

УДК 556.048

ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕГО УРОВЕННОГО РЕЖИМА КАСПИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАННЕХВАЛЫНСКОЙ И ПОЗДНЕХВАЛЫНСКОЙ ТРАНСГРЕССИЯМ¹

© 2024 г. А. В. Фролов*

Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

*e-mail: anatolyfrolov@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.11.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята к публикации 27.11.2023 г.

Приведены результаты динамико-статистического моделирования многолетних колебаний уровня Каспийского моря применительно к раннехвалынской (буйнакская стадия) и позднехвалынской (махачкалинская стадия) трансгрессиям. Обоснована применимость для палео-Каспия линеаризованной модели колебаний уровня Каспия с отрицательной обратной связью, формируемой зависимостью площади акватории моря от уровня воды в нем. Расчеты проводились на основе результатов имитационного и аналитического моделирования. Показано, что режимы многолетних колебаний уровня палео-Каспия для рассмотренных трансгрессий различаются. Например, для ранне- и позднехвалынской трансгрессий дисперсия уровня Каспийского моря равна 4.2 и 2.5 м² соответственно, средняя длительность выбросов уровня за равновесную отметку в течение одного выброса равна ~50 и ~40 лет соответственно. Оценки длительности выбросов могут быть использованы для оценки возможности образования во время длительных выбросов уровня Каспия различных прибрежно-шельфовых геоморфологических форм. Полученные характеристики процессов многолетних колебаний уровня моря – дисперсия, автокорреляция, плотность распределения вероятности, средняя длительность выбросов выше (ниже) заданных отметок уровня в течение одного выброса, зависимость параметра инерционности колебаний уровня существенно расширяют представления о характере колебаний уровня Каспия в палеовремени.

Ключевые слова: моделирование колебания уровня Каспийского моря, хвалынские трансгрессии.

DOI: 10.31857/S0321059624040029 EDN: AQBQKU

ВВЕДЕНИЕ

Обращение к палеоистории Каспия дает возможность исследовать его уровенный режим в климатических условиях, существенно отличающихся от современных, и тем самым расширить представления о закономерностях колебаний уровня моря.

Выбор стадий хвалынских трансгрессий для моделирования колебаний уровня Каспийского моря (УКМ) обусловлен учетом следующих обстоятельств.

Во-первых, для исследуемых стадий равновесные отметки уровня Каспия находятся на рассто-

янии, обеспечивающим отсутствие пересечений моделируемых реализаций уровня. Под равновесной отметкой уровня h^* воды в бессточном водоеме понимается та отметка, при которой площадь акватории F^* расходует слой эффективного испарения e^* (разность между слоями испарения и осадков на акваторию), равный слою поступления воды в водоем q^* ; площадь акватории F^* в этом случае называется равновесной площадью. Разница в ~20 м между равновесными отметками уровня УКМ для ранне- и позднехвалынской трансгрессий (РХвТ и ПХвТ) обеспечивает моделирование колебаний уровня, моря происходивших в “непересекающихся” климатических условиях.

Во-вторых, существенно, что выделение именно этих трансгрессий в палеоистории Каспия надежно подтверждается результатами геоморфологического анализа рельефа и слагающих

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-17-00215, тема “Исследование и моделирование возможных сценариев формирования экстремальных палеогеоморфологических явлений в бассейне Каспия в позднеледниковье”).

его осадков на фоне и с учетом общегеографических закономерностей [4, 11, 16, 19, 20]

Многолетний режим колебаний уровней воды в естественных водоемах зависит в основном от двух факторов, условно называемых внешним и внутренним. Под внешним фактором понимается влияние климатических условий в бассейнах водоемов, внутренний фактор определяется особенностями механизма колебаний уровня [3, 4, 12–13, 16, 21–24, 33–36, 38–40, 42–48]. Действие внешнего фактора проявляется в изменениях параметров водного баланса водоемов. Внутренний фактор обусловлен особенностями морфометрии водоемов и для проточных озер наличием зависимости оттока из водоема от уровня воды в нем. Уровни воды и площади акваторий озер интегрально реагируют на изменения составляющих водного баланса озерных водосборов, тем самым выступая косвенными индикаторами (“проxy-indicators” [43]) климатических изменений на водосборах.

Ранне- и позднехвалынская трансгрессии Каспия происходили при различных режимах водного баланса и уровня моря. Оценки времени и продолжительности хвалынских трансгрессий различных авторов различаются. Примерные времена ХвТ и ПХвТ оцениваются интервалами: от >30 000 до 17 000 л. н. и 16 000–9 000 л. н. соответственно [2, 4, 10, 20–24].

Для РХвТ Каспия моделировали многолетние колебания УКМ для буйнакской стадии, когда равновесный уровень, по оценкам [16, 20, 35–36], был ~ +21...+22 м БС. Для моделирования многолетних колебаний УКМ в ПХвТ рассматривалась стадия ее максимального развития – махачкалинская – при отметках равновесного уровня 0...+2 м БС [4, 16, 20]. Поскольку отток морской воды через Манычский пролив и демпфирующее влияние оттока в зал. Кара-Богаз-Гол отсутствовали на рассматриваемых стадиях хвалынских трансгрессий – буйнакской стадии РХвТ (например, [20]) и махачкалинской стадии ПХвТ – Каспийское море рассматривалось как бессточный водоем.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель настоящего исследования – моделирование многолетних колебаний уровня Каспия

для условий РХвТ и ПХвТ и выявление особенностей многолетнего уровня режима моря при существенно более высоких, по сравнению с современными, отметок уровня моря.

