

УДК 551.461.25 (465.75)

**О ВЛИЯНИИ АНТРОПОГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА
УРОВЕНЬ КАСПИЙСКОГО МОРЯ**

Канд. геогр. наук В.В. Голубцов

Канд. техн. наук В.И. Ли

Канд. геогр. наук В.П. Попова

Рассмотрены характеристики стока р. Волга и уровня Каспийского моря при антропогенном изменении климата в первой половине XXI века. Для оценки возможных изменений температуры воздуха и атмосферных осадков использовались равновесные и трансиентные модели общей циркуляции атмосферы. Показано, что при изменении климата, которое ожидается в середине XXI века, уровень моря может увеличиться на 5 м по отношению к его современному значению (минус 27 м) и достигнуть отметки минус 22 м, наблюдавшейся в начале XIX века.

Введение

Каспийское море - крупнейший бессточный водоем земного шара. Его водная поверхность занимает более 390 тыс. км², а площадь водосбора составляет около 3,1 млн. км², из которой 29,4% приходится на бессточные области. Общая протяженность береговой линии Каспия равна 7 тыс. км, в том числе в пределах территории Казахстана около 2,3 тыс. км. В море впадают реки Волга, Кура, Урал, Терек, Сулак, Самур и ряд мелких притоков, большинство которых доносит свои воды только в многоводные годы. Для Каспийского моря характерны квазипериодические (циклические) колебания уровня, которые в основном обусловлены климатическими факторами. Амплитуда этих колебаний за последние 450-500 лет составляет около 7 м.

Изменение уровня Каспийского моря за единицу времени, как известно, описывается уравнением водного баланса:

$$\Delta Z = W / \omega(Z) + W_g / \omega(Z) + P - W_{\text{кбр}} / \omega(Z) - E, \quad (1)$$

где ΔZ - изменение уровня моря; W - объем речного стока в море; W_g - объем подземного стока в море; P - слой осадков, выпадающих на поверх-

ность моря; $W_{\text{кг}}$ – объем воды поступающий из моря в залив Кара – Богаз - Гол; E - слой воды испаряющейся с поверхности моря; $\omega(Z)$ – площадь моря, определяемая в зависимости от его уровня.

Исследовательская модель

В Казахском научно-исследовательском институте мониторинга окружающей среды и климата (КазНИИМОСК) была разработана модель расчета уровня моря, в основу которой положено уравнение водного баланса водоема. Эта модель, реализованная на персональном компьютере, позволяет рассчитывать уровни моря по стоку в водоем с учетом его изменений за счет возможных колебаний климата и изменения водопотребления в бассейне при различных значениях эффективного испарения (испарение минус осадки) и поступления воды в залив Кара-Богаз-Гол [2]. При проведении исследований и выполнении водно-балансовых расчетов в качестве основной информации использовались сведения об уровне моря за 1556 - 1829 гг., восстановленные по-историческим и другим источникам в середине текущего столетия, и за 1830 - 1998 гг. - полученные путем непосредственных наблюдений.

Расчетные характеристики уровня Каспийского моря являются исходными при проектировании гидротехнических сооружений, а также промышленных и хозяйственных объектов в прибрежной зоне. Этому вопросу обычно уделяется первостепенное внимание потому, что использование в проектных проработках недостаточно обоснованных отметок уровня моря может привести и часто приводит к значительным дополнительным затратам, оцениваемым в десятки и сотни миллионов долларов. Поэтому было необходимо обеспечить проектные и строительные организации достаточно обоснованными данными о высоких уровнях моря редкой повторяемости.

Исследования и расчеты, выполненные в КазНИИМОСК показали, что в современных климатических условиях при достигнутом в бассейне Каспия водопотреблении, равном 40 - 45 км³/год [2], уровни моря 1%-ой обеспеченности (повторяемости один раз в 100 лет) имеют отметку минус 26 м, а уровни 0,1 %-ой обеспеченности (повторяемость один раз в 1000 лет) - около минус 25 м. Они также показали, что при отсутствии водопотребления в бассейне Каспия уровень моря в середине 90-х годов превысил бы наблюдаемые значения на 1,5 м и приблизился к отметке минус 25 м.

