УДК 556.048

https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-5-19

Оригинальная статья / Original paper

К задаче управления уровнем Каспийского моря

М. В. Болгов[1,2]

bolgovmv@mail.ru

[1] *Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия*
[2] *Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Прогнозирование уровня Каспийского моря, характеризующегося значительной временной дисперсией, представляет собой сложнейшую задачу современной гидрометеорологии. Наблюдающиеся непредсказуемые колебания уровня моря, обусловленные, в числе прочих причин, происходящими климатическими изменениями, оказывают огромное воздействие на экосистему моря и на объекты инженерной инфраструктуры на побережье. Решение многих прикладных задач увязывается с возможностями управления уровнем Каспийского моря, в т. ч. при реализации масштабных проектов перераспределения водных ресурсов в пределах больших географических регионов. В статье рассматриваются модели и методы описания колебаний уровня моря и управления его водным режимом. **Методы.** Основной метод исследования – вероятностное моделирование уровенного режима моря на основе решения стохастического уравнения его водного баланса, а также определение оптимального управления уровнем воды методом динамического программирования. **Результаты.** На основе имеющихся данных наблюдений и выводов, опубликованных в разных работах, в части обоснования вероятностных моделей, оценивания параметров и схем управления уровнем Каспия, предложены оценки водных ресурсов, необходимые для решения поставленной задачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Каспийское море, колебания уровня воды, водные ресурсы, стохастическое моделирование, вероятностное прогнозирование, управление, динамическое программирование

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Часть работы, связанная с обоснованием алгоритма динамического программирования, выполнена в рамках темы № FMWZ-2026-0004 Государственного задания ИВП РАН.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Болгов М. В. К задаче управления уровнем Каспийского моря // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 5–19; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-5-19; EDN: NSMYZJ

БЛАГОДАРНОСТИ: Автор выражает признательность А. Е Косолапову за полезные дискуссии по обсуждаемому вопросу.

© Болгов М. В., 2026

On the problem of the Caspian Sea level management

Mikhail V. Bolgov[1,2]

bolgovmv@mail.ru

[1] *Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection, Rostov-on-Don, Russia*
[2] *Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. Predicting sea level in the Caspian Sea, characterized by significant temporal variability, is a complex task in modern hydrometeorology. The observed unpredictable sea level fluctuations, caused, among other factors, by ongoing climate change, have a significant impact on the marine ecosystem and coastal infrastructure. The solution of many applied problems is linked to the potential for Caspian Sea level management, including the implementation of large-scale water resource redistribution projects across large geographic regions. This article discusses models and methods for describing sea level fluctuations and managing its water regime. **Methods.** The primary research method is probabilistic modeling of sea level conditions based on solving a stochastic water balance equation, as well as determining optimal water level control using dynamic programming. **Results.** Based on available observational data and conclusions published in various studies on the validation of probabilistic models, estimation of parameters, and schemes for controlling the Caspian Sea's water level, water resource estimates necessary for solving the problem are proposed.

KEYWORDS: Caspian Sea, water level fluctuations, water resources, stochastic modeling, probabilistic forecasting, control, dynamic programming

FINANCING: A part of work associated with substantiation of the dynamic programming algorithm has been performed within the framework of topic No. FMWZ-2026-0004 of the State Assignment of VPI of the RAS.

FOR CITATION: Bolgov M. V. On the problem of the Caspian Sea level management. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2026. No. 5. P. 5–19; https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-5-5-19; EDN: NSMYZJ

ACKNOWLEDGEMENTS: The Author expresses his highly appreciation to A. E. Kosolapov for helpful discussions of the matter under consideration.

ВВЕДЕНИЕ

Решение инженерных задач, связанных с использованием и управлением водными ресурсами, осуществляется на основе научно обоснованных моделей, адекватно воспроизводящих свойства гидрологического режима рек и озер и позволяющих решать технические (водохозяйственные) задачи с приемлемой точностью. Среди них особо выделяются вопросы многолетнего ре-

гулирования стока и прогнозирования уровня воды замкнутых водоемов. Эти задачи требуют создания адекватных вероятностных моделей многолетней изменчивости гидрологических явлений, что в целом затруднено по причине ограниченного объема данных натурных наблюдений: имеющиеся временные ряды имеют продолжительность, как правило, не более 100 лет. Тем не менее стохастические модели многолетних колебаний стока и уровня водоемов были разработаны в советской инженерной гидрологии С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем в 1940-е годы [1, 2], затем существенно дополнены в их же работах и впоследствии получили развитие в трудах М. И. Будыко, М. И. Багрова, В. Е. Привальского, Д. Я. Ратковича, И. А. Шикломанова и многих других ученых [3–10]. Упомянутыми выше авторами исследовались задачи моделирования в различной постановке (непрерывной и дискретной). Важным мотивационным поводом для разработки таких моделей и постановки задачи управления уровнем моря были планировавшиеся в те годы, но не реализованные по разным причинам проекты территориального перераспределения водных ресурсов СССР.