Реконструкции колебаний УКМ для различных интервалов палеовремени в том или ином виде содержатся в работах Г.И. Рычагова; О.К. Леонтьева и П.В. Федорова; С.И. Варущенко, А.Н. Варущенко и Р.К. Клиге; А.А. Свиточа; Т.А. Яниной [4, 11, 19–24, 35, 36] и многих других исследователей.

Шаг по времени отметок уровня моря в этих исследованиях составляет порядка ста лет при длительности рассматриваемых периодов времени в тысячи лет. Исключение, по-видимому, – только реконструкция УКМ для последних примерно 2600 лет [4] с 10-летней дискретностью. В настоящем исследовании дискретность вариаций УКМ равна 1 году, что позволяет сравнивать статистические параметры уровня палео- и современного Каспия.

Особенность данного исследования, в отличие от проведенных ранее, заключается в моделировании, но не реконструкции (не восстановлении календарного хода) уровня палео-Каспия. Моделирование колебаний УКМ в этом случае не требует календарных рядов восстановленных величин речного притока в море и эффективного испарения, обычно оцениваемых по не очень надежным корреляционным зависимостям с температурой воды в море, воздуха и т. п. В данном случае под сценариями водного баланса палео-Каспия понимаются некоторые наборы статистических характеристик компонент водного баланса моря. Для оценки этих характеристик применялась экстраполяция соответствующих современных зависимостей, установленных С.Г. Добровольским [6], например – зависимость коэффициента вариации притока в море от площади водосбора водоема и т. п.

Моделирование многолетних колебаний УКМ на основе сценариев (вариантов) водного баланса моря проводилось в рамках динамико-стохастического (ДС) подхода.

При этом решались следующие задачи: 1) обоснование сценариев водного баланса моря для РХвТ

и ПХвТ; 2) оценка влияния параметров притока в море и эффективного испарения с его акватории, а также особенностей морфометрии чаши моря на основные характеристики многолетних колебаний УКМ, в частности, на параметр инерционности УКМ. Другими словами, оценивалось влияние внешней и внутренней составляющих механизма формирования уровня режима Каспия на статистические характеристики колебаний УКМ.

Существенно, что данный подход гарантирует сохранение физически обоснованных корреляционных зависимостей между компонентами водного баланса моря (между притоком и эффективным испарением, между уровнем и притоком, между уровнем и эффективным испарением).

Применение динамико-стохастической модели многолетних изменений УКМ дает возможность оценить, в дополнение к существующим оценкам среднего (равновесного) уровня моря, целый набор существенных для понимания характера колебаний уровня статистических параметров УКМ — размах (дисперсию), среднюю продолжительность выбросов уровня за определенные отметки, автокорреляцию уровня и др.

Заметим, что во многих исследованиях по колебаниям уровней естественных водоемов понятия “равновесный” и “средний” уровни отождествляются, что в общем случае, как показано в [14, 15], не вполне корректно. Однако для условий Каспия, в первом приближении при независимом от уровня моря испарении с акватории и для достаточно длительных интервалов времени, можно принять, что отметки уровня моря, равновесные и средние, близки.

Источниками информации о характерных отметках УКМ и основных характеристиках водного баланса моря применительно к рассматриваемым этапам хвалыньских трансгрессий и к современному режиму УКМ были данные из [4, 5, 7, 14, 15, 17, 25, 26].

СЦЕНАРИИ ВОДНОГО БАЛАНСА КАСПИЯ ДЛЯ РХвТ И ПХвТ

Принятые в работе варианты водного баланса палео-Каспия используют результаты

исследований специалистов в палеогеографии и палеогеоморфологии [16, 19–26, 35, 36]. Следует заметить, что характеристики компонент водного баланса Каспия могут несколько различаться у различных авторов. Даже для времени инструментальных наблюдений нет принятого всеми исследователями единого “канонического” водного баланса Каспия (например, в [5, 7, 41]. Таким образом, допуская примерно равную обоснованность всех вариантов водного баланса палео-Каспия, возможно допустить некоторую свободу выбора того или иного варианта.

За среднемноголетний сток Волги принималась величина $500 \text{ км}^3/\text{год}$ [26, 27]. Предполагалось, что современное соотношение между стоком Волги и суммарным стоком остальных рек, впадающих в море (~85% и ~15% соответственно) выполнялось во времена РХвТ и ПХвТ. Следовательно, суммарный речной приток оценивается величиной $q_{\text{Volga}} = 588 \text{ км}^3/\text{год}$, речной приток в море без стока Волги равен $q_{\text{other rivers}} = 88 \text{ км}^3/\text{год}$. С учетом подземного притока в $4 \text{ км}^3/\text{год}$ суммарное поступление воды с поверхностным и подземным притоком для РХвТ равно $592 \text{ км}^3/\text{год}$. Отсюда, в соответствии с зависимостями между объемом притока, площадью акватории Каспия и слоем эффективно испарения, полученными А.В. Паниным и Е.В. Селезневой [16], среднемноголетний слой эффективно испарения в РХвТ оценивается величиной $0.71 \text{ м}/\text{год}$.

Дисперсия и коэффициент автокорреляции суммарного притока в Каспий оценены экстраполяцией зависимостей [6] между средним стоком рек и его важнейшими статистическими параметрами — коэффициентами вариации и автокорреляции. С помощью экстраполяции на время РХвТ зависимостей для современных рек получены следующие характеристики стока палео-Волги: коэффициент автокорреляции r и коэффициент вариации r стока оцениваются величинами $r \sim 0.3$ и 0.17 соответственно, дисперсия стока палео-Волги — $(0.17 \times 500)^2 \sim 7.2 \times 10^3 (\text{км}^3/\text{год})^2$.