Влияние изменения климата

Вопрос об изменении уровня Каспийского моря в первой половине XXI века не может быть решен без рассмотрения влияния на его величину возможного антропогенного изменения климата – повышения температуры воздуха нашей планеты за счет увеличения роли парникового эффекта в ее тепловом балансе. В решении совещания по изменению климата, организованного ВМО в Филлахе (Австрия) в 1985 г., отмечалось, что изменение химического состава атмосферного воздуха, обусловленного увеличением содержания в атмосфере так называемых парниковых газов, в первую очередь углекислого газа CO_2 , образующегося при сжигании углеродного топлива (уголь, нефть, сланцы), а также малых газовых примесей: метана, окислов азота, фреонов и других [1], приведет в недалекой перспективе к значительному потеплению климата, которое еще не наблюдалось в предшествующие десятилетия. В нем также указывалось, что в настоящее время нельзя принимать важные хозяйственные решения, основываясь только на представлениях о сохранении в будущем климатических условий недавнего прошлого. При решении проблем народного хозяйства на перспективу необходимо в обязательном порядке принимать во внимание материалы о климате будущего. Для этого следует провести оценку влияния предстоящих изменений климата на элементы водного баланса речных бассейнов и уровенный режим внутриматериковых водоемов.

Оценки Межправительственной группы экспертов (МГЭИК) показывают, что за последние 100 лет средняя годовая температура воздуха нашей планеты повысилась более чем на $0,5\text{ }^\circ\text{C}$ [2, 3]. Исследования ученых показывают, что следует ожидать повышения глобальной температуры воздуха к 2005 г. примерно на $1\text{ }^\circ\text{C}$, к 2025 г. на $2\text{ }^\circ\text{C}$ и к 2050 г. – на $3 - 4\text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с ее значениями в доиндустриальный период (XIX век) [7]. Такое повышение температуры в перспективе может привести к увеличению речного стока в море и осадков выпадающих на его поверхность, а также испарения.

В современной климатологии оценка региональных изменений климата обычно производится двумя независимыми методами: путем подбора аналогов климатических условий более теплых эпох геологического прошлого нашей планеты и с помощью моделей общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Первый метод получил широкое распространение в Рос-

сийской Федерации [1], второй – в дальнем зарубежье: в Великобритании, Канаде и США [7]. Оба метода в значительной мере дополняют друг друга.

В данной работе для оценки возможных изменений уровня Каспийского моря использованы сценарии изменения климата, полученные с помощью моделей общей циркуляции атмосферы: CCC (Канадский климатический центр), GISS (Годдардовский Институт Космических исследований, США), UKMO (Метеорологическое Агентство Соединенного Королевства), GFDL, GFDL T (Геофизическая лаборатория динамики жидкости Принстонского Университета, США). Для расчета уровня моря на перспективу могут быть использованы характеристики изменения температуры воздуха и атмосферных осадков в его бассейне, определенных с помощью этих моделей общей циркуляции атмосферы. Следует отметить, что указанные модели хорошо описывают внутригодовое распределение среднемесячных значений температуры воздуха и довольно плохо внутригодовое изменение месячных сумм осадков в условиях современного климата. При использовании указанных моделей также возможны значительные систематические ошибки, особенно при расчете атмосферных осадков. Поэтому, для устранения этих погрешностей, следует ориентироваться не на месячные, а на годовые величины моделированных значений температуры воздуха и атмосферных осадков, а также на значения их отклонений по отношению к результатам описания этих элементов для условий современного климата.

