай айырмашылықтар жоқ. Келешекте Каспий теңізі деңгейі минус 25,4 м абс аспайды және минус 27 м абс түспейді.