

УДК 551.4(262.81)

А.В. Кислов¹О МНОГОМАСШТАБНОСТИ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ²

В течение последних 10 тыс. лет Каспийское море испытало ряд трансгрессий и регрессий, характерная периодичность которых составила ~2000 лет, а стандартное отклонение — $\sigma \approx 3$ м. На фоне этих “вековых” изменений наблюдались менее продолжительные “декадные” флуктуации. В статье рассмотрено, зависит ли величина декадной изменчивости от того, в какой стадии — трансгрессивной или регрессивной — находится море. Для этого применен теоретический подход, основанный на использовании математического аппарата теории броуновского движения. Анализ и решение соответствующего стохастического уравнения (уравнения Ланжевена) позволил получить уравнение, описывающее дисперсию декадных колебаний уровня моря. Зависимость ее величины от реально наблюдающихся вариаций компонентов водного баланса получилась очень слабой, т.е. в периоды трансгрессий и регрессий голоцена изменения состояния моря проявлялись преимущественно как “изменения средних значений”. Это позволяет использовать статистические параметры, определенные по современным данным, для оценок доверительных интервалов при анализе палеогидрологических аномалий голоцена.

Ключевые слова: климат, Каспийское море, водный баланс, функция распределения вероятности колебаний уровня, броуновское движение.

Введение. В течение последних 10 тыс. лет уровень Каспия был в целом несколько выше современного (“текущего”) значения (примерно –28 м), море испытало ряд трансгрессий и регрессий, характерная периодичность которых составила ~2000 лет (рис. 1, а) [9], а стандартное отклонение — $\sigma \approx 3$ м. Это не такие крупные вариации, как аномалии периода максимума позднелепистоценового криохрона, однако, по сравнению с современной динамикой уровня моря (характеризующейся величиной $\sigma \approx 0,5$ м) голоценовые изменения были весьма значительными, сопровождались значительной перестройкой природной среды Каспийского региона.

Происхождение этих длительных “вековых” флуктуаций неясно, бездоказательно, чисто спекулятивно, их можно назвать проявлением стохастического автоколебательного режима воднобалансовой системы Каспийского моря. Нет оснований рассматривать их как линейную реакцию регионального водного режима на происходившие в голоцене плавные изменения инсоляции на внешней границе атмосферы (механизм Миланковича) — эти процессы имеют различный масштаб изменчивости [2]. Изучение затрудняет то, что применение моделирования в данном случае оказывается неэффективно, так как точность воспроизведения составляющих водного баланса в рамках климатических моделей недостаточно высока, чтобы воспроизводить колебания уровня Каспийского моря, составляющие несколько метров [3, 4, 13, 14]. Кроме того, ощущается серьезная нехватка данных реконструкций компонентов водного бюджета моря.

При более детальном рассмотрении эмпирических данных становятся заметны “декадные” флуктуации (рис. 1, б), отвечающие за изменчивость на времен-

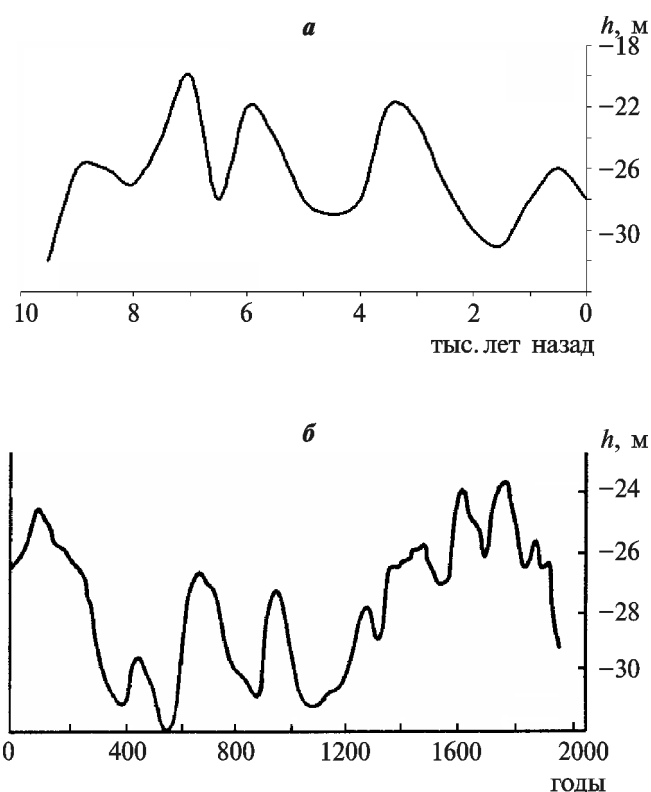


Рис. 1. Изменения уровня Каспийского моря за голоцен: а — по данным Г.И. Рычагова [9]; б — за последние 2000 лет, по данным Р.К. Клиге

ных масштабах нескольких десятилетий, существующие на фоне более крупных аномалий. Возникает вопрос: зависит ли величина декадной изменчивости от того, в какой стадии — трансгрессивной или регрессивной — находится море? Выполнить оценки такого

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, зав. кафедрой, профессор, e-mail: avkisllov@mail.ru

² Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-05-00434-а).