В табл. 1 приведены средние годовые значения температуры воздуха и атмосферных осадков в бассейне р. Волга для сценариев однократного содержания CO_2 в атмосфере (современный климат) и удвоения его содержания (антропогенное изменение климата), определенные с помощью моделей общей циркуляции атмосферы (ОЦА). Они получены путем осреднения данных 30 метеорологических станций достаточно равномерно расположенным в бассейне. Кроме этого в таблице приведена разность температур воздуха и атмосферных осадков полученных в результате моделирования климата при удвоении содержания CO_2 и при однократном содержании этого газа в атмосфере. Результаты, приведенные в этой таблице показывают, что при удвоении CO_2 в атмосфере температура воздуха в бассейне р. Волга может увеличиться на $4,5^\circ\text{C}$ – $6,4^\circ\text{C}$, а атмосферные осадки на 81 – 196 мм.

Таблица 1

Результаты моделирования температуры воздуха и атмосферных осадков
(равновесные модели)

Сценарий	Модель			
	CCC	GISS	UKMO	GFDL
Температура воздуха, °C				
1×CO ₂	3,4	2,8	-4,1	1,1
2×CO ₂	8,9	7,3	2,3	6,6
Разность	5,5	4,5	6,4	5,5
Атмосферные осадки, мм				
1×CO ₂	860	601	647	413
2×CO ₂	98,7	797	822	494
Разность	127	196	175	81,2

В табл. 2 приведены аналогичные результаты расчета температуры воздуха и осадков в бассейне р. Волга путем использования трансientных моделей. Они показывают, что через четыре, семь и десять десятилетий после начала повышения глобальной температуры ее значение в рассматриваемом бассейне соответственно увеличится на 1,2 °C; 2,8 °C и 4,6 °C, а атмосферные осадки – соответственно на 30 мм, 61 мм и 155 мм. Результаты расчета температуры воздуха и осадков по модели GFDL-T10 находятся в пределах их значений, полученных с помощью равновесных моделей.

Таблица 2

Результаты моделирования температуры воздуха и атмосферных осадков
(трансientные модели)

Сценарий	Модель		
	GFDL-T4	GFDL-T7	GFDL-T10
Температура воздуха, °C			
1×CO ₂	2,4	2,4	2,4
1×CO ₁ ÷ 2×CO ₂	3,6	5,2	7,0
Разность	1,2	2,8	4,6
Атмосферные осадки, мм			
1×CO ₂	657	657	657
1×CO ₁ ÷ 2×CO ₂	687	718	812
Разность	30,1	61,4	155

Определение стока в Каспийское море

Располагая данными об изменении месячных и годовых значений температуры воздуха и атмосферных осадков необходимо определить изменение стока в бассейне Каспийского моря при потеплении климата нашей планеты. Для этого может быть использован комплексный метод расчета испаряемости и испарения с поверхности суши, разработанный Будыко М.И., с помощью которого также могут быть определены влагосодержание почвы и сток [4]. Этот метод позволяет рассчитать все основные составляющие теплового и водного баланса путем использования широко распространенной метеорологической информации. В работе Борзенковой И.И. [2] этот метод успешно применен для оценки изменений основных составляющих водного баланса р. Волга при глобальном потеплении климата, параметры которого были определены путем использования палеоклиматической информации. Значения этих составляющих водного баланса рассчитаны ею по данным 30 метеорологических станций, расположенным в бассейне реки Волги. В результате Борзенковой И.И. [2] были получены характеристики, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Изменения температуры воздуха и элементов водного баланса в бассейне р. Волга при потеплении климата

Наименование изменений	Изменения температуры воздуха и элементов водного баланса		
	1	2	3,8
Температура воздуха ΔT , °C	1	2	3,8
Атмосферные осадки ΔP , мм/год	2,3	102	85
Суммарное испарение ΔE , мм/год	2,3	67	34
Общий сток ΔR , мм/год	0	35	51

Модель водного баланса бассейна р. Волга, разработанная ею, 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. Для решения этой задачи путем использования данных табл. 3 были рассчитаны относительные характеристики, приведенные в табл. 4.

