

СЦЕНАРНЫЕ ПРОГНОЗЫ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ КАСПИЯ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВОДНЫЙ БАЛАНС МОРЯ

Фролов А.В.

*Институт водных проблем РАН, Россия, Москва 119333, ул. Губкина, 3
e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 11.03.2019, одобрена к печати 21.12.2019

В статье рассматривается сценарный метод прогноза многолетних колебаний уровня Каспийского моря. При разработке прогноза используются:

- модель механизма колебаний уровня моря,
- модели процессов многолетних изменений основных компонент водного баланса моря,
- морфометрические характеристик чаши водоема,
- зависимость оттока воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня моря,
- оценки возможных прямых техногенных воздействий на водный баланс водоема, например, объемов безвозвратных изъятий воды из притока в море.

Многолетние колебания уровня Каспийского моря нами рассматриваются как выходной процесс нелинейной гидрологической системы. Механизм колебаний уровня Каспия содержит две отрицательных и одну положительную обратные связи. Зависимость площади акватории Каспия от его уровня и зависимость оттока в залив Кара-Богаз-Гол формируют отрицательные обратные связи. Положительная обратная связь образуется нелинейной зависимостью испарения с акватории моря от уровня моря. При определенных условиях, действие этой зависимости может привести к бимодальной плотности распределения вероятности уровня. Необходимое (но не достаточное) условие бимодальности – отсутствие свободного оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол. Приводятся результаты сценарных прогнозов уровня Каспия, разработанных при научном обосновании Федеральной целевой программы «Каспий» (1994–1995 гг.). Обсуждаются условия применимости в сценарных прогнозах линейной и существенно нелинейной моделей механизма колебаний уровня моря. Недочет любой из обратных связей при моделировании уровня режима Каспия приведет к неверным прогнозным оценкам статистических характеристик колебаний уровня моря.

Ключевые слова: сценарные прогнозы, t колебания уровня Каспийского моря, нелинейная гидрологическая система, уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова, плотность распределения вероятностей (п.р.в.), бимодальность, залив Кара-Богаз-Гол

Введение

Интенсивные исследования колебаний уровня Каспия и его водного баланса связаны со значительной ролью прибрежно-шельфовой зоны моря в экономической и социальной жизни прикаспийских государств. Освоение углеводородных запасов на Каспийском море, функционирование портов и морских каналов и другие практические задачи устойчивого экономического развития прикаспийских государств требуют информации о возможных колебаниях уровня моря в будущем.

Изменения уровня Каспия формируются под воздействием природных и техногенных процессов, происходящих на водосборе и акватории моря.

Составляющие водного баланса моря (осадки, испарение, речной сток) определяются циркуляционными особенностями атмосферных процессов как над водосборным бассейном Каспийского моря, так и далеко за его пределами. При этом естественный режим колебаний уровня подвергается техногенным воздействиям, главным образом, безвозвратными изъятиями из речного притока к морю. Такие процессы как водообмен через дно моря, плотностные изменения уровня, тектонические изменения объема чаши моря обычно рассматриваются как второстепенные, не оказывающие особого влияния на временных интервалах порядка сотни лет. Климатическая обусловленность уровня режима моря с необходимостью приводит к рассмотрению возможных будущих климатических изменений в бассейне Каспия.

Обеспечение исследований многолетних колебаний уровня и водного баланса Каспия данными натурных наблюдений, включая спутниковую информацию, можно считать относительно удовлетворительным (Водный баланс..., 2016; Добровольский, 2011; Проект «Моря»..., 1986; Лебедев, Костяной, 2005; Arpe et al., 2012; Kosarev, 2007; Kosarev et al., 2009; Zonn et al., 2010 и др.).

В настоящее время существует большое число различных предложений по прогнозу многолетних колебаний уровня Каспийского моря. Обзоры соответствующих исследований можно найти в статьях и монографиях (Водный баланс..., 2016; Гидрометеорологические ..., 2003; Голицын и др., 1998; Малинин, 1994; Фролов, 2003), а также ряде других работ.

Существующие подходы к прогнозированию уровня Каспия можно условно разделить на три основные группы.

1) Используя динамико-стохастические модели процесса колебаний уровня, то есть применяющие уравнения водного баланса озера в той или иной форме (стохастическое дифференциальное или разностное уравнение). Для применения методов этой группы необходимо иметь прогноз основных составляющих водного баланса водоема с требуемой заблаговременностью. Очевидно, что долгосрочное прогнозирование уровня моря в данном случае будет успешным только при условии достаточно точного прогноза природных, климатически обусловленных процессов и техногенных воздействий, формирующих водный баланс Каспия. Первая модификация динамико-стохастической модели колебаний уровня Каспия была разработана С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем к 1940 г. и впервые опубликована в работе (Крицкий, Менкель, 1946).

2) Основанные на использовании корреляционных связей между колебаниями уровня моря и некоторыми другими геофизическими, метеорологическими или гелиофизическими процессами. Возможность прогноза в данном случае обусловливается временем запаздывания изменений уровня водоема по отношению к процессу, с которым устанавливается связь. Применительно к Каспийскому морю, использовались зависимости между колебаниями его уровня и индексами атмосферной циркуляции для различных районов Северного полушария, а также с различными характеристиками солнечной активности, чаще всего, с числами Вольфа.

Следует отметить, что прогноз по космическим связям, если только он возможен вообще, может дать *только одну составляющую* в колебаниях уровня Каспийского моря, *только и только природную* составляющую, никак не связанную с антропогенной деятельностью. В частности, такие методы *в принципе не* могут учесть влияние в изменениях уровня моря, вызванное *техногенными* эффектами – парниковым потеплением или безвозвратными изъятиями из речного притока в море. Значительное влияние на колебания уровня моря хозяйственной деятельности, например, безвозвратных изъятий из речного притока в Каспий, при этом совершенно не учитывается. Поэтому, строго говоря, оценивается только «природная» компонента прогноза. К недостаткам этой группы прогнозов можно отнести отсутствие представлений о физическом механизме, связывающем колебания уровня моря и космические факторы – солнечной активностью и т.п.

Иногда для прогноза колебаний уровня Каспия применяются некоторые характеристики атмосферной циркуляции, используемые как предикторы по отношению к уровню Каспия. Прогностические значения уровня моря вычисляются по уравнениям множественной регрессии, связывающие предикторы и уровень моря. Заблаговременность прогноза определяется временным лагом между изменениями предикторов и уровня моря. Опыт применения этого метода показал на неустойчивость связей между уровнем моря и предикторами. Например, первоначально установленная отрицательная корреляция между уровнем Каспия и индексом атмосферной циркуляции в районе Азорского максимума, впоследствии сменилась на положительную.

3) Методы выделения т.н. «скрытой периодичности» в колебаниях уровня Каспия. При этом не существует никаких доказательств существования «скрытых периодичностей» в колебаниях *основных составляющих водного баланса* Каспия, формирующих уровенный режим моря. Отсюда возникает сомнение относительно существования такого рода периодичностей в колебаниях *уровня моря* – поскольку изменения уровня формируются водным балансом водоема. Заметим, что статистические свойства составляющих водного баланса Каспия определяются намного надежнее по сравнению с оценками соответствующих характеристик колебаний уровня моря, имеющего очень высокую автокорреляцию – около 0.98;

К четвертой группе методов прогноза уровня Каспия можно отнести попытки применения построения функций, аппроксимирующих наблюдаемый ход уровня моря. Продолжение (в будущее) аппроксимирующей функции за пределы интервала наблюдений объявляется прогнозом. Принципиальные недостатки этого метода – отсутствие физического обоснования, игнорирование стохастического характера изменений уровня моря и «чувствительность» аппроксимирующей функции к каждому новому наблюдению, то есть изменение числовых коэффициентов этой функции (Голицын и др., 1998; Фролов, 2003).