Непредсказуемое поведение уровня Каспийского моря (рис. 1) приводило к большим ущербам для экономики прибрежных территорий, что побуждало обсуждение различных подходов к его управлению [11–14]. Выдвигались идеи отсечения мелководных частей акватории моря как источника значительных потерь воды на испарение, исследовались возможности перераспределения стока как в бассейн Волги, так и из бассейна Каспийского моря (при повышении уровня моря), предлагалось регулировать отток в залив Кара-Богаз-Гол. Из упомянутого перечня было реализовано одно мероприятие – перекрытие пролива, соединяющего залив Кара-Богаз-Гол с морем, путем сооружения «глухой» дамбы. При последовавшем за этим внезапном повышении моря эта перемычка была разрушена в 1990-е годы. Залив в тот период высыхал практически полностью.

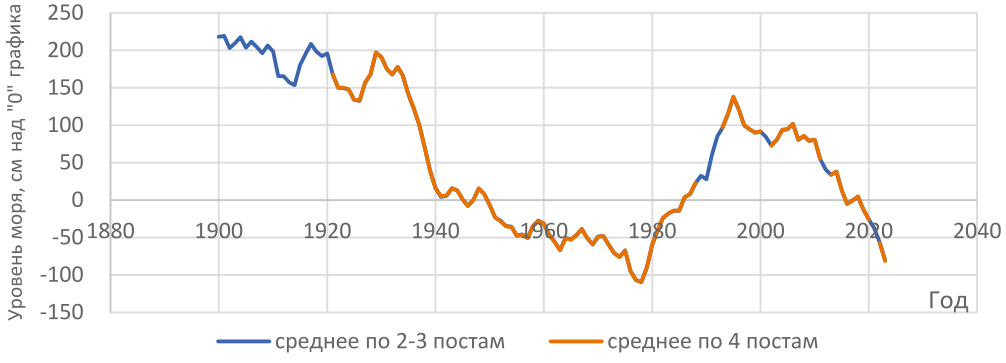


Рис. 1. Среднегодовые уровни Каспийского моря, осредненные по четырем пунктам наблюдений (по данным CASPCOM)

Fig. 1. The Caspian Sea average annual levels averaged by four items of observations (according to CASPCOM data)

Предметом данной статьи является обсуждение реализуемости имеющихся подходов к управлению уровнем Каспийского моря в части оценки величины управленческих воздействий. Задача решается на основе вероятностного прогноза колебаний уровня Каспийского моря, который, в свою очередь, осуществляется при ряде ограничений и приближений. Основное приближение состоит в том, что рассматриваемая гидрологическая задача решается в «нульмерной» постановке: предполагается, что вся масса моря сосредоточена в точке и пространственной изменчивостью структуры объекта можно пренебречь. В действительности пространственная изменчивость процессов довольно значительна: неравномерно распределены по площади характеристики испарения и осадков, сток Волги, составляющий более 80 % от общего притока, сосредоточен в одной точке в северной части моря. В результате поверхность моря имеет уклон с севера на юг, среднее падение составляет примерно 20 см.

Каспийское море не является абсолютно замкнутым водоемом, часть воды вытекает в залив Кара-Богаз-Гол. Зависимость величины оттока в залив от уровня моря носит нелинейный характер, и эта нелинейность в аналитических моделях вероятностного прогноза, как правило, не учитывается по причине сложности получаемых уравнений. В аналитических выводах и оценках отток в залив учитывается как некоторое среднее значение, на которое уменьшается норма притока. Однако если и учесть эту зависимость при проведении имитационных расчетов, то надо иметь в виду, что расход в проливе зависит еще и от степени размыва (или занесения) его русла. Такого рода оценки делаются по факту происхождения, например, после раскрытия дамбы, перекрывавшей пролив, поперечный профиль сильно изменился. Учесть такие изменения в прогнозных расчетах на многолетний период сложно.

Вероятностные модели многолетней изменчивости побуждающих процессов (притока и испарения) в инженерной гидрологии обычно рассматриваются в классе стационарных марковских процессов. Стационарным при такой постановке является и процесс колебаний уровня моря. Марковость временных рядов является приближением, но имеющиеся в распоряжении гидрологов временные ряды не позволяли обосновывать более сложные гипотезы. Сегодня по причине климатических изменений необходимо принимать во внимание нарушение стационарности наблюдаемых и прогнозируемых временных рядов и использовать более сложные подходы. На рис. 2 и рис. 3 представлены колебания основных гидрометеорологических параметров – суммарного притока воды к морю и испарения с водной поверхности. Практически реализуемой гипотезой является предположение о том, что новый режим многолетних колебаний гидрометеорологических процессов, по крайней мере на период планирования водохозяйственной деятельности, будет также марковским и стационарным, но неопределенность оценок параметров распределений может возрастать.