Результаты, приведенные в табл. 3 и 4, позволили адаптировать рассматриваемую модель 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:

$$\Delta E = \Delta T[A_1(\Delta P/\Delta T)^m + B_1], \quad (2)$$

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

Таблица 4

Изменения температуры воздуха, атмосферных осадков, испарения и стока в бассейне р. Волга при потеплении климата

Наименование изменений	Изменения температуры воздуха и характеристик водного баланса		
Температура воздуха ΔT , °C	1	2	3,8
Отношение $\Delta P/\Delta T$, мм/°C	2,3	51	22,4
Отношение $\Delta E/\Delta T$, мм/°C	2,3	33,5	8,95
Коэффициент стока $\Delta R/\Delta P$	0	0,343	0,660

С помощью выражения (2) можно увязать все составляющие водного баланса и их характеристики, приведенные в табл. 3 и 4. Как известно, из уравнения водного баланса за многолетний период:

$$\Delta R = \Delta P - \Delta E, \quad (3)$$

подставив (2) в (3) получим:

$$\Delta R = \Delta P - \Delta T[A_1(\Delta P/\Delta T)^m + B_1]. \quad (4)$$

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

$$\Delta W_v = \Delta R S 10^{-6}, \quad (5)$$

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

Изменение суммарного речного стока в Каспийское море будет равно:

$$\Delta W = K \Delta R S 10^{-6}, \quad (6)$$

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

В табл. 5 приведены результаты расчета изменения стока в Каспийское море при потеплении климата, обусловленном удвоением CO₂ в атмосфере, характеристики которого ΔT и ΔP для бассейна р. Волга рассчитаны с помощью равновесных моделей (первая и вторая строка). В третьей строке помещены значения изменения количества осадков на единицу изменения температуры $\Delta P/\Delta T$ в рассматриваемом бассейне.

Изменение стока в Каспийское море при потеплении климата

Изменения	Равновесные модели			
	CCC	GISS	UKMO	GFDLR-30
При удвоении содержания CO ₂ в атмосфере				
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	5,5	4,5	6,4	5,5
$\Delta P, \text{мм}$	127	196	175	81,2
$\Delta P/\Delta T, \text{мм}/^\circ\text{C}$	23,1	143,6	27,3	14,8
$\Delta E, \text{мм}$	51,5	115	76,7	29,3
$\Delta R, \text{мм}$	75,5	81,0	98,3	51,9
$\Delta W_v, \text{км}^3/\text{год}$	103	110	133	70,6
$\Delta W, \text{км}^3/\text{год}$	128	138	167	88,2

В четвертой строке таблицы приведены результаты расчета по выражению (2) изменения испарения в этом же бассейне. В строках пять, шесть и семь помещены результаты расчета с помощью выражений (3), (5) и (6) изменения слоя и объема стока р. Волга, а также изменение объема речного стока в Каспийское море. Полученные результаты показывают, что изменение стока в бассейне Каспия при изменении климата, обусловленного изменением CO₂ в атмосфере при расчете с помощью равновесных моделей составляет: 128 км³ в год (CCC), 138 км³ в год (GISS), 167 км³ в год (UKMO) и 88,2 км³ в год (GFDL). Таким образом, наименьшее значение изменения стока в рассматриваемых условиях получены по модели GFDL, а наибольшие – по модели UKMO. Следует отметить, что приведенные данные хорошо согласуются с результатами исследований, выполненных в ГГИ [3].

В табл. 6 приведены результаты аналогичных расчетов по трансientным моделям, характеризующим изменение температуры воздуха, соответственно, через четыре, семь и десять десятилетий после начала ее повышения [8]. Авторы модели GFDL -T условно полагали, что повышение глобальной температуры воздуха начнется после 1960 г. В этом случае изменение температуры воздуха и атмосферных осадков, рассчитанных по модели GFDL- T4, следует относить к 2000 г., по модели GFDL-T7 – к 2030 г. и по модели GFDL-T10 – 2060 г. [7].