Оценка воздействия техногенных климатических изменений («парникового эффекта») на водный баланс и уровенный режим Каспия базируется на прогнозах-проекциях, получаемых с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Эти прогнозы относятся к сценарным, поскольку они отвечают некоторым, принятым при моделировании будущего климата, вариантам эмиссии парниковых

газов (Arpe, Leroy, 2007; Elguindi, Giorgi, 2007; Elguindi et al., 2011; GholamReza et al., 2012 и др.). При решении некоторых прикладных задач, связанных с прогнозом уровня моря, оценки влияния климата на уровень Каспия относятся к важной составляющей всего прогнозного сценария.

На практике из перечисленных выше способов прогноза применяются только методы, относящиеся к первой группе, основанные теоретико-вероятностном подходе. Основанием для этого являются следующие соображения.

Многолетние колебания речного притока в море, испарения с морской акватории и других составляющих водного баланса Каспия имеют стохастический характер. Информация о закономерностях формирования водного баланса и основанные на этих закономерностях гипотезы о водном балансе моря на время заблаговременности прогноза составляют базис прогностических расчетов – «проекций» уровня Каспия. При этом следует иметь в виду опасность «прямолинейного распространения» наблюдающихся трендов в колебаниях составляющих водного баланса Каспия на перспективу. Это обстоятельство отмечалось в работе (Гинзбург, Костяной, 2018).

Прямые (не связанные с изменением климата в бассейне моря) техногенные воздействия на колебания уровня моря, например, безвозвратные изъятия из речного притока в море, изменения морфометрии водоема вследствие отсечения мелководных дамбами и т.п., по сути, представляют собой случайные события, причем с неизвестными законами распределения вероятностей. Это приводит к необходимости принятия более-менее обоснованных предположений относительно соответствующих вероятностных характеристик, например, о средней величине безвозвратных изъятий из притока в море.

Таким образом, уровень Каспия функционально зависит, в первую очередь, от составляющих водного баланса моря как стохастических процессов. Следовательно, колебания уровня Каспия также представляют собой стохастический процесс, и поэтому «детерминированный прогноз» уровня Каспия невозможен.

Цель данной работы – изложить основные положения и некоторые результаты сценарного подхода в теоретико-вероятностном прогнозировании колебаний уровня Каспия.

Постановка задачи

Прогноз уровня Каспия, получаемый на основе теоретико-вероятностного подхода, по определению, есть интервал отметок (h_1, h_2) , в котором будут происходить колебания уровня в будущий момент времени t с некоторой вероятностью P . Величина этого интервала зависит от условных (т.е. зависящие от времени и начальных условий) математического ожидания $\langle h(t) \rangle$ и дисперсии $D(t)$ колебаний уровня.

Время заблаговременности прогноза T зависит от конкретной практической задачи, например, от времени функционирования объекта, для которого разрабатывается прогноз. Заблаговременность прогноза часто находится в интервале $T = 30–100$ лет.

Для разработки прогноза многолетних колебаний уровня Каспия в рамках теоретико-вероятностного подхода необходимо иметь:

- модель механизма колебаний уровня моря,
- модели процессов многолетних изменений основных компонент водного баланса моря,
- морфометрические характеристики чаши водоема,
- зависимость оттока воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня моря,
- оценки возможных прямых техногенных воздействий на водный баланс водоема, например, объемов безвозвратных изъятий воды из притока в море.

Будем говорить, что совокупность информации, отвечающей перечисленным выше пунктам, образует *сценарий прогноза колебаний уровня Каспийского моря* (далее, сокр. – УКМ), по которому рассчитывается собственно прогноз.

Климатические проекции, определяющие модели компонент водного баланса моря на период заблаговременности прогноза уровня, нами рассматриваются как часть сценарного прогноза УКМ.

Принятие конкретных моделей и/или предположений по каждому из перечисленных пунктов зависят от практической задачи, применительно к которой разрабатывается прогноз колебаний УКМ.

Теоретико-вероятностный подход к прогнозированию колебаний уровня базируется на использовании динамико-стохастической модели колебаний уровня Каспия. При таком подходе многолетние колебания уровней естественных водоемов рассматриваются как выходной процесс динамической системы, на вход которой поступают стохастические входные процессы – основные составляющие водного баланса водоема, речной приток, осадки и испарение. Динамика этой системы описывается уравнением водного баланса водоема.

Несомненным достоинством динамико-стохастических моделей является их физическая обоснованность (Музылев и др., 1982; Klemes, 1978; Фролов, 2003; Frolov, 2000). При корректном задании входных процессов и «внутренних» параметров моделируемой системы имеются достаточные основания считать смоделированный процесс колебаний уровня моря адекватным реальному. В некоторых случаях оценка статистических характеристик колебаний уровня по смоделированному ряду может оказаться более надежной, нежели при использовании ряда наблюдений. Например, колебания уровней Каспия и некоторых других бессточных озер обладают очень высоким коэффициентом автокорреляции, иногда превышающим 0.9. В сочетании с относительно небольшой длительностью наблюдений (обычно не более 100–150 лет), это приводит к тому, что ряды уровней оказываются эквивалентными всего нескольким независимым величинам, что не позволяет получить достаточно надежных статистических характеристик уровня, необходимых для построения модели. Однако основные составляющие водного баланса озер – речной приток, осадки, испарение – имеют существенно меньшую автокоррелированность, что позволяет получить более достоверные статистические характеристики уровня моря по модели, в отличие от прямых оценок по рядам наблюдений.

Другая причина для предпочтения динамико-стохастического моделирования колебаний уровня Каспия перед чисто стохастическим моделированием – возможность получать оценку реакции уровня моря на изменение характеристик составляющих водного баланса озер. Такие изменения могут быть вызваны, в частности, влиянием климата и прямым техногенным воздействием на водный баланс водоема – например, изъятиями из речного притока, изменением морфометрических характеристик озер и прочими подобными причинами.

Механизм формирования многолетних колебаний уровня Каспия как основа прогноза уровня. Основные уравнения и соотношения

В общем случае, колебания уровня воды h в Каспийском море описываются уравнением:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{V(t)}{F(h)} - e(t, h) - \frac{Q(h)}{F(h)}, \quad (1)$$

где V – суммарное поступление воды в водоем (речной и подземный приток за вычетом безвозвратных изъятий плюс осадки на поверхность моря; для краткости, будем называть V просто «притоком»), F – площадь зеркала моря, e – слой испарения, Q – отток морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, t – время (годы), уровень h отсчитывается от отметки – 31.0 м БС, принимаемой за нулевую.

Приток $V(t)$ часто моделируется процессом авторегрессии первого порядка (марковским процессом):

$$\frac{dV(t)}{dt} = -r_V V(t) + n_V(t), \quad (2)$$

где r_V – коэффициент автокорреляции притока, n_V – белый шум, в общем случае негауссовый.