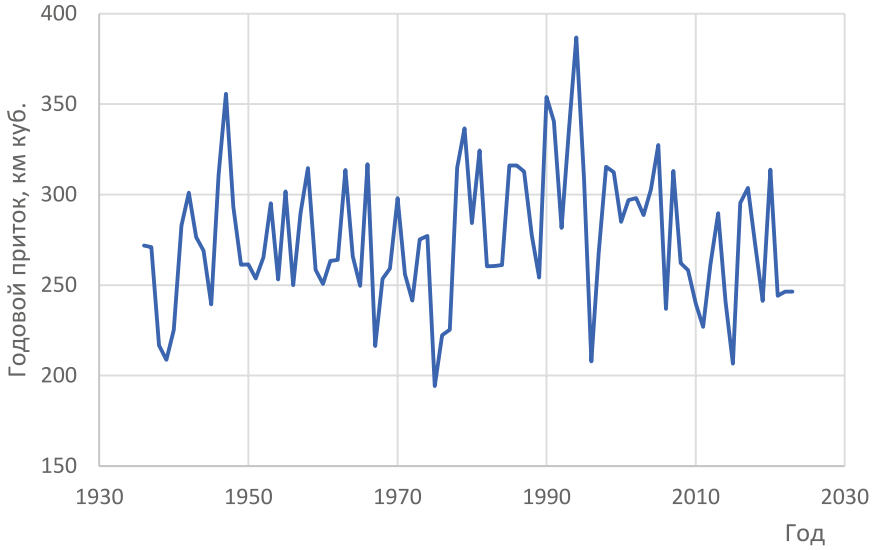


Рис. 2. Многолетние колебания суммарного притока воды к Каспийскому морю
Fig. 2. Many-year fluctuations of the total water inflow to the Caspian Sea

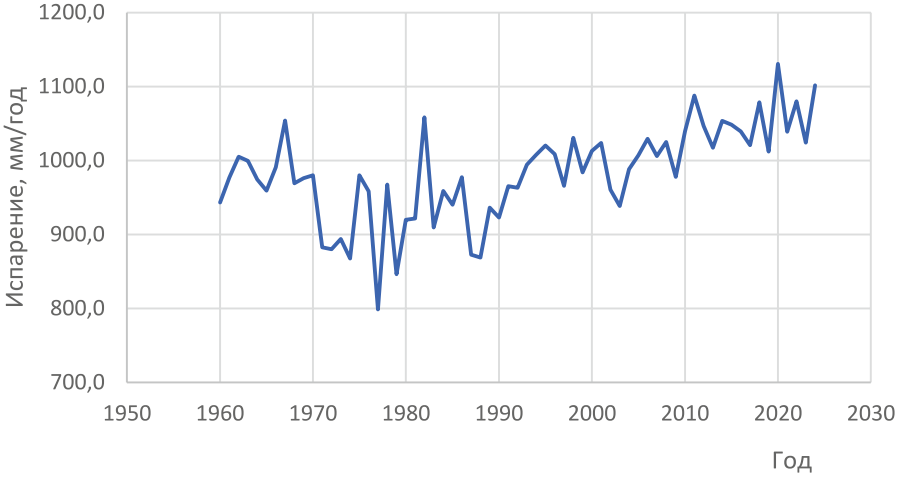


Рис. 3. Испарение с водной поверхности моря по данным реанализа
Fig. 3. Evaporation from the sea water surface according to the retrospective analysis data

Величины испарения с водной поверхности моря и значения речного притока в данной постановке задачи управления рассматриваются как независимые случайные величины. Не зависит величина слоя испарения и от уровня моря. Конечно, гидрофизические процессы на Каспии определяются многими параметрами, и испарение, например, в прибрежной мелководной части может зависеть от глубины (толщины слоя воды), от параметров волновой деятельности, которая также определяется глубиной в береговой зоне. Проблема состоит в невозможности объективной оценки этих эффектов: необходимых измерений практически не проводится, а сама прибрежная полоса моря явля-

ется лишь небольшой частью всей акватории Каспия. Практически не измеряются и осадки на водную поверхность моря (только на береговых станциях), что вынуждает использовать в расчетах разницу испарения и осадков, т. н. видимое испарение. Значения видимого испарения можно получить по данным обратных водобалансовых расчетов.

Безвозвратное водопотребление, учитываемое в виде констант, на будущие расчетные периоды может быть задано только в виде сценариев. Неопределенность оценок водопотребления велика, а эффект может быть заметным. Так, например, дополнительные 10 км^3/год безвозвратных изъятий могут понизить уровень равновесия до полуметра, что необходимо учитывать при прогнозах.

Располагая оценками основных компонентов водного баланса (речного притока и видимого испарения), а также методикой расчета уровня воды водоема, можно перейти к изучению возможности управления его уровенным режимом. Задача управления уровнем моря предполагает, кроме знания свойств объекта управления, еще и формулирование стратегии управления. В случае Каспийского моря возможными стратегиями управления могут быть либо дополнительное поступление воды в море за счет территориального перераспределения стока, либо изъятия стока с соответствующей передачей в другие бассейны, либо регулируемый сброс в залив Кара-Богаз-Гол. Предметом статьи являются оценки возможных управляющих воздействий, обеспечивающих желательный уровенный режим моря, не затрагивая обоснования возможности дополнительного источника воды или водоприемника.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача управления уровнем моря предполагает использование вероятностной модели многолетних колебаний уровня воды такой степени сложности, которая позволяет учитывать основные факторы процесса и с достаточной степенью надежности находить оптимальное управление. Для этих целей в ряде работ применяется аппарат цепей Маркова различной сложности, к обсуждению возможностей которого обратимся далее.