Оценка дисперсии $D[q]$ суммарного поверхностного притока $q = q_{\text{Volga}} + q_{\text{other rivers}}$ в море была получена с учетом современных данных, содержащимися в [5, 41], $D[q] \sim 8.1 \times 10^3 (\text{км}^3/\text{год})^2$. При

этом принимались следующие предположения: коэффициент вариации $C_{\text{var other rivers}} = 0.15$, дисперсия суммы стока рек без стока Волги равна $D[q_{\text{other rivers}}] \sim 180 \text{ (км}^3/\text{год)}^2$, коэффициент взаимной корреляции между стоком Волги и остальной частью притока равен $r(q_{\text{Volga other rivers}}) = 0.3$. Коэффициент вариации суммарного поступления воды с речным и подземным притоком оказывается при этом равным $C_v = (8.1 \times 10^3)^{0.5}/592 \sim 0.15$.

По параметрам эффективного испарения с акватории Каспия для палеоусловий РХТ по аналогии с современными климатическими условиями принимаем допущение о величине коэффициента вариации $C_{\text{vevap}} = 0.1$ и коэффициента автокорреляции $r_{\text{evap}} = 0.2$.

Коэффициент взаимной корреляции между эффективным испарением и суммарным речным притоком в море принимался равным -0.3 , т. е. предполагалась физически допустимая слабая отрицательная корреляция.

Аналогично оценены параметры суммарного речного (включая подземный) притока и эффективного испарения для ПХвТ.

Равновесные характеристики уровня воды, площади и основных составляющих водного баланса Каспия для РХвТ и ПХвТ приведены в табл. 1.

Средний слой эффективного испарения с акватории Каспия оценен величиной 0.75 м/год , что несколько меньше аналогичной оценки для условий ПХвТ. Увеличение слоя эффективного испарения с акватории Каспия для ПХиТ соответствует характеристике Т.А. Яниной [35], данной позднехвалынскому Каспию как “умеренно тепловодного” водоема по сравнению с “холодноводным” раннехвалынским Каспием.

Таблица 1. Равновесные характеристики уровня, площади суммарного притока и эффективного испарения для ранне- и позднехвалынских трансгрессий Каспия (использованы зависимости между равновесными величинами уровня, площади и основных составляющих водного баланса, полученные А.В. Паниным и Е.В. Селезневой [16])

Равновесные характеристики	Стадии хвалынских трансгрессий Каспия	
	ранняя	поздняя
Уровень, м БС	+22	0
Площадь акватории, тыс. км ²	834	704
Суммарный приток, км ³ /год	592	528
Эффективное испарение, м/год	0.71	0.75

ВЫБОР ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УКМ

В настоящее время имеются два основных вида ДС-модели колебаний уровня Каспия, отличающиеся описанием процесса многолетних колебаний эффективного испарения с морской акватории.

К первому виду относятся модели из [1, 3, 8, 9, 14, 15], в которых эффективное испарение рассматривается как случайный процесс, не зависящий от уровня воды в море. Этот вид модели колебаний УКМ получил значительное развитие в фундаментальных работах С.В. Музылева [14, 15], посвященных построению дифференциальной стохастической модели колебания уровня бессточного озера на основе методов неравновесной статистической механики и статистической радиотехники. Несколько позже В.Е. Привальский [18] разработал дискретный аналог ДС-модели С.В. Музылева. Результаты моделирования колебаний УКМ с учетом оттока морской воды в зал. Кара-Богаз-Гол впервые были опубликованы в 1985 г. в монографии автора настоящей статьи [27]. Перечисленные модели иногда называются “линейными” по типу исходного уравнения, описывающего колебания уровня водоема моря, допускающего линеаризацию без потери физического смысла.

Второй вид моделей колебаний УКМ, в котором представлена функциональная зависимость эффективного испарения $e(h)$ с акватории водоема от глубины h , впервые предложен М.Г. Хублярином и В.И. Найденовым [32]. Этот вид иногда называют “нелинейными моделями” в том смысле, что уравнение, описывающее колебания воды в водоеме, не допускает линеаризацию без существенной потери физического смысла. Дальнейшие исследования “нелиней-

ной” ДС-модели УКМ получили развитие в работах автора настоящей статьи [28–31].

Влияние зависимости испарения от глубины водоема на колебания уровня воды в нем определяется наличием мелководий, занимающих значительную часть акватории [27].

Для Каспия при отметке –28.0 м БС площадь мелководного Северного Каспия со средней глубиной 4.4 м вместе с мелководьями в прибрежных частях акватории (вдоль береговой линии длиной ~7000 км) составляет >25%. Столь значительная площадь мелководий резко отличает современный Каспий от всех крупных озер мира, и именно эта морфометрическая особенность способствует формированию зависимости эффективного испарения от уровня моря. Однако для времен РХвТ и ПХвТ, рассматриваемых в данном исследовании, равновесные отметки уровня, относительно которых колеблется УКМ, существенно выше современных, ~0 и ~+22 м БС соответственно. В работе автора настоящей статьи [28] показано, что при достаточном повышении уровня Каспия, вследствие уменьшения доли мелководий в общей площади морской акватории, влияние зависимости испарения от уровня становится пренебрежимо малым. Поэтому для времен РХвТ и ПХвТ многолетние колебания эффективного испарения с акватории Каспия моделируются случайным марковским процессом, не зависящим от уровня воды в море, что позволяет применить “линейную” модель колебаний УКМ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ УКМ