В более общем случае могут использоваться авторегрессионные процессы более высокого порядка (обозначаются $AR(p)$, где p – порядок авторегрессии). Главное требование к моделям – воспроизведение с заданной точностью основных статистических характеристик (свойств) речного притока в море, эффективного испарения с морской акватории и других компонент баланса. Применение в качестве моделей негауссовых процессов $AR(1)$ обеспечивает воспроизведение заданных математических ожиданий, дисперсий, асимметрии, коэффициентов автокорреляции и коэффициентов взаимной корреляции между компонентами водного баланса Каспия.

Слой испарения с поверхности моря $e(t, h)$, в общем случае, представляет собой сумму детерминированной функции $e(h)$ и случайной компоненты $n_e(t)$:

$$e(t, h) = e(h) + n_e(t), \quad (3)$$

где $n_e(t)$ будем полагать белым шумом. В качестве $e(h)$ примем зависимость (Фролов, 2003):

$$e(h) = -k \arctan[\mu(h-c)] + e_d, \quad (4)$$

где k, μ и $c > 0$ – числовые коэффициенты, e_d – величина слоя испарения с глубоководной части моря.

Зависимость объема оттока воды $Q(h)$ из Каспийского моря в залив Кара-Богаз-Гол от уровня h Каспийского моря аппроксимируется формулой:

$$Q(h) = \lambda \arctan[\varphi(h-d)] + q, \quad (5)$$

где λ, φ, d и $q > 0$ – числовые коэффициенты.

Графики зависимостей (4) и (5) приведены на рис. 1.

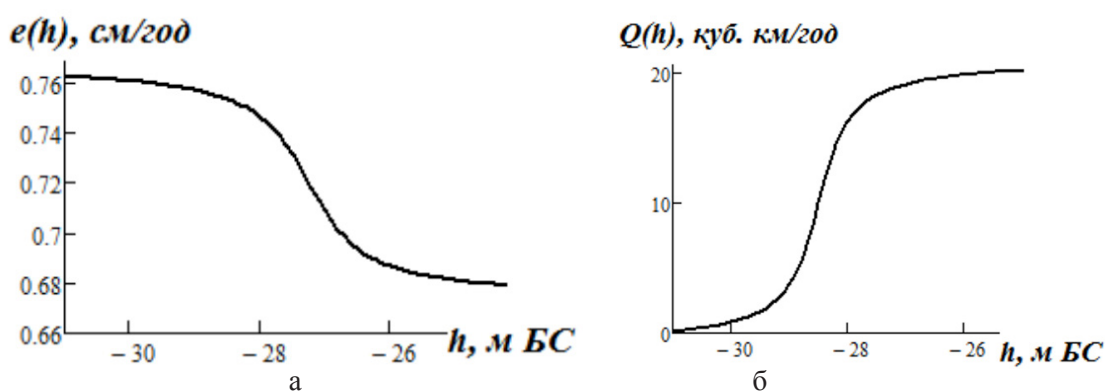


Рис. 1. Зависимости: (а) – слоя эффективного испарения с акватории Каспия $e(h)$ и (б) – объема $Q(h)$ оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол от уровня моря h

Основная морфометрическая характеристика моря – зависимость между площадью акватории F и уровнем Каспия h , $F(h)$. Обычно используется линейная аппроксимация этой зависимости:

$$F(h) = a + bh, \quad (6)$$

где a и b – числовые коэффициенты.

Зависимость $F(h)$ обычно имеет консервативный характер, поскольку влияние тектоники на объем чаши в течение порядка десятков лет, незначительно. Однако возможны изменения зависимости $F(h)$ по другим, техногенным, причинам. Например, как следствие отсечения мелководий дамбами, защищающими установки по добыче углеводородов. Зависимость оттока в залив Кара-Богаз-Гол (5) и зависимость площади зеркала моря от уровня воды в море (6) формируют две отрицательные обратные связи в механизме колебаний уровня Каспия.

С учетом (3)–(6) и в предположении, что $n_e(t) = 0$, уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{V(t)}{a + bh} - \left[-k \arctan[\mu(h-c)] + e_d \right] - \frac{\lambda \arctan[\varphi(h-d)] + q}{a + bh}. \quad (7)$$

Стохастическое дифференциальное уравнение (1) в некоторых случаях позволяет получить аналитическое выражение для п.р.в. уровня Каспия как решение

уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова. Подробно модель (1)–(7) рассмотрена в (Фролов, 2003).

Для прогноза уровня моря в прикладных задачах часто применяется разностная форма уравнения (1), дискретная по отношению ко времени. Для описания входных процессов в этом случае используется метод имитационного моделирования (метод Монте-Карло).

Наличие свободного оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол существенно влияет на урванный и соленостный режим Каспия: колебаний уровня при оттоке в залив моря уменьшаются по сравнению с бессточным морем, отток солей в залив препятствует осолонению основной части акватории Каспия (см., например, Kosarev et al., 2009; Фролов, 2016). Заметим, поскольку объемы оттока в залив составляет всего около 5% от притока в море, иногда приходят к выводу о незначительности влияния оттока на колебания уровня моря. Такой вывод совершенно неверен, поскольку объем оттока в залив надо сравнивать с *разностью* между объемами притока и эффективного испарения, и эти величины оказываются одного порядка.

Зависимость между оттоком морской воды в залив и уровнем моря в течение XX века менялась неоднократно. С ноября 1980 г. по июль 1992 г. пролив, соединяющий залив и море, был перекрыт дамбой, отток морской воды был практически прекращен. После разрушения дамбы сформировалась новая, ранее не наблюдавшаяся зависимость, как следствие увеличения поперечного сечения пролива примерно в два раза. Для прогнозных расчетов уровня Каспия необходимо использовать именно эту зависимость, приведенную на рис. 1а.

При прочих равных условиях, статистические характеристики моделируемого урванного режима Каспия существенно зависит от модели эффективного испарения. Длительное время эффективное испарение считалось не зависящим от уровня Каспия, хотя соображения о зависимости испарения от уровня Каспия высказывались достаточно давно: «... *средняя по водоему [Каспию] в целом высота слоя видимого испарения [...] зависит, при прочих равных условиях, [...] от уровня моря*» (Крицкий и др., 1975). Теоретическое обоснование гипотезы о зависимости испарения с поверхности моря от глубины (уровня) моря было впервые приведено в работе (Хублярян, Найденов, 1991).

Экспериментально зависимость испарения с поверхности Каспия от уровня установлена Г.Н. Паниным (Панин, 1987): в теплый период (апрель–август) испарение с мелководного Северного Каспия намного больше испарения со Среднего и Южного Каспия, причем в отдельные месяцы – в разы. Например, в мае слой испарения с Северного Каспия в 2–3 раза больше, чем соответствующая величина для Среднего и Южного Каспия: 100, 35 и 42 мм/месяц, соответственно (Панин, 1987). Такое различие в испарении по акватории моря вполне понятно, если учесть, что средняя глубина Северного Каспия – 4.4 м, Среднего Каспия – 192 и 345 м, соответственно (Каспийское море..., 1986; Zonn et al., 2010).