Изменение стока в Каспийское море при потеплении климата

Изменения	Трансиентные модели		
	GFDL-T4	GFDL-T7	GFDL-T10
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	1,2	2,8	4,6
$\Delta P, \text{мм}$	30,1	61,4	155
$\Delta P/\Delta T, \text{мм}/^\circ\text{C}$	25,1	21,9	33,7
$\Delta E, \text{мм}$	12,7	24,3	76,7
$\Delta R, \text{мм}$	17,4	37,1	78,3
$\Delta W_v, \text{км}^3/\text{год}$	23,7	50,5	106
$\Delta W, \text{км}^3/\text{год}$	29,6	63,5	133

Результаты, помещенные в этой таблице, показывают, что при увеличении температуры воздуха на $1,2^\circ\text{C}$ сток в Каспийское море увеличится почти на 30 км^3 в год, при увеличении температуры на $2,8^\circ\text{C}$ – на 64 км^3 в год и при увеличении температуры на $4,6^\circ\text{C}$ – на 133 км^3 в год. Это означает, что при повышении глобальной температуры воздуха примерно на 1°C , которое ожидается в начале XXI века, сток в Каспийское море может увеличиться на 30 км^3 в год и полностью компенсировать современное водопотребление в бассейне моря. При дальнейшем повышении температуры воздуха сток в море будет увеличиваться. Результаты расчета стока по трансиентной модели GFDL-T10 практически совпадают с данными, полученными по равновесным моделям.

Определение осадков и испарения

Следующим вопросом, который необходимо решить, является определение изменений атмосферных осадков, выпадающих на поверхность моря и испарения с его акватории при антропогенном изменении климата. Среднее многолетнее значение температуры воздуха и атмосферных осадков по метеорологическим станциям Баку, Махачкала, Туркменбаши (Красноводск) и Форт Шевченко за период 1951 – 1980 гг., принимаемые для характеристики современного климата, составляют соответственно $13,3^\circ\text{C}$ и 230 мм .

Осадки в пределах акватории моря изменяются незначительно от – 4. . . 8 мм по моделям CCC, UKMO и GFDL R30 до 52мм по модели GISS.

Для оценки изменения испарения с поверхности Каспийского моря при увеличении температуры воздуха может быть использовано выражение, полученное Смирновой К.И. [6]:

$$E_a = 12(K_1 T_a + C_1), \quad (7)$$

где E_a – среднее годовое испарение, мм/год; T_a – средняя годовая (по указанным выше 4 метеорологическим станциям) температура воздуха, °С; $K_1 = 4,07$ и $C_1 = 30$ – эмпирические параметры.

Коэффициент корреляции этой зависимости равен 0,92.

Выражение (7) позволяет записать уравнение для определения изменения испарения в зависимости от изменения температуры воздуха:

$$\Delta E_a = 12K_1 \Delta T_a, \quad (8)$$

где ΔE_a – изменение среднего годового испарения, мм/год; ΔT_a – изменение средней годовой температуры воздуха в пределах акватории моря, °С.

Далее, располагая данными об изменении осадков и испарения в пределах акватории моря можно получить характеристику изменения эффективного испарения $\Delta E_a - \Delta P_a$ по результатам использования модели общей циркуляции атмосферы. Прибавив к этой величине среднее многолетнее значение эффективного испарения для современного климата $E_a - P_a$, определенное из уравнения водного баланса моря за 1556 – 1998 гг. и равное 734 мм, можно определить величину возможного эффективного испарения при антропогенном изменении климата.

Средние характеристики изменения годовых значений температуры воздуха ΔT_a и атмосферных осадков ΔP_a по указанным метеорологическим станциям, определенные по равновесным моделям CCC, GISS, UKMO, GFDL R30 приведены в табл. 7, а по трансидентным моделям GFDL-T4, GFDL-T7 и GFDL-T10 - в табл. 8.

Эти данные показывают, что при удвоении содержания CO_2 в атмосфере температура воздуха по результатам равновесных моделей может увеличиться на 3,7°С – 3,9°С, т.е. в среднем для указанных моделей на 4,3°С. Это на 1,2°С ниже, чем по бассейну р. Волга, и хорошо согласуется с существующими представлениями об изменении температуры воздуха в различных широтах при антропогенном изменении климата.