Для имитационного моделирования колебания УКМ использовалась система разностных стохастических уравнений: водобалансовое уравнение, описывающее вариации уровня моря h_t , и уравнения, описывающие многолетние изменения суммарного речного притока в море q_t и эффективного испарения e_t :

$$\begin{cases} h_t = h_{t-1} + \frac{q_t}{F(h_t)} - e_t \\ q_t = \rho_q q_{t-1} + w_t^q \\ e_t = \rho_e e_{t-1} + w_t^e \end{cases}, \quad (1)$$

где $F(h_t)$ – площадь акватории моря как функция уровня воды h_t в водоеме; q_t и e_t – процессы авторегрессии 1-го порядка; ρ_q и ρ_e – коэффициенты автокорреляции притока и эффективного испарения соответственно; w_t^q и w_t^e – белые негауссовы шумы в моделях q_t и e_t соответственно; t – время (годы). Предполагалось, что процессы q_t и e_t в общем случае взаимно коррелированы.

На рис. 1 приведены нелинейная зависимость площади акватории Каспия $F(h)$ от уровня воды h в море и ее линейные аппроксимации вида $F(h) = a + bh$, где a и b – числовые коэффициенты.

Очевидно, что числовые параметры линейных аппроксимаций зависят от равновесного уровня. Повышение равновесного уровня h^* при нелинейной монотонно возрастающей выпуклой вверх зависимости $F(h)$ приводит к уменьшению производной $dF(h)/dh$ в точке h^* . Физически это означает уменьшение действия отрицательной обратной связи в механизме колебаний УКМ, т. е. происходит увеличение “вертикальности” берегов моря. При колебаниях уровня моря относительно равновесных отметок, принимаемых за начало отсчета, коэффициент a имеет смысл равновесной площади; коэффициент b показывает изменение площади акватории при изменении уровня на 1 м. Для РХвТ $a = 834$ тыс. км²,

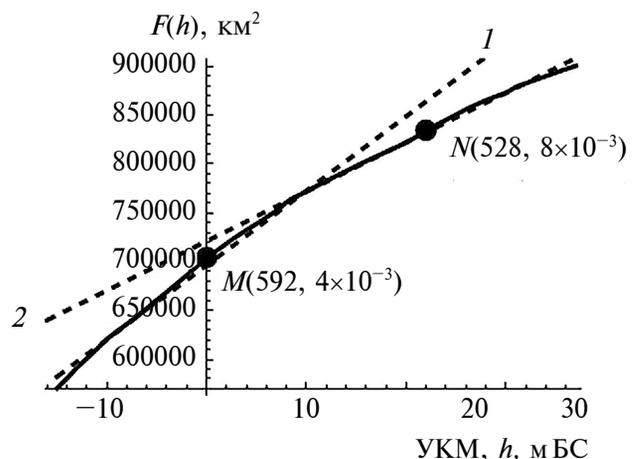


Рис. 1. Зависимость площади акватории Каспия от уровня моря $F(h)$, по данным [16], сплошная линия; координаты точек M и N – равновесные уровни и площади акватории Каспия для РХвТ и ПХвТ соответственно; прямые пунктирные линии 1 и 2 – линейные аппроксимации зависимости $F(h)$ в окрестностях точек M и N соответственно.

$b = 5.1$ тыс. км²/м; для ПХвТ $a = 704$ тыс. км²,
 $b = 7.6$ тыс. км²/м.

Результаты модельных расчетов приведены в табл. 2.

Заметим, что для предполагаемых вариантов водного баланса Каспия (табл. 2) можно качественно оценить некоторые особенности колебаний УКМ для РХТ и ПХТ, не прибегая к имитационному моделированию. Для этого сравним параметры инерционности α уровня Каспия, предполагая выполнение условий применимости линеаризованной модели колебаний УКМ для указанных трансгрессий. Параметр α инерционности уровня бессточного водоема определяется формулами

$$\alpha = \frac{b\langle q \rangle}{a^2} = \frac{b\langle e \rangle^2}{\langle q \rangle} = \frac{b\langle e \rangle}{a}, \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты в зависимости $F(h)$ при отсчете уровня от равновесной отметки, принимаемой за нулевую, $\langle q \rangle$ и $\langle e \rangle$ – средние величины притока в водоем (км³/год) и слоя эффективного испарения с акватории водоема (м/год) [14, 15, 42, 46]. Величина α влияет на все

статистические характеристики колебаний уровня водоема, в частности – на коэффициент автокорреляции уровня r_h . Чем больше α , тем меньше автокорреляция уровня r_h (при прочих равных), и наоборот. Зависимости α от среднего притока $\langle q \rangle$ в Каспийское море для двух различных средних величин слоя эффективного испарения $\langle e \rangle$ приведены на рис. 2.

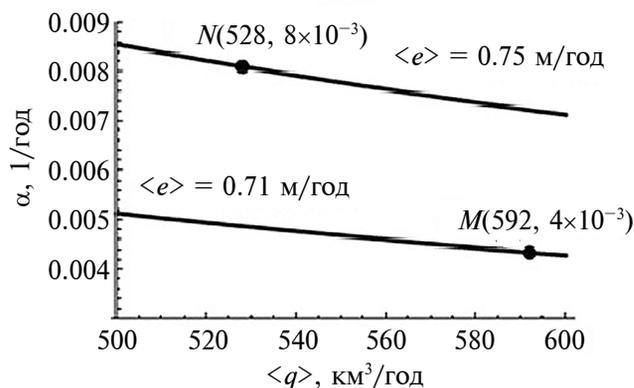


Рис. 2. Зависимости параметра инерционности α уровня Каспия от среднего притока в море $\langle q \rangle$ при средних слоях эффективного испарения $\langle e \rangle$, равных 0.71 и 0.75 м/год. Координаты точек M и N соответствуют водным балансам Каспия для РХвТ и ПХвТ.