В дискретной форме уравнение водного баланса моря в форме последовательностей наполнения моря для смежных моментов времени получено С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем [1, 2] и в обозначениях М. С. Маркиша [12] для годовых интервалов времени записывается в следующем виде:

$$W_{t+1} = \varphi W_t + v_t - e_t F_0 + K_t - Z_t, \quad (1)$$

где t – номер года;

W – объем воды в море, выраженный в отклонениях от уровня тяготения;

v_t – объем годового притока в естественных условиях;

e_t – величина видимого испарения;

F_0 – площадь водного зеркала, соответствующего уровню тяготения;

φ – постоянная, зависящая от наклона берегов и среднего слоя видимого испарения;

K_t – объем дополнительной переброски (управление);

Z_t – объем изъятий (безвозвратного водопотребления).

В постановке, рассмотренной в [12–14], полагалось, что величина изъятий носит случайный характер и эта изменчивость должна учитываться в прогнозах. Однако надо отметить, что величина изъятий оценивается весьма приближенно, ее вариации по годам зависят от функционирования и развития экономики государств, чьи территории расположены в бассейне моря. Изменчивость испарения с водохранилищ существенно меньше изменчивости притока к морю, и безвозвратные изъятия в целом составляют первые проценты от общего объема притока. Эффект влияния изменчивости изъятий на уровенный режим моря оказывается весьма незначительным, поэтому мы можем этой изменчивостью в дальнейшем пренебречь и рассматривать величины изъятий как константы для отдельных лет.

Для поиска оптимальной стратегии управления М. С. Маркишем сделаны следующие допущения. Пренебрегая изменчивостью дополнительных изъятий, примем, что величины $a_t = v_t - e_t F_0$ образуют некоррелированную случайную последовательность с нулевым средним и дисперсией $\sigma^2 = \sigma_v^2 + F_0^2 \sigma_e^2$. Тогда уравнение динамики наполнения Каспийского моря принимает вид:

$$W_{t+1} = \varphi W_t + a_t + K_t - Z_t. \qquad (2)$$

Уравнение (2) записано нами без учета временной изменчивости безвозвратных изъятий.

Далее делается предположение, что величина управляющего воздействия (управления) ограничена $0 \le K_t \le G_t$, где G_t – максимальный объем дополнительных водных ресурсов (мощность управления), доступный в *t*-м году. Собственно задача управления заключается в поддержании уровня моря в пределах требуемого диапазона колебаний, который задается с помощью верхнего (H_{max}) и нижнего (H_{min}) пределов. Иначе это можно интерпретировать как указание на то, что время пребывания уровня моря внутри заданного интервала должно быть максимально.

Цель управления задается как удержание уровня воды в море в пределах интервала [H_{max}, H_{min}] с наибольшей вероятностью. Оптимальную стратегию в работе [12] предложено искать в форме $0 \le \widehat{K_t(W)} \le G_t$, т. е. в виде функции от состояния системы (наполнения моря *W*) и времени *t*. В этом случае за пределами оптимального интервала управление равно либо 0, либо G_t.

Сделанные выше допущения принимались автором работы [12], исходя из решения поставленной в те годы задачи: оптимальное управление уровнем моря должно было осуществляться в режиме компенсации растущих заборов воды на нужды безвозвратного водопотребления (в основном орошения) за счет реализации проектов межбассейновой переброски стока рек. В современных условиях, когда объем безвозвратного водопотребления стабилизировался, а к возможностям межбассейновой переброски стока начали подходить, исходя из приоритета экологических последствий и экономической целесообразности, постановка задачи поиска оптимального управления изменяется. Нижний предел управления в общем случае не может быть равен нулю, поскольку в стационарных условиях дополнительное питание будет приводить к росту среднего уровня моря.

Обратимся к задаче поиска оптимального управления уровнем моря. Для этого в работе [12] предложено определять оптимальную стратегию управления методом динамического программирования на основе принципа оптимальности Беллмана. Уравнение Беллмана предложено записывать в следующем виде:

$$\chi_{\mathrm{t}}(W) = MAX_{\mathrm{k_t}} \left[\int_{\mathrm{w_{min}}}^{\mathrm{w_{max}}} dF_{\mathrm{t+1}}(y/w)(1 + \chi_{\mathrm{t+1}}(y))\right]. \quad (3)$$

Здесь *F(y/w)* обозначает условную функцию распределения наполнения моря *y* в момент времени *t*+1 при заданном наполнении *w* в момент времени *t*. В предложенной постановке критерием управления служит вероятность попадания уровня воды в заданный интервал управления, и эта вероятность должна быть максимальной.