Эффективное испарение с акватории, описываемое функцией $e(h)$, формирует в механизме колебаний уровня положительную обратную связь, действующую в

некотором интервале отметок уровня. Таким образом, в общем случае, механизм колебаний уровня Каспия содержит две отрицательных и одну положительную обратные связи. Недочет любой из них при моделировании уровня Каспия приведет к неверным прогнозным оценкам статистических характеристик колебаний уровня моря. Наличие положительной обратной связи, формируемой нелинейной зависимостью $e(h)$, существенно усложняет вероятностное описание колебаний уровня моря. При определенных условиях, действие зависимости $e(h)$ может привести к бимодальной плотности распределения вероятности (п.р.в.) уровня. Необходимое (но не достаточное) условие бимодальности п.р.в. уровня – отсутствие свободного оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, то есть «бессточность» Каспия. Наличие же свободного оттока морской воды в залив, при определенном водном балансе моря, приводит к формированию одномодальной п.р.в. уровня Каспия. Модельные примеры видов п.р.в. уровня Каспия приведены на рис. 2а.

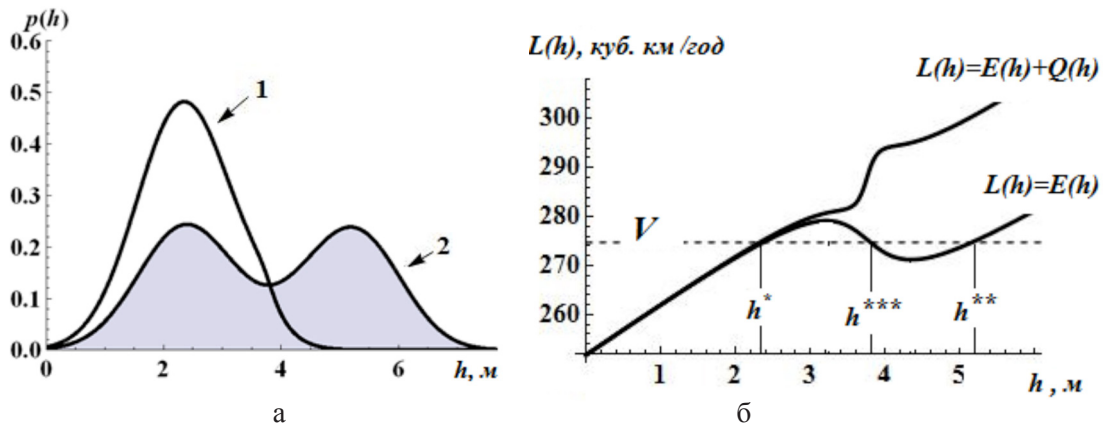


Рис. 2. (а) – плотности распределения вероятности уровня Каспия: одномодальная (1) и бимодальная (2); (б) – зависимости $L(h)$ объемов расхода воды из моря от уровня Каспия: для бессточного Каспия, $L(h) = E(h)$, и для проточного Каспия, $L(h) = E(h) + Q(h)$.

V – среднее притока–нетто в море, $E(h)$ и $Q(h)$ – объемы эффективного испарения с акватории Каспия и оттока морской воды в залив Кара-Богаз-Гол, соответственно. Уровни h^* и h^{**} – устойчивые равновесные, уровень h^{***} – неустойчивый равновесный.

Графики на рис. 2б иллюстрируют условия формирования числа мод п.р.в. уровня Каспия. При совместном действии положительной и отрицательной обратных связей, формируемых зависимостями объемов испарения $E(h)$ и оттока морской воды в залив $V(h)$, то есть при действии зависимости расхода воды из моря в виде $L(h) = E(h) + V(h)$, возможно только одномодальная п.р.в. уровня Каспия. Для бессточного Каспия, т.е. при $L(h) = E(h)$, бимодальный вид п.р.в. возможен, но, в рамках нашего модельного примера, только при притоке, имеющего величину математического ожидания из примерного интервала 271–278 куб. км/год. Таким образом, вид п.р.в. уровня моря зависит также от средней величины притока–нетто – разности между «естественным» притоком и безвозвратными изъятиями воды из рек, впадающих в море. В рассмотренном случае будут иметь три равновесных

уровня – два устойчивых h^* и h^{**} и один неустойчивый h^{***} . В окрестностях отметки уровня h^{***} имеет место положительная обратная связь, то есть чем выше уровень, тем меньше расход воды из моря.

Оценки будущих безвозвратных изъятий на промышленные, сельскохозяйственные, коммунальные и иные цели и, по существу, определяются следствием прогнозов социально-экономического развития прикаспийских стран. В силу сложности разработки таких прогнозов, часто принимаются экспертные оценки объемов безвозвратных изъятий, принимаемых постоянными на время заблаговременности прогноза уровня моря.

Прогнозируемые в бассейне Каспия варианты климатических изменений, используются в сценариях прогноза колебаний УКМ в виде соответствующих вариантов водного баланса моря. При этом, помимо результатов климатического моделирования на моделях МОЦА, может использоваться информация о водном балансе моря, полученная методами палеогеографии (см., например, Величко и др., 1988; Рычагов, 1994; Панин, Селезнева, 2011). Важным источником информации о возможных вариантах водного баланса служат результаты анализа средних величин и тенденций в составляющих водного баланса Каспия для характерных интервалов за период инструментальных наблюдений (см., например, Терзиев, Никонова, 2003; Chen et al., 2017).

Опыт применения сценарных прогнозов УКМ

Сценарные прогнозы УКМ были разработаны в рамках научных исследований по проекту Федеральной целевой программы «Каспий» в 1994–1995 гг.

Годы, прошедшее со времени разработки этих прогнозов, позволяют, сравнить насколько они оказались близки к фактическим отметкам уровня Каспия.

Подъем уровня моря в 1978–1995 гг. примерно на 2.5 м, от –29.0 до –26.5 м БС, привел к затоплению и подтоплению значительных территорий в прибрежной полосе и причинил большие экономические ущербы. Для разработки состава и масштабов мероприятий по берегозащите от наступающего моря было необходимо, в первую очередь, оценить вероятности экстремального подъема уровня при самом неблагоприятном развитии событий в ближайшие 5–10 лет. Большее время заблаговременности не рассматривалось в силу «турбулентности» экономических и социально-политических условий того времени в России и других прикаспийских государствах.

Поэтому было принято предположение о характеристиках будущего водного баланса моря, отвечающих наблюдениям за 1978–1995 гг. Такой баланс имел чрезвычайно многоводный характер. Речной приток в море принимался как приток-нетто (суммарный речной приток минус изъятия и другие потери). Отток в залив Кара-Богаз-Гол принимался постоянным, равным 20 куб. км/год, поскольку во время разработки прогноза у нас не было достоверных данных об оттоке морской воды в залив, установившимся после разрушения в июле 1992 г. дамбы, разделявшей залив

и море. Заметим, что принятие объема оттока в залив Кара-Богаз-Гол постоянной величиной физически означало, что из механизма колебаний уровня моря «изымалась» отрицательная обратная связь, формируемая оттоком морской воды в залив. Следовательно, увеличивалась оценка дисперсии уровня и, соответственно, увеличивался доверительный интервал для математического ожидания уровня.

Второй сценарий прогноза уровня Каспия базировался на использовании приблизительно среднего водного баланса моря как наиболее реального.

Механизм колебаний уровня моря моделировался линейной моделью для обоих сценариев. В то время модель, в которой предлагалась нелинейная детерминированная зависимость между объемом испаряемой воды с морской акватории от уровня моря (Хубларян, Найденов, 1991), имела чисто теоретический характер, поэтому практическое ее применение было бы не вполне оправданным.