Таблица 2. Статистические характеристики смоделированных составляющих водного баланса Каспия и УКМ для ранне- и позднехвалынской трансгрессий и современных условий

Характеристика	Среднее	Дисперсия	Равновесные		Параметр УКМ α , год ⁻¹
			площадь Каспия, км ²	уровень, м БС	
Раннехвалынская трансгрессия					
Приток, q	592 км ³ /год	8.1×10^3 (км ³ /год) ²			
Эффективное испарение, e	0.71 м/год	5×10^{-3} (м/год) ²	834×10^3	+22	4.3×10^{-3}
УКМ, h	21.91 м БС	4.2 м ²			
Позднехвалынская трансгрессия					
Приток, q	528 км ³ /год	6.5×10^3 (км ³ /год) ²			
Эффективное испарение, e	0.75 м/год	6×10^{-3} (м/год) ²	704×10^3	0	8.1×10^{-3}
УКМ, h	0.02 м БС	2.5 м ²			
Позднехвалынская трансгрессия*					
Приток, q	396 км ³ /год	3.528×10^3 (км ³ /год) ²			
Эффективное испарение, e	0.60 м/год	3.6×10^{-3} (м/год) ²	661×10^3	0	6.9×10^{-3}
УКМ, h	0.02 м БС	2.5 м ²			
Современный баланс Каспия**					
Приток, q	281 км ³ /год	2.5×10^3 (км ³ /год) ²			
Эффективное испарение, e	0.77 м/год	6.0×10^{-3} (м/год) ²	365×10^3	-28.5	3.0×10^{-2}
УКМ, h	-28.48 м БС	0.9 м ²			

*По данным [4].

**По данным [5].

Из формулы (2) следует, что при фиксированных среднем и дисперсии эффективного испарения увеличение среднего притока (при неизменной дисперсии) в Каспий приводит к уменьшению параметра инерционности α и к соответствующему увеличению дисперсии колебаний УКМ. Аналогичное уменьшение α происходит при фиксированных параметрах притока и уменьшении среднего испарения (при неизменной дисперсии).

Поскольку автокорреляционная функция уровня $r_h(\tau)$ в данном случае имеет вид $r_h(\tau) \approx \exp(-\alpha\tau)$, то величина $\tau = 1/\alpha$ приближенно определяет время корреляции уровня [14, 15], или, в англоязычном варианте, “equilibrium response time” [42, 45]. С учетом данных о водном балансе Каспия из табл. 1 получаем оценки времени корреляции УКМ – $\tau \approx 230$ и $\tau \approx 120$ лет для РХвТ и ПХвТ соответственно. Отсюда следует, что режимы колебаний УКМ при РХвТ и ПХвТ были заметно разными. Для сравнения приведем современные оценки τ для уровня Каспия: для бессточного Каспийского моря $\tau \approx 33$ года [15], для уровня Большого Соленого озера $\tau \approx 8$ лет (по одному из вариантов [45]). Для “проточного” Каспия с зависимостью оттока морской воды в зал. Кара-Богаз-Гол от уровня моря, действовавшей в 1948–1980 гг., время корреляции уровня уменьшается до $\tau \approx 20$ лет [27].

По смоделированным рядам УКМ длительностью 105 лет построены соответствующие ги-

стограммы и гауссовы плотности распределения вероятности (ПРВ) (рис. 3).

Как и следовало ожидать, распределение вероятностей УКМ в обоих случаях близко к гауссову распределению – в силу теоремы о нормализации выходного процесса инерционной линейной системой [14, 15].

Для визуального сравнения многолетних режимов колебаний УКМ для РХвТ и ПХвТ на рис. 4 приведены фрагменты смоделированных рядов УКМ.

Реализации УКМ на рис. 4 наглядно показывают различие режимов колебаний УКМ. Например, размах колебаний уровня во время РХвТ больше, чем во время ПХвТ, и составляет 15.5 м и 12.0 м соответственно.

Представляет интерес оценка среднего времени пребывания $\chi(l)$ выше (или ниже) заданной отметки уровня l в течение одного выброса. Такая оценка может быть полезна при изучении особенностей формирования береговых форм палеорельефа. Согласно [15], теоретическая зависимость $\chi(l)$ имеет вид

$$\chi(l) = \frac{2\pi\sigma_h}{\sigma\left(\frac{dh}{dt}\right)} \left(1 - \Phi\left(\frac{l}{\sigma_h}\right)\right) \exp\left(\frac{l^2}{2\sigma_h^2}\right), \quad (3)$$