Для задания условного распределения наполнения водоема применяется подход, известный в теории регулирования стока [15] и заключающийся в следующем. В соответствии с уравнением (2) условная функция распределения вероятностей наполнения моря *y* в последующий момент времени *t*+1 при заданном наполнении *w* в момент времени *t* равна функции распределения результирующей случайных величин притока и испарения:

$$F_{\mathrm{w_{t+1}}}(y/w) = F_{\mathrm{\varphi w + a_t - k_t + z_t}} = F_{\mathrm{a_t}}(y - \varphi w - k_{\mathrm{t}} + Z_{\mathrm{t}}). \quad (4)$$

Поскольку для функции распределения результирующей случайных величин притока и испарения применим нормальный закон распределения *N* с нулевым средним и дисперсией σ^2, рассчитываемой по формуле суммы дисперсий компонент, то уравнение (4) перепишется в виде:

$$\chi_t(W) = MAX_{\mathrm{k_t}} \left[\int_{\mathrm{w_{min}}}^{\mathrm{w_{max}}} N'(y - \varphi w - K_{\mathrm{t}} + Z_{\mathrm{t}})\,(1 + \chi_{\mathrm{t+1}}(y))\right]. \quad (5)$$

Из условия максимума выражения в квадратных скобках в правой части уравнения (5) находится оптимальное управление $\widehat{K}_t$.

Поиск оптимального управления на основе принципа динамического программирования заключается в последовательном решении обратным ходом по времени уравнения (5). На каждом временном интервале ищется управление, которое доставляет максимум интегралу в правой части уравнения (5) для каждого наполнения моря. Выполнив серию расчетов для всех наполнений моря, получим оптимальное управление в виде объема ежегодно добавляемой воды в зависимости от уровня моря.

Располагая оптимальным управлением и формулой (4), можно рассчитать закон распределения вероятностей наполнения моря в последующий момент времени при заданном распределении в настоящий момент. Стационарная задача может быть решена на основе соответствующего интегрального уравнения [16]. При известном начальном уровне моря предполагается, что его распределение вероятностей аппроксимируется дельта-функцией, которая, в свою очередь, заменяется нормальным распределением вероятностей с малой дисперсией. Это вполне допустимо, так как уровень моря всегда известен с некоторой погрешностью, определяемой ошибками измерений.

Для определения закона распределения наполнения моря в произвольный момент времени М. С. Маркишем предложено применить формулу полной вероятности, которая, в марковском случае, записывается в следующем виде:

$$f_{t+1}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f_t(y) dF_{w_{t+1}}(w/y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_t(y) N'(w - \varphi y - \widehat{K}_t + Z_t)\, dy. \quad (6)$$

Выполнив численное интегрирование в формуле (6) для достаточно продолжительного периода времени, получаем стационарное распределение вероятностей наполнений уровня Каспийского моря. Для проверки правильности вычислений и допустимости сделанных предположений сравним результаты вычисления интеграла в уравнении (6) с параметрами распределений уровня моря, полученными путем аналитического решения стохастического дифференциального уравнения водного баланса моря В. Е. Привальским и др. Как показано в работе [6], в стационарном случае среднеквадратическое отклонение (СКО) уровня моря при линейной зависимости площади от уровня составляет 0,81 м. Численное решение уравнения (6) при отсутствии управления и тех же параметрах притока и испарения, принятых в работе [6], дает значение СКО, равное 0,78. Это допустимое расхождение, поскольку в рассмотренной вероятностной схеме не учитывается автокорреляция побуждающих процессов. В работе [17] показано, что при использовании марковского приближения для уровней моря условная дисперсия несколько завышается при заблаговременности вероятностного прогноза до 10 лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основной вопрос при определении оптимального варианта управления уровнем моря заключается в назначении диапазона колебаний, приемлемого исходя из технических или экологических соображений. Этот диапазон будет различным для задач инженерной защиты прибрежных территорий, для экологических задач, для сохранения и воспроизводства водных биоресурсов, для задач поддержания устойчивого функционирования объектов транспортной инфраструктуры. В инженерной практике для оценки гидрологических характеристик используется понятие расчетной обеспеченности, отвечающей некоторой заданной надежности систем или сооружений. В случае Каспийского моря таких систем много, каждый объект проектируется на свою расчетную обеспеченность, поэтому обоснование допустимого интервала управления моря еще предстоит выполнить с учетом множества экологических, технических и экономических факторов. Целью данного исследования является оценка возможности поддержания «назначенного» из некоторых соображений диапазона уровней за счет управления с различными показателями.

Как отмечалось выше, в имеющихся аналитических подходах и оценках колебания уровня моря рассчитывались без учета оттока в залив Кара-Богаз-Гол. Это относится и к работам М. С. Маркиша, и к оценкам В. Е. Привальского, и ко многим другим. Точнее можно сказать, что отток в залив учитывается путем корректировки нормы притока. В ряде работ указывается, что зависимость оттока от уровня моря может быть аппроксимирована однозначной кривой при ее ограничении сверху максимальным значением испаряющей способности залива 20 км^3 в год. В таком случае уравнение (2) перепишем в следующем виде:

$$W_{t+1} = \varphi W_t + a_t + K_t - Z_t - KBG(w). \qquad (7)$$

Поскольку связь оттока в залив и уровня моря принимается функциональной, то условная вероятность наполнения уровня моря в случае расчетов по формуле (7) по-прежнему будет определяться вероятностью побуждающих факторов (притока и испарения).