Результаты прогнозирования уровня Каспия по названным двум сценариям приведены на рис. 3.

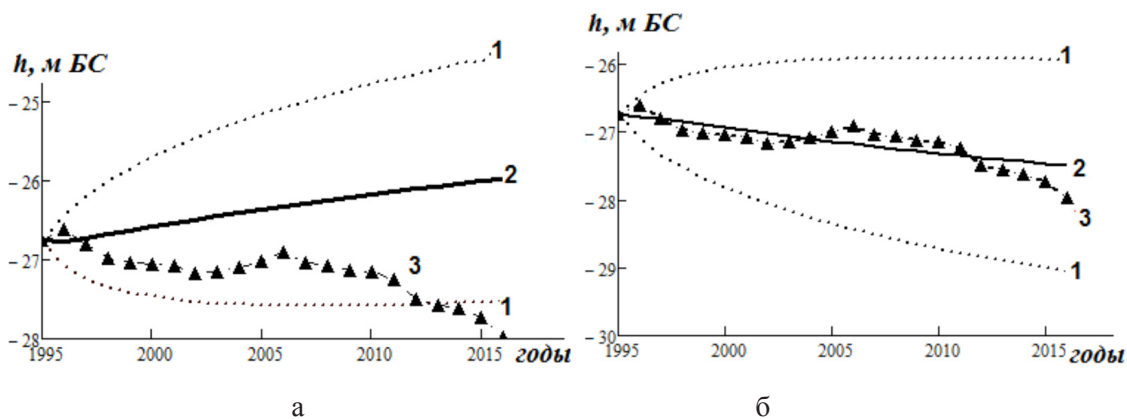


Рис. 3. Сценарные прогнозы уровня Каспия: (а) – для многоводного водного баланса 1978–1995 гг., (б) – для условно среднего водного баланса. Обозначения: 1 – границы 99% доверительного интервала, 2 – математическое ожидание уровня Каспия, 3 – наблюдаемые отметки уровня. По материалам научного обоснования Федеральной целевой программы «Каспий».

Подчеркнем, что прогноз уровня, приведенный на рис. 3а, имел целью оценить вероятность дальнейшего подъема уровня, ведущего к большим ущербам для экономики РФ и других прикаспийских стран. Именно поэтому в сценарии прогноза был заложен чрезвычайно многоводный баланс Каспия. На основе анализа полученных результатов был сделан вывод малой вероятности подъема уровня моря к 2005 г. выше отметки -25.5 БС даже при экстремально многоводном балансе Каспия. При относительно же среднемноговодном балансе моря повышение уровня моря выше отметки -26.0 БС оценивалось как чрезвычайно маловероятное (рис. 3б).

Сравнение фактического и прогнозного уровня моря на рис. 3б позволяет сделать вывод о полностью оправдавшемся прогнозе колебаний уровня Каспия вплоть до настоящего времени, то есть на интервале 1995–2018 гг.

Сценарные прогнозы колебаний уровня Каспия разрабатывались нами и для других прикладных целей – в рамках научного обеспечения проектов добычи углеводородов в акватории моря и при проектировании строительства крупного энергетического объекта на каспийском побережье. Эти прогнозы также оправдались.

Иллюстративный пример расчет уровня Каспия на перспективу до 2040 г, выполненный для начального значения уровня моря, равного -27.97 м БС, приведен на рис. 4.

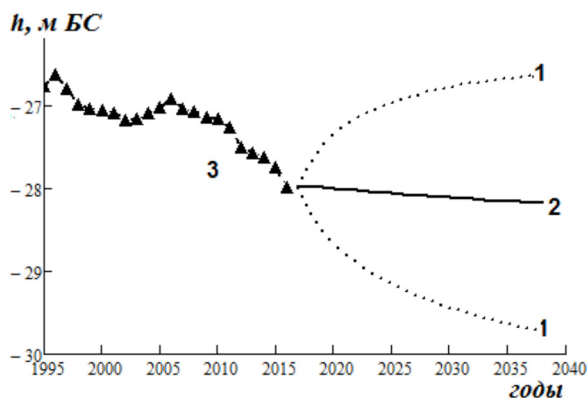


Рис. 4. Сценарный прогноз уровня Каспия: для условно среднего водного баланса. Обозначения: 1 – границы 99% доверительного интервала, 2 – математическое ожидание уровня Каспия, 3 – наблюдаемые отметки уровня.

При прогнозных расчетах уровня Каспия (рис. 4) учитывались оценки климатического изменения притока в Каспий как незначительного (Водные ресурсы..., 2008; Водный баланс..., 2016; Исмайылов, Муращенко, 2015), от -2 до $+10\%$ по отношению к средней величине, 300 куб. км.год. Безвозвратные изъятия стока оценивались 30 куб. км/год (Гидрометеорологические..., 2003). Эффективное испарение и зависимость оттока морской воды в залив принимались соответствующими современному режиму.

При оценках вероятности реального воздействия уровня моря на условия функционирования хозяйственных объектов необходимо учитывать весь спектр долгопериодных (многолетних) и короткопериодных (сезонных, стоно-нагонов, волн, сейш, приливов) компонент колебаний уровня Каспия (см., например, Фролов и др., 2000). В случаях наступления заранее непрогнозируемых воздействий на водный баланс моря, например, как это произошло с разрушением дамбы, отделявшей залив Кара-Богоз-Гол, прогноз уровня моря должен быть адаптирован для учета возникшей новой ситуации.

Заключение

Прогнозирование многолетних колебаний уровня Каспия, равно как других крупных водоемов представляет сложную научную задачу. Необходимым (но недостаточным) условием исчерпывающего ее решения является решение фундаментальной проблемы прогноза климата – проблемы, пока еще не решенной. Однако ряд прикладных задач необходимо решать уже сегодня, на основе имеющихся работ.

Оценки влияния климата на составляющие водного баланса моря зависят от многих факторов – от видов климатических моделей, вариантов эмиссии парниковых газов, от интерпретации моделирования климатических изменений и т.д. Прогноз прямых техногенных изменений водного баланса моря представляет собой не менее трудную задачу. По сути, такого рода прогноз имеет социально-экономический характер, что наиболее очевидно при оценке будущих объемов безвозвратного водопотребления из притока в Каспий. Развитие экономики прикаспийских стран может привести к увеличению таких изъятий в одних отраслях народного хозяйства и уменьшения в других, и практически невозможно предвидеть эти изменения. Поэтому иногда прибегают к прогнозу речного притока-нетто, не выделяя природную и техногенную составляющую. Такой прогноз притока можно условно назвать «инерционным», распространяющим сложившийся режим притока-нетто на перспективу уровня прогноза.

Принятие предположений о характеристиках водного баланса моря, определяющих уровневый сценарий, в значительной мере экспертный характер. Обеспечения нормального функционирования действующих и проектируемых экономических объектов в прибрежной зоне и акватории Каспия часто требует информации о колебаниях уровня в будущем. Такие задачи в настоящее время решаются в рамках сценарного подхода, дающего некоторый будущий диапазон отметок, в котором ожидаются с определенной вероятностью колебания уровня моря. Вероятностная форма сценарного прогноза есть следствие стохастичности природных и техногенных процессов, формирующих динамику уровня моря.