где σ_h^2 – дисперсия уровня, $\sigma(dh/dt)$ – стандарт

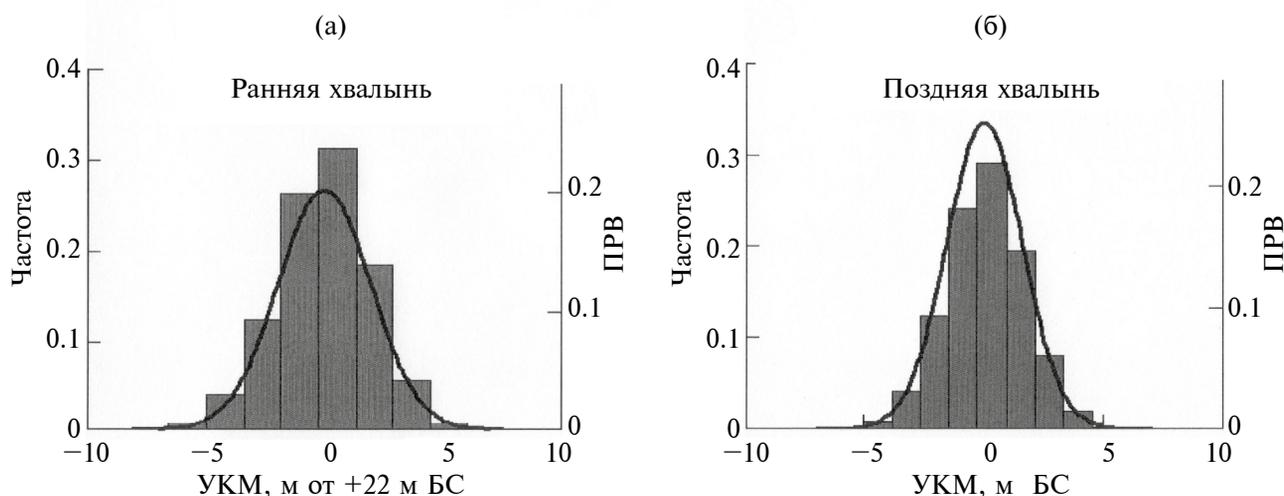


Рис. 3. Гистограммы (столбики) и плотности распределения вероятности (линии) уровня Каспия: (а) для раннехвалынской, (б) для позднехвалынской трансгрессий.

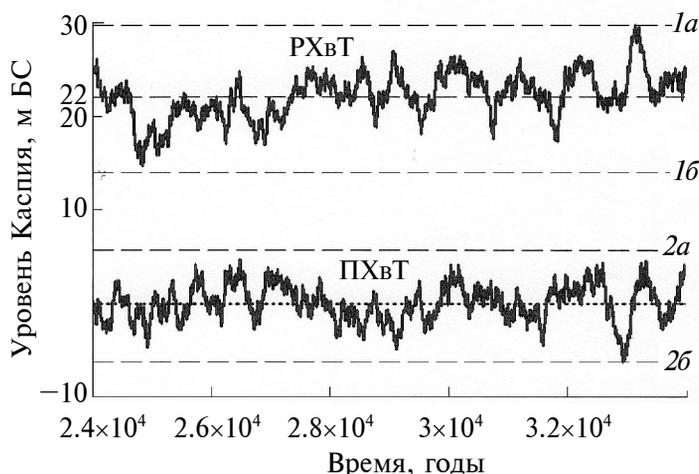


Рис. 4. Фрагменты смоделированных рядов УКМ для РХвТ и ПХвТ. *1a* и *1b* – максимальная и минимальная отметки смоделированного УКМ для РХвТ, *2a* и *2b* – то же для ПХвТ.

производной уровня по времени; дисперсия производной уровня по времени равна

$$\sigma \left(\frac{dh}{dt} \right)^2 \approx \frac{\sigma_q^2}{a^2} - \frac{2\sigma_q\sigma_e}{a} + \sigma_e^2, \quad (4)$$

где σ_q^2 – дисперсия притока в море, σ_e^2 – дисперсия эффективного испарения, a – равновесная площадь акватории Каспия, $\Phi(l/\sigma_h)$ – интеграл вероятности. На рис. 5 представлены графики зависимостей среднего времени пребывания УКМ $\chi(l)$ выше (или ниже) заданной отметки уровня l в течение одного выброса для РХвТ и ПХвТ, по-

строенные в соответствии с (3)–(4), и оценки, полученные по смоделированным рядам УКМ.

Из приведенных на рис. 5 графиков следует для РХвТ и ПХвТ следующее. Во-первых, реально нахождения УКМ, например, выше равновесных отметок на 2 м в течение относительно длительного времени, примерно 15–25 лет. То же относится к аналогичной возможности пребывания УКМ ниже равновесных отметок уровня Каспия. Во-вторых, длительность одного выброса выше (ниже) равновесных отметок УКМ для РХвТ заметно превышает соответствующую характеристику для ПХвТ (рис. 5).

Разница между величинами $\chi(l)$ для РХвТ и ПХвТ объясняется влиянием меньшего параметра инерционности УКМ $\alpha = 4.1 \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ во время РХвТ по сравнению с величиной $\alpha = 6.9\text{--}8.1 \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ во время ПХвТ. Для сравнения, в отсутствие оттока из Каспия в зал. Кара-Богаз-Гол современная величина $\alpha \sim 3 \times 10^{-2} \text{ год}^{-1}$.