Выбор оптимального управления, конечно, потребует технико-экономического обоснования мероприятий, что предметом данного исследования не является. Дальнейшие расчеты оптимального управления выполним при заданных значениях гидрометеорологических параметров и некоторых сценарных показателях управленческих воздействий. Уровень тяготения Каспийского моря составляет −28,5 м БС, что соответствует норме притока 275 км^3/год и слою видимого испарения 0,75 м/год. В качестве допустимого интервала колебаний уровня моря примем двухметровый диапазон −29,5…−27,5 м. Здесь и далее все отметки в Балтийской системе. Дисперсия годовых значений притока составит 2500 км^6, дисперсия годовых значений видимого испарения – 0,007 м^2.

Дальнейшие расчеты выполняются для нескольких вариантов, перечисленных в табл. 1. Зададимся предельными значениями мощности управления G_t и выполним оптимизационные расчеты методом динамического программирования. G_t примем постоянным во времени, что не является ограничением метода, т. к. допускается изменение по времени всех параметров разностного уравнения (7).

Таблица 1. Варианты управления уровнем Каспийского моря
Table 1. Versions of the Caspian Sea level management

№	Описание варианта управления	Обозначения на рис. 1
1	Вариант без учета оттока в залив Кара-Богаз-Гол (КБГ) со значением мощности 20 км^3/год и с нижним значением мощности, равным 0	Ряд 1
2	Вариант с учетом оттока в залив КБГ со значением мощности 20 км^3/год и с нижним значением мощности управления, равным 0	Ряд 2
3	Вариант с учетом оттока в залив КБГ со значением мощности 2 км^3/год 0 и с нижним значением мощности управления, равным −20 км^3/год	Ряд 3
4	Вариант с учетом оттока в залив КБГ со значением мощности 40 км^3/год и нижним значением −10 км^3/год	Ряд 4

В табл. 2 и на рис. 4 приведены результаты поиска оптимального управления в виде параметров распределений прогнозных плотностей распределения уровня моря при практически стационарном состоянии (через 50 лет расчетов).

На рис. 4 представлены прогнозные плотности распределения уровня Каспийского моря для различных значений максимальной мощности управления. Под номером 5 на рис. 4 дополнительно приведена плотность распределения уровня моря для варианта при отсутствии управления и без учета водообмена с заливом Кара-Богаз-Гол. По результатам расчетов можно отметить следующее.

Рассмотренная ранее в работе [12] схема управления без учета оттока в Кара-Богаз-Гол позволяет повысить минимальные значения уровня моря (ниже уровня тяготения), но уровни выше среднего в этой схеме практически не регулируются. Выше отметки −27,5 м плотности с управлением и без управления практически совпадают. Нахождение уровня моря в оптимальном двухметровом диапазоне имеет в этом случае вероятность 92 %.

В предложенной схеме расчетов, но уже с учетом оттока в залив, удается стабилизировать колебания уровня моря в заданном диапазоне с вероятностью 99 % при максимальной мощности управления 20 км^3 в год. Такая вероятность является приемлемой, например, для целей инженерной защиты территорий. При увеличении мощности управления до 40 км^3 в год и при возможности реверсивного управления (например, допуская передачу водных ресурсов в бассейн Дона в объеме 10 км^3 в год) вероятность нахождения в оптимальном диапазоне будет составлять 99,9 %.

Распределение вероятностей уровня моря в стационарном режиме будет при реализации управления отличаться от нормального, но не столь значительно. Величина эксцесса распределения доходит до 4 и более.

Таблица 2. Параметры уровня Каспийского моря при различных вариантах управления при начальном уровне воды −29,3 м

Table 2. The Caspian Sea level parameters with different versions of management at the initial –29.3 m water level

№	Верхний предел мощности управления G_{max}, км³/год	Нижний предел мощности управления G_{min}, км³/год	Вероятность попадания в оптимальный интервал через 50 лет	Параметры распределения уровня моря через 50 лет после начала расчета			
			P, в долях от 1	Среднее, м	СКО, м	Асимметрия	Эксцесс
1	20	0	0,921	−28,23	0,48	0,43	3,6
2	20	0	0,989	−28,48	0,36	−0,05	3,8
3	20	−20	0,995	−28,53	0,29	−0,54	4,3
4	40	−10	0,999	−28,46	0,24	0,19	4,0

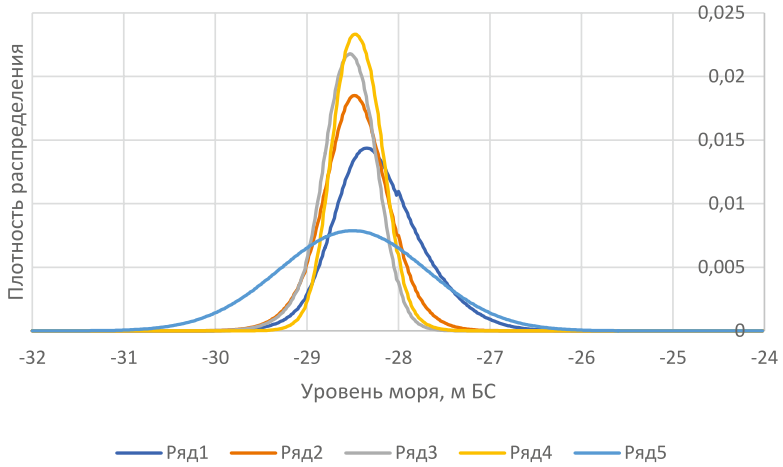


Рис. 4. Плотности распределения уровня Каспийского моря при различных подходах к управлению. Условные обозначения в тексте и в табл. 1