Как известно, при потеплении климата температура воздуха увеличивается в высоких широтах больше, чем в низких. В табл. 7 приведены результаты определения эффективного испарения с поверхности Каспийского моря по равновесным моделям при потеплении климата обуслов-

ленном удвоении концентрации CO_2 в атмосфере. Данные этой таблицы показывают, что при глобальном потеплении климата эффективное испарение может повыситься на 150 – 250 мм/год.

Таблица 7

Изменение эффективного испарения с поверхности Каспийского моря при потеплении климата

Изменения	Равновесные модели			
	CCC	GISS	UKMO	GFDLR-30
При удвоении содержания CO_2 в атмосфере				
$\Delta T_a, ^\circ\text{C}$	3,7	4,3	4,9	4,2
$\Delta E_a, \text{мм}$	180	210	239	205
$\Delta P_a, \text{мм}$	-7	52	-4	-8
$(\Delta E_a - \Delta P_a), \text{мм}$	187	158	243	213
$(E_a - P_a), \text{мм}$	921	892	977	947

В табл. 8 приведены аналогичные результаты по трансидентным моделям.

Таблица 8

Изменение эффективного испарения с поверхности Каспийского моря при потеплении климата

Изменения	Трансидентные модели		
	GFDL-T4	GFDL-T7	GFDL-T10
$\Delta T_a, ^\circ\text{C}$	1,4	2,9	4,8
$\Delta E_a, \text{мм}$	68	141	234
$\Delta P_a, \text{мм}$	25	21	3
$(\Delta E_a - \Delta P_a), \text{мм}$	43	120	231
$(E_a - P_a), \text{мм}$	777	854	865

Эти данные показывают, что при глобальном потеплении климата, обусловленном удвоенным содержанием CO_2 в атмосфере, эффективное испарение может увеличиться на 40...120 мм и более.

Изменение уровня Каспийского моря

Результаты определения изменения стока в Каспийское море (табл. 5 и 6) и эффективного испарения с его поверхности (табл. 7 и 8) при антропогенном изменении климата были использованы для моделирования уровня моря за период 1556 – 1998 гг. В процессе моделирования к сред-

ним многолетним значениям речного стока в море (321 км^3 в год) и эффективного испарения (734 мм) в естественных условиях прибавлялись величины их изменений приведенных в табл. 5, 6 и табл. 7, 8. При моделировании уровня моря модульные коэффициенты речного стока и испарения, равные отношениям их значений за отдельные годы к их средне-многолетнему значению, принимались такими же, как и для естественных условий.

В результате обработки моделированных рядов уровня моря Z длительностью 443 года были получены их статистические характеристики: среднемноголетнее значение $Z_{\text{ср}}$, среднеквадратическое отклонение σ_n и коэффициент вариации $C_v = \sigma_n / Z_{\text{ср}}$. Коэффициент асимметрии C_s определялся путем построения и анализа эмпирических и теоретических кривых обеспеченности и был принят равным 0. Полученные статистические характеристики моделированных рядов уровней позволили также рассчитать их значения определенной обеспеченности: 0,1 %; 0,5 %; 1 %; 2 % и 5 %. Результаты расчета указанных параметров и уровней различной обеспеченности приведены в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Характеристики уровня Каспийского моря при отсутствии водопотребления в его бассейне

Модель	Средний уровень	Коэффициент вариации	Обеспеченность, %			
			0,1	1	2	5
Современный климат - $1 \times \text{CO}_2$						
XVI-XX вв.	-25,85	-0,046	-22,18	-23,08	-23,41	-23,90
Равновесные модели - $2 \times \text{CO}_2$						
CCC	-22,37	-0,069	-17,60	-18,77	-19,21	-19,84
GISS	-20,48	-0,086	-15,04	-16,38	-16,87	-17,59
UKMO	-21,39	-0,079	-16,17	-17,45	-17,93	-18,62
GFDL	-25,77	-0,051	-21,71	-22,71	-23,08	-23,61
Трансиентные модели						
GFDL-T4	-24,93	-0,051	-21,00	-21,97	-22,32	-22,84
GFDL-T7	-24,81	-0,054	-20,67	-21,69	-22,06	-22,61
GFDL-T10	-19,64	-0,093	-14,00	-15,38	-15,90	-16,64