ВЫВОДЫ

Для палеовремени – РХвТ и ПХвТ – при высоких равновесных уровнях моря, равных -22 и ~ 0 м БС соответственно, действие в механизме колебаний уровня положительной обратной связи, образованной зависимостью между уровнем и слоем испарения с акватории, становится пренебрежимо малым. Причина – превращение

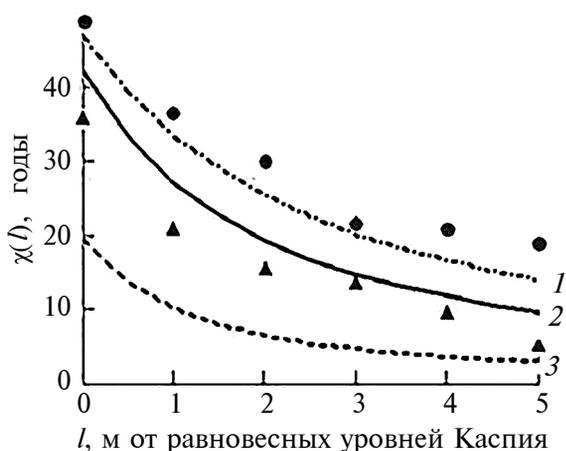


Рис. 5. Среднее время $\chi(l)$ пребывания УКМ выше заданной отметки $h = l$ во время одного выброса: линии 1, 2 и 3 – теоретические зависимости для РХвТ, ПХвТ и современных условий соответственно; кружки и треугольники – выборочные оценки для РХвТ и ПХвТ соответственно.

Северного Каспия из мелководной в “глубоководную” часть моря и соответствующее относительное уменьшение площади мелководий по отношению ко всему Каспию. При колебаниях УКМ в окрестностях отметок 0 и +22 БС отсутствует демпфирующее влияние оттока морской воды через прол. Маныч в Черное море и в зал. Кара-Богаз-Гол. Поэтому для моделирования многолетних колебаний УКМ применена динамико-стохастическая модель только с одной, отрицательной, обратной связью, формируемой зависимостью площади акватории моря от уровня воды в нем.

На урвенный режим Каспия, кроме составляющих водного баланса моря, определяющего положение равновесного уровня, влияет параметр a в зависимости площади акватории от уровня $F(h)$. Для Каспия, чем выше равновесный уровень h^* , тем меньше параметр инерционности уровня (при прочих равных), тем больше дисперсия уровня УКМ и тем больше разность между временами корреляции уровня и речного притока в море.

Для урвненного режима Каспия в палеовремени характерны более длительные по сравнению с современными серии лет с высоким (низким) положением уровня моря.

Смоделированные ряды многолетних колебаний УКМ могут быть использованы для оценки возможности образования различных прибрежно-шельфовых геоморфологических форм во время длительных выбросов уровня моря.

Полученные характеристики процессов многолетних колебаний уровня Каспия – дисперсия, автокорреляция, плотность распределения вероятности, средняя длительность выбросов выше (ниже) заданных отметок уровня в течение одного выброса, зависимость параметра инерционности колебаний УКМ – существенно расширяют представления о характере колебаний уровня Каспия в РХвТ и ПХвТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багров Н.А. О колебаниях уровня бессточных озер // Метеорология и гидрология. 1963. № 6. С. 41–46.
2. Бадикова Е.Н. Возраст хвалыньских трансгрессий Каспийского моря // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 432–438.
3. Бudyко М.И., Юдин М.И. О колебаниях уровня непероточных озер // Метеорология и гидрология. 1960. № 8. С. 15–19.
4. Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 240 с.
5. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / Под ред. Е.С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
6. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. 660 с.
7. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия / Под ред. С.С. Байдина, А.Н. Косарева. М.: Наука, 1986. 261 с.
8. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Колебания уровня замкнутых водоемов // Тр. Гидропроекта. Энергия: 1964. Сб. 12. С. 29–61.
9. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Некоторые положения статистической теории колебаний уровней естественных водоемов и их применение к исследованию режима Каспийского моря // Тр. Первого совещания по регулированию стока. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1946. С. 76–93.
10. Курбанов Р.Н., Беляев В.Р., Свистунов М.И., Бутузова Е.А., Солодовников Д.А., Таратунина Н.А., Янина Т.А. Новые данные о возрасте раннехвалыньской трансгрессии Каспийского моря // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 3. С. 403–419.
11. Леонтьев О.К., Федоров П.В. К истории Каспийского моря в поздне- и послехвалыньское время // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1953. Т. 4. С. 64–74.
12. Малинин В.Н. Проблема прогноза уровня Каспийского моря. СПб.: РГГМИ, 1994. 60 с.
13. Малинин В.Н., Гордеева С.М., Гурьянов Д.В. Мало-параметрическая модель увлажнения Северо-Западного региона России для условий современных изменений климата // Уч. зап. РГГМУ. 2014. № 36. С. 35–49.
14. Музылев С.В. Теоретико-вероятностный анализ колебаний уровней бессточных водоемов // Вод. ресурсы. 1980. № 5. С. 21–40.
15. Музылев С.В., Привальский В.Е., Раткович Д.Я. Стохастические модели в инженерной гидрологии. М.: Наука, 1982. 283 с.
16. Панин А.В., Селезнева Е.В. Воднобалансовые характеристики Палеокаспия на основе новой гипсографической кривой // Теоретические проблемы