Fig. 4. The Caspian Sea level distribution densities with different approaches to management. The legent in the text and in Table 1

Важный результат, сформулированный в работах М. С. Маркиша и подтвержденный в данном исследовании, заключается в форме зависимости оптимального управления от уровня моря. В работах [13, 14] М. С. Маркиш обосновывал так называемый релейный принцип управления. При таком подходе последовательность управляющих воздействий принимает либо максимальное, либо минимальное значение. Промежуточные значения не оптимальны. Выполненные расчеты показали, что при реализации схемы динамического программирования получается именно такой результат, представленный на

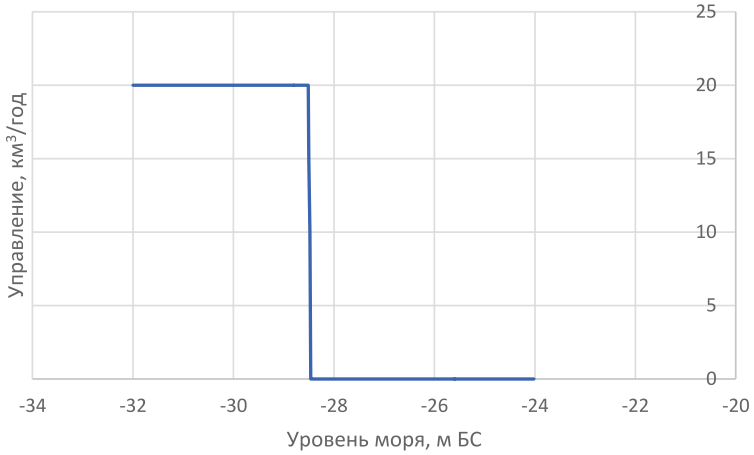


Рис. 5. Оптимальное управление уровнем Каспийского моря
Fig. 5. The Caspian Sea level optimal management

рис. 5. При уровне моря ниже уровня тяготения система подачи воды работает на полную мощность, а при превышении этого уровня подача воды прекращается.

ВЫВОДЫ

По результатам выполненного исследования возможностей управления уровнем Каспийского моря можно сформулировать следующие выводы.

Используя в качестве критерия оптимизации вероятность попадания уровня моря в заданный оптимальный интервал, можно методом динамического программирования обосновать режимы управления при заданной мощности. При мощности управления 20 км^3 в год вероятность нахождения уровня моря в двухметровом оптимальном диапазоне составит 99 %, что достаточно для большинства технических задач.

Следует отметить, что эта величина мощности несколько превышает весь годовой объем так называемой планировавшейся «северной» переброски стока в бассейн Волги [18], что означает необходимость тщательного технико-экономического обоснования поиска дополнительного источника.

Отдельной, но связанной задачей является обоснование оптимального интервала колебаний уровня Каспия, исходя из условий инженерной защиты прибрежных территорий, надежности функционирования транспортной инфраструктуры, условий функционирования экосистемы моря в части условий воспроизводства водных биоресурсов и т. д. Эта задача пока не решена.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The author declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Труды Гидропроекта. 1964. № 12. С. 29–61.
2. Крицкий С. Н. Методика анализа и расчета колебаний уровня замкнутых водоемов // Водные ресурсы. 1973. № 6. С. 9–26.
3. Багров Н. А. О колебаниях уровня бессточных озер // Метеорология и гидрология. 1963. № 6. С. 41–46.
4. Будыко М. И., Юдин М. И. О колебаниях уровня непроточных озер // Метеорология и гидрология. 1960. № 8. С. 15–19.
5. Крицкий С. Н., Коренистов Д. В., Раткович Д. Я. Колебания уровня Каспийского моря (анализ режима и вероятностный прогноз). М.: Наука, 1975. 158 с.
6. Музылев С. В., Привальский В. Е., Раткович Д. Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 184 с.
7. Болгов М. В., Красножон Г. Ф., Любушин А. А. Каспийское море: Экстремальные гидрологические события. М.: Наука, 2007. 381 с.
8. Болгов М. В., Филимонова М. К. Об источниках неопределенности при прогнозировании уровня Каспийского моря и оценке риска затопления прибрежных территорий // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 664–669.
9. Раткович Д. Я., Болгов М. В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1994. Т. 21. № 4. С. 389–404.
10. Шикломанов И. А., Георгиевский В. Ю., Ежов А. В. Вероятностный прогноз уровня Каспийского моря. В кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 327–341.
11. Подольский Е. М. Проблема оптимального управления уровнем Каспийского моря и методические основы ее решения // Водные ресурсы. 1975. № 4. С. 81–108.
12. Маркиш М. С. Об оптимальном управлении уровнем бессточного водоема (на примере Каспийского моря) // Водные ресурсы. 1977. № 5. С. 42–46.
13. Маркиш М. С. Управление уровнем замкнутого водоема в стационарном режиме // Водные ресурсы. 1979. № 3. С. 28–38.
14. Маркиш М. С. Об оптимальном регулировании уровня Каспийского моря // Водные ресурсы. 1982. № 2. С. 20–35.
15. Картвелишвили Н. А. К теории многолетнего регулирования речного стока // Известия ВНИИ гидротехники. Л., 1958. Т. 58. С. 231–232.
16. Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 192 с.
17. Болгов М. В. Марковские процессы в задаче прогнозирования уровня замкнутого водоема // Метеорология и гидрология. 2005. № 11. С. 74–85.
18. Проблема территориального перераспределения водных ресурсов. Под ред. Г. В. Воропаева и Д. Я. Ратковича. М.: Изд-во АН СССР. Институт водных проблем, 1985. 504 с.