С физической точки зрения, колебания уровня Каспия естественно рассматривать как выходной процесс гидрологической системы с входными процессами – основными компонентами водного баланса водоема. Эта система может иметь несколько выходных процессов, например, отток воды из моря как функция уровня. Некоторые компоненты водного баланса могут иметь составляющие, относящиеся к входным и к выходным процессам. Например, возможен случай, когда испарение с акватории состоит из двух независимых составляющих – детерминированной, функционально зависящей от уровня воды в водоеме (т.е. относящейся к выходным процессам), и стохастической (относящейся к входным процессам).

Для прогнозирования уровня Каспия применяются различные модификации динамико-стохастических моделей в виде систем дифференциальных или разностных стохастических уравнений, решаемых аналитически или численно. Эти модели должны включать в себя физико-математическое описание механизма колебаний уровня и входных процессов – компонент водного баланса моря. *Совокупность принятых при конструировании модели уровня прогноза предположений относительно механизма его формирования и основных составляющих водного баланса образуют сценарий прогноза уровня.* Оценки статистических характеристик будущих колебаний уровня находятся применительно к сценариям, при выборе которых учитываются особенности поставленной прикладной задачи. Например, при расчете уровня моря, обеспечивающего функциональной глубины морского канала,

наибольший интерес представляют оценки вероятности снижения уровня до некоторых отметок, при которых необходимо проведение дноуглубительных работ. В этом случае для сценарного прогноза используются варианты маловодного и/или средневодного баланса моря. Другой пример – оценка вероятностей повышения уровня выше некоторых отметок, для которого берется сценарий многоводного водного баланса моря. С некоторой долей условности, можно сказать, что сценарный прогноз уровня Каспия имеет «индивидуальный» характер, задаваемый решаемой задачей. В этом смысле сценарных прогнозов уровня Каспия.

Особо отметим возможность применения сценарного подхода при исследовании уровня режима и водного баланса Каспия в палеовремени.

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0001 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0) Государственного задания ИВП РАН (в части имитационного моделирования уровня режима Каспия) и при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00215) (в части построения усовершенствованной нелинейной динамико-стохастической модели колебаний уровня Каспия).

Литература

- Величко А.А., Климанов В.А., Беляев А.В.* Реконструкция стока Волги и водного баланса Каспия в оптимумы микулинского межледниковья и голоцена // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1988. № 1. С. 27–37.
- Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз. Под ред. Е.С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
- Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. Под ред. И.А. Шикломанова и А.С. Васильева. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 400 с.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г.* Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е – 2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207.
- Голицын Г.С., Мохов И.И., Хон В.Ч.* Диагностика и моделирование гидрологического режима в бассейне Каспийского моря // Экологические проблемы Каспия: РАН и Нац. акад. США: Сб. докл. междунар. науч. семинара по экологическим проблемам прикаспийского региона. 1–3 дек. 1999 г. Москва. Под. ред. М.Г. Хубляряна. М.–Киров: 2000. С. 28–37.
- Голицын Г.С., Раткович Д.Я., Фортус М.И., Фролов А.В.* О современном подъеме уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1998. Т. 25. № 2. С. 133–139.
- Добровольский С.Г.* Климатические изменения в системе «гидросфера-атмосфера». М.: ГЕОС, 2002. 230 с.
- Зильберштейн О.И., Вербицкая О.А., Попов С.К., Лобов А.Л.* Метод прогноза штормовых нагонов для Северного Каспия на основе данных региональной модели атмосферы // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. Под ред. И.А. Шикломанова и А.С. Васильева. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. С. 327–341.
- Исмайлов Г.Х., Муращенкова Н.В.* Изменчивость стока реки Волги в первой половине XXI века с учетом возможного изменения климата // Природообустройство. 2015. № 4. С. 66–72.

- Каспийское море. Гидрология и гидрохимия. Под. ред. С.С. Байдина и А.Н. Косарева. М.: Наука, 1986. 261 с.
- Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Некоторые положения статистической теории колебаний уровней естественных водоемов и их применение к исследованию режима Каспийского моря // Труды Первого совещания по регулированию стока. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 76–93.
- Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Море, 2005. 366 с.
- Малинин В.Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб: РГМИ, 1994. 158 с.
- Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 283 с.
- Панин А.В., Селезнева Е.В. Воднобалансовые характеристики Палеокаспия на основе новой гипсографической кривой // Теоретические проблемы совр. геоморфологии, теория и практика изучения геоморфологических систем. Материалы XXXI Пленума Геоморфологической комиссии РАН, Астрахань, 5–9 октября 2011 г. Часть I. Астрахань: Техноград, 2011. С.77–82.
- Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 86 с.
- Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Под ред. Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева и А.А. Керимова. С-Пб.: Гидрометеоиздат, 1992. 358 с.
- Рычагов Г.И. Прогноз уровня Каспийского моря на основе палеогеографических реконструкций // Вестник МГУ. Сер.5. География. 1994. № 3. С.71–76.
- Терзиев Ф.С., Никонова Р.Е. Некоторые итоги изучения современного гидрометеорологического режима Каспийского моря и перспективы дальнейших исследований // Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. Под ред. И.А. Шикломанова и А.С. Васильева. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 239–253.
- Фролов А.В. Моделирование влияния оттока в залив Кара-Богаз-Гол на плотность распределения вероятности уровня Каспийского моря // Математическое моделирование и численные методы. 2016. № 3 (11). С. 79–92.
- Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: Геос, 2003. 170 с.
- Фролов А.В., Зильберштейн О.И., Музылев С.В. Особенности расчета экстремальных уровней в прибрежно-шельфовой зоне Каспийского моря / Экологические проблемы Каспия. РАН и Нац. акад. США / Сборник докладов междунар. научн. семинара по экологическим проблемам прикаспийского региона. 1–3 декабря 1999, г. Москва. / Под ред. М.Г. Хубларяна. М.: – Киров. 2000. С. 176–180.
- Хубларян М.Г., Найденов В.И. О тепловом механизме колебаний уровня водоемов // Доклады АН СССР. 1991. Т. 319. № 6. С. 1438–1444.
- Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю., Ежов А.В. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря. В монографии «Водные ресурсы России их использование». Под ред. И.А. Шикломанова. СПб: Государственный гидрологический институт, 2008. С. 327–341 с.
- Arpe K., Leroy S.A. The Caspian sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled // Quatern. Int. 2007. Vol. 173–174. P. 144–152.
- Arpe K., Leroy S.A.G., Lahijani H., Khan V. Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level // Hydrology and Earth System Sciences. 2012. Vol. 16. P. 19–27. DOI: 10.5194/hess-16-19-2012.

- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., Safarov E.S. Longterm Caspian Sea level change // *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 6993–7001. DOI: 10.1002/2017GL073958.
- Elguindi N., Giorgi F. Simulating future Caspian Sea level changes using regional climate model outputs // *Climate Dynamics*. 2007. Vol. 28. P. 365–379.
- Elguindi N., Somot S., Dequ M., Ludwig W. Climate change evolution of the hydrological balance of the Mediterranean, Black and Caspian Seas: impact of climate model resolution // *Clim. Dynam.* 2011. Vol. 36. P. 205–228.
- Frolov A.V. The Caspian Sea as Stochastic Reservoir // *Hydrological Models for Environmental Management*. NATO Science Series 2. Environmental Security. 2002. Vol. 2. Dordrecht/Boston/London: Kluwer Acad. Publishers, 2000. P. 91–108.
- GholamReza R., Masumeh M., Grab S. Modeling Caspian Sea water level oscillations under different scenarios of increasing atmospheric carbon dioxide concentrations // *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 2012. Vol. 9. No. 24. <http://www.ijehse.com/content/9/1/24>.
- Kislov A., Panin A., Toropov P. Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations // *Quaternary International*. 2014. 345. P. 48–55.
- Klemeš V. Physically based stochastic hydrologic analysis // *Advances in Hydroscience*, 1978. Vol. 11. P. 285–356.
- Kosarev A.N., Kostianoy A.G., Zonn I.S. Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution // *Aquatic Geochemistry*. 2009. Vol. 15. No. 1–2. Special Issue: Saline Lakes and Global Change. P. 223–236.
- Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Solovyov D.M. Satellite monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysk and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River. – In: *The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan*, (Eds.) Zonn I.S., A.G. Kostianoy. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2014. Vol. 28. P. 197–232.
- Zonn I.S., Kostianoy A.G., Kosarev A.N., Glantz M. *The Caspian Sea Encyclopedia*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2010. 527 p.

SCENARIO FORECASTS OF THE CASPIAN SEA FLUCTUATIONS IN THE LEVEL UNDER CLIMATIC AND MAN-MADE IMPACTS ON THE SEA WATER BALANCE

Frolov A.V.

Water Problems Institute of RAS, ul. Gubkina, 3, Moscow, 119333, Russia

e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

Submitted 11.03.2019, accepted 13.12.2019

The paper deal with the scenario method for predicting long-term fluctuations in the Caspian Sea level. The scenario forecasts are included:

- Model of the sea level fluctuations mechanism,
- Models of the main components of the sea water balance,
- Morphometric characteristics of sea,
- Dependence between the outflow of water into the Kara-Bogaz-Gol Bay and the sea level,
- Assessments of possible direct technogenic impacts on the sea water balance, for example, the withdrawals of water from the inflow into the sea.

The Caspian Sea level long-term fluctuations are considered by us as the output process of

a non-linear hydrological system. The mechanism of the Caspian level fluctuations contains two negative and one positive feedback. The dependences of the Caspian sea area and the outflow from the sea into the Kara-Bogaz-Gulf bay on the sea level form negative feedbacks. Positive feedback is formed by the nonlinear dependence of evaporation from the sea area on the sea level. Under certain conditions, the effect of this dependence can lead to the sea level bimodal probability distribution density. A necessary (but not sufficient) condition for bimodality is the absence of free seawater inflow from the sea into Kara-Bogaz-Gol. The results of scenario forecasts of the Caspian Sea level developed within the framework of the Caspian Federal Targeted Program (1994-95) are presented. The linear and nonlinear models of the sea level fluctuations used in scenario forecasts are discussed. Failure to take into account of any kind of the feedbacks leads to incorrect predictive estimates of the sea level fluctuations statistical characteristics.

Keywords: scenario forecasts, long-term fluctuations in the Caspian sea level, non-linear hydrological system, Fokker-Plank-Kolmogorov equation, probability distribution density, bimodality, Kara-Bogaz-Gol

References

- Arpe K. and Leroy S.A. The Caspian sea level forced by the atmospheric circulation, as observed and modeled. *Quatern. Int.*, 2007, 173–174, pp. 144–152.
- Arpe K., Leroy S.A.G., Lahijani H., and Khan V. Impact of the European Russia drought in 2010 on the Caspian Sea level. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, Vol. 16, pp. 19–27, doi: 10.5194/hess-16-19-2012.
- Chen J.L., Pekker T., Wilson C.R., Tapley B.D., Kostianoy A.G., Cretaux J.-F., and Safarov E.S. Longterm Caspian Sea level change. *Geophysical Research Letters*, 2017, Vol. 44, pp. 6993–7001, doi: 10.1002/2017GL073958.
- Dobrovolskiy S.G. Klimaticheskie izmeneniya v sisteme «gidrosfera-atmosfera» (Climatic changes in the system “hydrosphere-atmosphere”). Moscow: GEOS, 2002, 230 p.
- Elguindi N. and Giorgi F. Simulating future Caspian Sea level changes using regional climate model outputs. *Climate Dynamics*, 2007, Vol. 28, pp. 365–379.
- Elguindi N., Somot S., Dequ M., and Ludwig W. Climate change evolution of the hydrological balance of the Mediterranean, Black and Caspian Seas: impact of climate model resolution. *Clim. Dynam.*, 2011, Vol. 36, pp. 205–228.
- Frolov A.V. Modelirovanie mnogoletnikh kolebaniy urovnya Kaspiyskogo morya: teoriya i prilozheniya (Simulation of the long-term fluctuations in the level of the Caspian Sea: theory and applications). Moscow: Geos, 2003, 170 p.
- Frolov A.V. Modelirovanie vliyaniya ottoka v zaliv Kara-Bogaz-Gol na plotnost' raspredeleniya veroyatnosti urovnya Kaspiyskogo moray (Modeling of the impact of the outflow to Kara-Bogaz-Gol Bay on the Caspian Sea level probability density distribution). *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody*, 2016, No. 3 (11), pp. 79–92.
- Frolov A.V. The Caspian Sea as Stochastic Reservoir. *Hydrological Models for Environmental Management. NATO Science Series 2. Environmental Security. Vol. 2.* Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publishers, 2002, pp. 91–108.
- Frolov A.V., Zil'bershteyn O.I., and Muzylev S.V. Osobennosti rascheta ekstremal'nykh urovney v pribrezhno-shel'fovoy zone Kaspiyskogo moray (Features of the calculation of extreme levels in the coastal-shelf zone of the Caspian Sea). *Ekologicheskie problemy Kaspiya. Sbornik dokladov mehdunarjdnoy nauchnoy seminaro po ekologicheskim problemam prikaspiyskogo regiona. 1–3 dek. 1999 g.* Moskva. Eds M.G. Khublaryana. Moscow–Kirov: 2000, pp. 176–180.