В табл. 9 приведены статистические характеристики уровня Каспийского моря при отсутствии водопотребления в его бассейне в современных условиях и для равновесных моделей при удвоении концентрации

CO₂ в атмосфере. Сопоставление характеристик уровня моря 0,1 % - ой обеспеченности при отсутствии водопотребления для современного климата (первая строка) и при его изменении показывает, что при удвоении концентрации CO₂ в атмосфере характеристики уровня могут увеличиться: при расчете по модели CCC – на 4,6 м, по модели GISS – на 7,1 м, по модели UKMO – на 6,0 м и только по модели GFDL – примерно на 5,0 м.

В той же таблице приведены статистические характеристики уровня Каспия при отсутствии водопотребления в его бассейне для естественных условий и для указанных выше неравновесных моделей при изменении концентрации CO₂ в атмосфере. Сопоставление характеристик уровня моря 0,1 % - ой обеспеченности при отсутствии водопотребления в его бассейне для современного климата (первая строка) и при его изменении показывает, что при изменении концентрации CO₂ в атмосфере характеристики уровня могут увеличиться при расчете по модели GFDL-T4 на 1,2 м; по модели GFDL-T7 на 1,5 м и по модели GFDL-T10 на 8,2 м.

Заключение

Полученные результаты показывают, что в естественных условиях, т.е. при отсутствии водопотребления в бассейне моря его уровень при изменении климата, обусловленного удвоением концентрации CO₂ в атмосфере, может повыситься на 4 – 7 м, т.е. до отметок минус 18 – минус 15 м.

Безвозвратное водопотребление в бассейне моря по данным Государственного гидрологического института (ГГИ) Российской Федерации к концу 80-х годов текущего столетия достигло 40 км³ в год [7]. Затем к середине 90-х годов оно снизилось примерно до 30 км³ в год в связи с деградацией промышленности и сельского хозяйства в бассейне моря. По оценке ГГИ оно останется на этом уровне примерно до 2000 г., а затем начнет медленно повышаться и к 2020 г. составит 40 км³ в год, т.е. опять возвратится на уровень конца 80-х годов XX столетия. На основании этих оценок среднее водопотребление на первую половину XXI века было принято равным 40 км³ в год.

В табл. 10 приведены статистические характеристики Каспийского моря при водопотреблении 40 км³ в год для условий современного климата и для равновесных моделей современного климата при удвоении концентрации CO₂ в атмосфере.

Сопоставление характеристик уровня моря 0,1 % - ой обеспеченности при водопотреблении 40 км^3 в год для современного климата (первая строка) и при его изменении показывает, что при удвоении концентрации CO_2 в атмосфере характеристики уровня могут увеличиться: при расчете по модели CCC – на 4,7 м, по модели GISS – на 6,4 м, по модели UKMO – на 5,9 м и по модели GFDL – на 1,0 м.

В этой же таблице приведены статистические характеристики уровня Каспия при водопотреблении 40 км^3 в год в его бассейне для естественных условий и для указанных выше неравновесных моделей при изменении концентрации CO_2 в атмосфере.