REFERENCES

1. Kritsky S. N., Menkel M. F. Fluctuations in the Level of Enclosed Reservoirs. *Proceedings of Gidroproekt*. 1964. No. 12. P. 29–61.
2. Kritsky S. N. Methodology for Analysis and Calculation of Fluctuations in the Level of Enclosed Reservoirs. *Water Resources*. 1973. No. 6. P. 9–26.
3. Bagrov N. A. On Fluctuations in the Level of Endorheic Lakes. *Meteorology and Hydrology*. 1963. No. 6. P. 41–46.
4. Budyko M. I., Yudin M. I. On Fluctuations in the Level of Stagnant Lakes. *Meteorology and Hydrology*. 1960. No. 8. P. 15–19.
5. Kritsky S. N., Korenistov D. V., Ratkovich D. Ya. Caspian Sea Level Fluctuations: Regime Analysis and Probability Forecast. Moscow: Nauka, 1975. 158 p.

6. Muzylev S. V., Privalsky V. E., Ratkovich D. Ya. Stochastic Models in Engineering Hydrology. Moscow: Nauka, 1982. 184 p.
7. Bolgov M. V., Krasnozhon G. F., Lyubushin A. A. Caspian Sea: Extreme Hydrological Events. Moscow: Nauka, 2007. 381 p.
8. Bolgov M. V., Filimonova M. K. On the Sources of Uncertainty in Caspian Sea Level Forecasting and Assessing the Risk of Coastal Flooding. *Water Resources*. 2005. Vol. 32. No. 6. P. 664–669.
9. Ratkovich D. Ya., Bolgov M. V. Study of Probabilistic Regularities of Long-Term Fluctuations in the Caspian Sea Level. *Water Resources*. 1994. Vol. 21. No. 4. P. 389–404.
10. Shiklomanov I. A., Georgievskiy V. Yu., Yezhov A. V. Probabilistic Forecast of the Caspian Sea Level. In: Hydrometeorological Aspects of the Problem of the Caspian Sea and Its Basin. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003. P. 327–341.
11. Podolskiy E. M. The Problem of Optimal Control of the Caspian Sea Level and Methodological Foundations of Its Solution. *Water Resources*. 1975. No. 4. P. 81–108.
12. Markish, M. S. On Optimal Control of the Water Level of an Endorheic Reservoir (using the Caspian Sea as an Example). *Water Resources*. 1977. No. 5. P. 42–46.
13. Markish M. S. Control of the Water Level of an Enclosed Reservoir in a Steady-State Mode. *Water Resources*. 1979. No. 3. P. 28–38.
14. Markish M. S. On Optimal Regulation of the Caspian Sea Water Level. *Water Resources.* 1982. No. 2. P. 20–35.
15. Kartvelishvili N. A. On the Theory of Long-Term River Flow Regulation. *Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydrotechnics*. Leningrad. 1958. Vol. 58. P. 231–232.
16. Kartvelishvili N. A. Theory of Probability Processes in Hydrology and River Flow Regulation. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 192 p.
17. Bolgov M. V. Markov Processes in the Problem of Forecasting the Water Level of a Closed Reservoir. *Meteorology and Hydrology*. 2005. No. 11. P. 74–85.
18. The Problem of Territorial Redistribution of Water Resources. Ed. by G. V. Voropaev and D. Ya. Ratkovich. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. Institute of Water Problems, 1985. 504 p.

Сведения об авторе

Болгов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, лаборатория моделирования поверхностных вод, отдел поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем РАН», 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3; главный научный сотрудник, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, 10а; https://orcid.org/0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

About the author:

Mikhail V. Bolgov, Principal Researcher (PhD, Doctor of Science (habilitation)), Laboratory of Surface Water Modeling, Department of Surface Waters, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, 119333, Russia, Moscow, ul. Gubkina, 3; Principal researcher, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (RosNIIVKh), Russia, 344037, Rostov-on-Don, 10a Chentsova Street; https://orcid.org/0000-0003-3193-6488; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 19.08.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 01.09.2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.