- GholamReza R., Masumeh M., and Grab S.* Modeling Caspian Sea water level oscillations under different scenarios of increasing atmospheric carbon dioxide concentrations. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 2012, Vol. 9, 24 p. <http://www.ijehse.com/content/9/1/24>.
- Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. Pod redactsiey I.A. Shiklomanova i A.S.Vasil'eva. (Hydrometeorological aspects of the Caspian Sea and its basin, Ed by I.A. Shiklomanov and A.S. Vasil'ev. Sankt-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003, 400 p.
- Ginzburg A.I. and Kostianoy A.G.* Tendentsii izmenenij gidrometeorologicheskikh parametrovKaspijskogo morja v sovremennyj period (1990 – 2017). (Trends in the hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990 – 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 195–207.
- Golitsyn G.S., Moxov I.I., and Hon V.CH.* Diagnostika i modelirovanie gidrologicheskogo rechima v basseyne Kaspiyskogo moray (Diagnostics and modeling of the hydrological regime in the Caspian Sea basin). *Ekologicheskie problemy Kaspiya. Sbornik.dokladov. mehdunarjdno. nauchno. seminaro po ekologicheskim problemam prikaspiyskogo regiona*, 1–3 dek. 1999, Moscow, Pod redactsiey M.G. Khublaryana, Moscow–Kirov: 2000, pp. 28–37.
- Golitsyn G.S., Ratkovich D.YA., Fortus M.I., and Frolov A.V.* O sovremennom pod'eme urovnya Kaspiyskogo moray (On the modern rise of the level of the Caspian Sea). *Vodnye resursy*, 1998, Vol. 25, No. 2, pp. 133–139.
- Ismajlov G.H. and Muraschenkova N.V.* Izmenchivost' stoka reki Volgi v pervoj polovineXXI veka s uchetoм vozmozhnogo izmeneniya klimata. (Variability of the Volga River runoff in the first half of the 21st century, taking into account possible climate change, *Environmental Engineering. Prirodoobustrojstvo*, 2015, Vol. 4, p. 66–72.
- Kaspijskoe more. Gidrologija i gidrohimiya. Pod. red. S.S. Bajdina i A.N. Kosareva. (The Caspian Sea. Hydrology and hydrochemistry. Eds. S.S. Baydin and A.N. Kosarev), Moscow: Nauka, 1986, 261 p.
- Khublaryan M.G. and Naydenov V.I.* O teplovom mehanizme kolebaniy urovnya vodoemov (On the thermal mechanism of fluctuations in the level of water bodies). *DAN SSSR*, 1991, Vol. 319, No. 6, pp. 1438–1444.
- Kislov A., Panin A., and Toropov P.* Current status and palaeostages of the Caspian Sea as a potential evaluation tool for climate model simulations. *Quaternary International*, 2014, Vol. 345, pp. 48–55.
- Klemeš V.* Physically based stochastic hydrologic analysis. *Advances in Hydroscience*, 1978, Vol. 11, pp. 285–356.
- Kosarev A.N., Kostianoy A.G., and Zonn I.S.* Kara-Bogaz-Gol Bay: Physical and Chemical Evolution. *Aquatic Geochemistry*, 2009, Vol. 15, No. 1–2, Special Issue: Saline Lakes and Global Change, pp. 223–236.
- Kostianoy A.G., Lebedev S.A., and Solovyov D.M.* Satellite monitoring of the Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Sarykamysh and Altyn Asyr Lakes, and Amu Darya River. – In: *The Turkmen Lake Altyn Asyr and Water Resources in Turkmenistan*, (Eds.) Zonn I.S., A.G. Kostianoy, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2014, Vol. 28. pp. 197–232.
- Kritskiy S.N. and Menkel' M.F.* Nekotorye polocheniya statisticheskoy teorii kolebaniy urovney estestvennyh vodoemov i ih primenenie k issledovaniю rechima Kaspiyskogo morya (Some provisions of the statistical theory of fluctuations in the levels of natural water bodies and their application to the study of the Caspian Sea regime). *Trudy Pervogo soveshaniya po*

- regulirovaniyu stoka, Moscow–Leningrd: Izdatelstvovo AN SSSR, 1946, pp. 76–93.
- Lebedev S.A. and Kostianoy A.G.* Sputnikovaya al'timetriya Kaspiyskogo morya (Satellite altimetry of the Caspian sea). Moscow: More, 2005, 366 p.
- Malinin V.N.* Problema prognoza urovnya Kaspiyskogo moray (The problem of forecasting the level of the Caspian Sea). Sankt- Petersburg: RGMI, 1994, 158 p.
- Muzylev S.V., Prival'skiy V.E., and Ratkovich D.Ya.* Stokhasticheskie modeli v inchenernoy gidrologii (Stochastic models in engineering hydrology). Moscow: Nauka, 1982, 283 p.
- Panin A.V. and Selezneva E.V.* Vodnobilansovye harakteristiki Paleokaspiya na osnove novoj gipsograficheskoy krivoj. Teoreticheskie problemy sovr. geomorfologii, teorija i praktika izuchenija geomorfologicheskikh sistem. (Water-balance characteristics of the Paleocaspian on the basis of a new gypsographic curve, Theoretical problems sovr. geomorphology, theory and practice of studying geomorphological systems). Proc. of the XXXI Plenum of the Geomorphological Commission of the Russian Academy of Sciences, Astrakhan, October 5–9, 2011. Part I. Astrakhan: Technograd, 2011, pp. 77–82.
- Panin G.N.* Isparenie i teploobmen Kaspiyskogo moray (Evaporation and heat exchange of the Caspian Sea). Moscow: Nauka, 1987, 88 p.
- Proekt "Morya". Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei. Tom VI. Kaspiyskoe more. Vyp. 1 Gidrometeorologicheskie usloviya (Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Vol. 6 The Caspian Sea. Issue 1, Hydrometeorological conditions, Ed. Terziev F.S.), St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 358 p.
- Rychagov G.I.* Prognoz urovnya Kaspiyskogo morya na osnove paleogeograficheskikh rekonstruktsiy (Forecast of the Caspian Sea level based on paleogeographic reconstructions). *Vestnik MGU, Seriya 5, Geografiya*, 1994, No. 3, pp. 71–76.
- Shiklomanov I.A., Georgievskij V.Ju., and Ezhov A.V.* Veroyatnostnyj prognoz urovnja Kaspiyskogo morja. V monografii «Vodnye resursy Rossii ih ispol'zovanie». Pod red. I.A. Shiklomanova. (Probabilistic forecast of the Caspian Sea level. In the monograph «Water resources of Russia their use.» Ed. I.A. Shiklomanov. Sankt-Petersburg: State Hydrological Institute, 2008, pp. 327–341.
- Terziev F.S. and Nikonova R.E.* Nekotorye itogi izucheniya sovremennogo gidrometeorologicheskogo rechima Kaspiyskogo morya i perspektivy dal'neyshix issledovaniy. Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna. Eds. I.A. Shiklomanov and A.S. Vasil'ev. (Some results of studying the Caspian Sea modern hydrometeorological regime and prospects for further research). Sankt-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003, pp. 239–253.
- Velitchko A.A., Klimanov V.A., and Belyaev A.V.* Rekonstruktsiya stoka Volgi i vodnogo balansa Kaspiya v optimumy mikulinskogo mekhlednikov'ya i golotsena (Reconstruction of the Volga runoff and the Caspian water balance into the optimum of the Mikulinsky interglacial and Holocene). *Izvestiya AN SSSR, Seria geograficheskaya*, 1988, No. 1, pp. 27–37.
- Vodnyy balans i kolebaniya urovnya Kaspiyskogo morya. Modelirovanie i prognoz. Pod redactsiey E.S. Nesterova. (Water balance and fluctuations in the level of the Caspian Sea. Modeling and forecast, Ed. by E.S. Nesterov). Moscow: Triada Ltd, 2016, 378 p.
- Zil'bershteyn O.I., Verbitskaya O.A., Popov S.K., and Lobov A.L.* Metod prognoza shtormovykh nagonov dlya Severnogo Kaspiya na osnove dannykh regional'noy modeli atmosfery, Pod redactsiey I.A. Shiklomanova i A.S. Vasil'eva (The method of forecasting storm surges for the North Caspian Sea based on data from a regional atmospheric model, Eds. I.A. Shiklomanov and A.S. Vasil'ev). Gidrometeorologicheskie aspekty problemy Kaspiyskogo morya i ego basseyna, Sankt–Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003, pp. 327–341.
- Zonn I.S., Kostianoy A.G., Kosarev A.N., and Glantz M.* The Caspian Sea Encyclopedia. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2010, 527 p.