Таблица 10
Характеристики уровня Каспийского моря при водопотреблении в его бассейне равном 40 км^3 в год

Модель	Средний уровень	Коэффициент вариации	Обеспеченность, %			
			0,1	1	2	5
Современный климат - $1 \times \text{CO}_2$						
XVI-XX вв.	-28,44	-0,036	-25,28	-26,05	-26,34	-26,76
Равновесные модели - $2 \times \text{CO}_2$						
CCC	-25,10	-0,058	-20,60	-21,71	-22,12	-22,71
GISS	-23,59	-0,065	-18,85	-20,02	-20,45	-21,08
UKMO	-24,14	-0,064	-19,37	-20,54	-20,97	-21,61
GFDL	-28,00	-0,043	-24,28	-25,19	-25,53	-26,03
Трансиентные модели						
GFDL-T4	-27,68	-0,041	-24,17	-25,04	-25,35	-25,82
GFDL-T7	-27,41	-0,044	-23,68	-24,60	-24,94	-25,43
GFDL-T10	-23,08	-0,067	-18,30	-19,48	-19,91	-20,54

Сопоставление характеристик уровня моря 0,1 % - ой обеспеченности при водопотреблении 40 км^3 в год в его бассейне для современного климата (первая строка) и при его антропогенном изменении показывает, что при повышении концентрации CO_2 в атмосфере характеристики уровня могут увеличиться при расчете по модели GFDL-T4 на 1,1 м; по модели GFDL-T7 на 1,6 м и по модели GFDL-T10 на 7,0 м.

Результаты выполненных расчетов показали, что при изменении климата, обусловленного удвоением концентрации углекислого газа в атмосфере, которое ожидается в середине XXI века, уровень моря может

увеличиться на 5 м по отношению к современному его значению (минус 27 м) и достигнуть отметки минус 22 м, наблюдавшейся в конце XVIII начале XIX века. В этих условиях вероятность достижения уровня моря отметки минус 25 м, являющейся предельной для современного климата и достигнутого объема безвозвратного водопотребления в его бассейне будет постепенно увеличиваться. Это приведет в первой половине XXI века к увеличению вероятности катастрофического затопления прибрежной зоны Каспийского моря в пределах Республики Казахстан и других прикаспийских государств.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Нидерландской Программы исследований изменения климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антропогенные изменения климата/ Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля.- Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 407 с.
2. Борзенкова И.И. Влияние возможных изменений климата на осадки, испарение и сток в бассейне р. Волга. 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». (Приложение 5). - М.: 1992. – С. 494 - 537.
3. Будыко М.И., Ефимова И.А., Лобанов В.В. Будущий уровень Каспийского моря // Метеорология и гидрология. - 1988. - № 5. - С. 86 - 94.
4. Георгиевский В.Ю., Ежов А.В., Шалыгин А.Л. и др. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. - 1996. - № 11. - С. 89 - 99.
5. 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.
6. Смирнова К.И. Водный баланс и долгосрочный прогноз уровня Каспийского моря. - Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 123 с.
7. Шикломанов И.А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 333 с.
8. Pilifosova O., Eserkepova I., Dolgih S. Regional climate change scenarios under global warming in Kazakhstan. Climatic Change 36, Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, 1997.- P. 23-40.

Казахский научно-исследовательский институт
мониторинга окружающей среды и климата

КЛИМАТТЫҢ АНТРОПОГЕНДІК ӨЗГЕРУІНІҢ КАСПИЙ ТЕҢІЗІНІҢ ДЕҢГЕЙІНЕ ӘСЕРІ

Геогр. ғылымдарының канд.
Техн. ғылымдарының канд.
Геогр. ғылымдарының канд.

В.В. Голубцов
В.И. Ли
В.П. Попова

XXI ғасырдың бірінші жартысындағы климаттың антропогендік өзгеруі жағдайындағы Волга өз. ағысы мен Каспий теңізінің деңгейінің сипаттамалары қарастырылған. Ауа температурасы мен атмосфералық жауын-шашындардың болуы мүмкін өзгеруін бағалау үшін атмосфера жалпы айналымының тепе-теңдік және трансидентті үлгілері қолданылды. XXI ғасырдың орта шешінде күтіліп отырған климаттың өзгеруі жағдайында теңіз деңгейі оның қазіргі мағынасына (минус 27 м) қарағанда 5 м өсіп, XIX ғасырдың басында байқалған минус 22 м деңгейіне жету мүмкін екендігі көрсетілген.