- современной геоморфологии, теория и практика изучения геоморфологических систем. Материалы XXXI Пленума Геоморфологической комиссии РАН. Ч. I. Астрахань: Техноград, 2011. С. 77–82.
17. Панин Г.Н. Испарение и теплообмен Каспийского моря. М.: Наука, 1987. 86 с.
 18. Привальский В.Е. Климатическая изменчивость. М.: Наука, 1985. 203 с.
 19. Рычагов Г.И. К методике геоморфологических исследований (геоморфологические уроки Каспия) // Вестн. Московского ун. Сер. Геоморфология. 2019. № 4. С. 27–39.
 20. Рычагов Г.И. Уровенный режим Каспийского моря за последние 10 000 лет // Вестн. Московского ун. Сер. 5, География. 1993. № 2. С. 38–49.
 21. Рычагов Г.И. Хвалынский этап в истории Каспийского моря // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2014. № 4. С. 3–9.
 22. Свиточ А.А. Голоценовая история Каспийского моря и других окраинных бассейнов Европейской России: сравнительный анализ // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2011. № 2. С. 28–38.
 23. Свиточ А.А. Палеогеография большого Каспия // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2015. № 4. С. 69–79.
 24. Свиточ А.А., Янина Т.А. Четвертичные отложения побережий Каспийского моря. М.: РАСХН, 1997. 267 с.
 25. Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Климатически обусловленные изменения речного стока на равнинах северной Евразии в позднеледниковье и голоцене // Водн. ресурсы. 2008. Т. 35. № 4. С. 406–416.
 26. Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Речной сток на восточно-европейской равнине за последние 20 тысяч лет и проблема изменения уровней южных морей // Вопр. географии. 2018. Сб. 145. С. 144–167.
 27. Фролов А.В. Динамико-стохастические модели многолетних колебаний уровня проточных озер. М.: Наука, 1985. 103 с.
 28. Фролов А.В. Динамико-стохастическое моделирование многолетних колебаний уровня Каспия в палеовремени (14–4 тыс. лет до н. э.) // Водн. ресурсы. 2021 Т. 48. № 6. С. 633–642.
 29. 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.
 30. Фролов А.В. Моделирование многолетних колебаний уровня Каспийского моря: теория и приложения. М.: Геос, 2003. 170 с.
 31. Фролов А.В. Особенности механизма многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55. С. 120–128.
 32. Хубларян М.Г., Найденов В.И. О тепловом механизме колебаний уровня водоемов // ДАН СССР. 1991. Т. 319. № 6. С. 1438–1444.
 33. Шнитников А.В. Изменчивость общей увлажненности материков северного полушария // Зап. Геогр. о-ва СССР. 1957. Т. 16. С. 23–57.
 34. Шнитников А.В. Колебания климата и общей увлажненности в XVIII–XX столетиях и их будущее // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва. 1975. Т. 107. Вып. 6. С. 473–484.
 35. Янина Т.А. Эволюция природной среды Понто-Каспия в условиях глобальных изменений климата в позднем плейстоцене // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5, География. 2013. № 1 С. 3–17.
 36. Янина Т.А., Сорокин В.М., Безродных Ю.П. Отражение климатических событий позднего плейстоцена в геологической истории Каспийского моря (по материалам бурения) // Вопросы геоморфологии и палеогеографии морских побережий и шельфа. Материалы научной конференции памяти П.А. Каплина / Под ред. Т.А. Яниной, Т.С. Ключиткиной. М.: Геогр. фак. МГУ, 2017. С. 161–165.
 37. Gates D.G., Diesendorf M. On the fluctuations in levels of closed lakes // J. Hydrol. 1977. V. 33. № 3/4. P. 267–285.
 38. Harrison S.P., Saarse L., Digerfeldt G. Holocene changes in lake levels as climate proxydata in Europe // Paleotoklimaforsch. 1991. № 6. P. 159–170.
 39. Huybers K., Rupper S., Roe G.H. Response of closed basin lakes to interannual climate variability // Climate Dynamics. 2016. V. 46. P. 3709–3723.
 40. Kutzbach J.E. Estimates of past Climate at Paleolake Chad, North Africa, Based on a Hydrological and Energy-Balance Model // Quaternary Res. 1980. V. 14. P. 210–223.
 41. Lahijani H., Leroy S.A.G., Arpe K., Cretaux J.-F. Caspian Sea level changes during instrumental period, its impact and forecast: A review // Earth-Sci. Rev. 2023. DOI: 10.1016/j.earscirev.104428.
 42. Mason I.M., Guzkowska M.A.J., Rapley C.G., Street-Perrott F.A. The response of lake levels and areas to climatic change // Climatic Change. 1994. V. 27. P. 161–197.
 43. Mason I.M., Rapley C.G., Street-Perrott F.A., Guzkowska M.A.J. ERS-1 Observations of Lakes for Climate

- Research // Proc. of ESA Sympos. "European Remote Sensing Opportunities". 1985. P. 235–241.
44. *Semenov V.A., Nikitina N.G., Mokhov I.I.* Atlantic Multidecadal Variability and hydrological cycle in the Caspian Sea watershed // Research Activities Atmos. Ocean. Modelling, Rep. № 43. WCRP Rep. № 10/2013. 2013. P. 7.15–7.16.
45. *Street-Perrott F.A., Guzkowska M.A.J., Mason I.M., Rapley C.G.* Response of Lake Levels to Climatic Change – Past, Present and Future // Climate Change. 1986. V. 3. P. 211–216.
46. *Street-Perrott F.A., Marchand D.S., Roberts N., Harrison S.P.* Global lake-level variations from 18000 to 0 Years Ago: a palaeoclimatic analysis. 1989. 213 p. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=noaa-lakelevel-5495>
47. *Vuglinsky V., Kuznetsova M.* The World's Largest Lakes Water Level Changes in the Context of Global Warming. Natural Resources. 2019. V. 10. P. 29–46. doi: 10.4236/nr.102003
48. *Woolway R.I., Kraemer B.M., Lenters J.D., Merchant C.J., O'Reilly C.M., Sharma S.* Global lake responses to climate change // Nature Rev. Earth and Environ. 2020. V. 1. P. 388–403.