рода путем прямого компьютерного воспроизведения флуктуаций уровня Каспия в рамках климатических моделей не представляется возможным из-за отмеченного низкого качества модельных данных. Однако определение величины дисперсии представляется важным, так как ее знание позволяет, в частности, установить вероятность экстремальных значений, которые представляют собой один из важных аспектов, характеризующих состояние климата. Часто именно они оставляли те наиболее заметные следы в природной среде, которые используются в качестве индикаторов при восстановлении событий прошлого.

В статье предлагается подход, направленный на получение алгоритма, который позволяет оценить зависимость дисперсии от фонового (климатического) состояния. Ставится задача — определить функции распределения вероятностей вариаций декадного масштаба при разных (трансгрессивных и регрессивных) состояниях Каспийского моря в голоцене. Достичь результата можно, применив к аппроксимации динамики уровня моря математический аппарат стохастических дифференциальных уравнений.

Возможность его использования базируется на понимании своеобразного дуалистического принципа: с одной стороны, временная динамика уровня моря хаотична, с другой стороны, она формулируется как детерминированное понятие в рамках уравнения водного баланса моря. Один из возможных путей объединения случайного поведения и детерминированного описания заключается в том, чтобы использовать физический закон для расчета вероятностных характеристик. Это открывает возможность для получения параметров случайного процесса при перестройке фонового состояния, что невозможно осуществить, если вероятностные характеристики определяются на основе данных наблюдений.

При построении теории принципиально использовать то обстоятельство, что декадная динамика уровня моря представляет собой “медленный” процесс по сравнению с “быстрыми” флуктуациями речного стока и видимого испарения, которые определяют изменение уровня моря. Общая закономерность проявляется в том, что инерционный объект интегрирует быстрые воздействия, обеспечивая накопление эффектов короткопериодных влияний, что уводит “медленную” систему от состояния равновесия. Однако при нарастании отклонений подключаются, как правило, стабилизирующие обратные связи, не позволяющие развиваться слишком большим аномалиям. Временные масштабы, на которых еще не сказываются обратные связи, относят к спектральному интервалу, где энергия увеличивается с уменьшением частоты (соответствующий случайный процесс называют в этом случае красным шумом, конкретнее, красным шумом называют область спектра, где энергия растет обратно пропорционально квадрату частоты). На тех временных масштабах, где активизируются стабилизирующие процессы, дальнейший рост энергии

флуктуаций прекращается и их мощность выходит на плато (не зависит от частоты). Соответствующий случайный процесс носит название белый шум.

Рассмотренная концепция восходит к теории броуновского движения и наследует ее математический аппарат. Сам термин обязан своим происхождением ботанику Р. Броуну, который в 1887 г. исследовал беспорядочное движение взвешенной в воде пылцы растений. В 1905 г. А. Эйнштейн развил теорию этого процесса и заложил основы анализа флуктуаций методами стохастических дифференциальных уравнений. Идею применения концепции броуновского движения к природным объектам высказал К. Хассельманн [12]. Ее реализация позволяет использовать при расчете статистических характеристик медленных флуктуаций развитый аппарат стохастических дифференциальных уравнений, практически важный пример которых — уравнение Ланжевена.

Колебания уровня Каспийского моря и модель броуновского движения. Спектр колебаний уровня Каспийского моря включает сезонные колебания, нерегулярные короткопериодные изменения, связанные с нагонами воды и сейшмами, а также межгодовые вариации, проявляющиеся в широком диапазоне. Изменения, за некоторыми исключениями, определяются изменчивостью составляющих водного баланса моря, и только при рассмотрении долговременных изменений иногда приходится привлекать геологические или геоморфологические факторы. Однако непосредственная связь межгодовых приращений уровня Каспийского моря (h) с ежегодными значениями результирующего водного баланса неустойчива: коэффициент корреляции, рассчитанный по данным наблюдений, равен приблизительно 0,7. Более значимая связь ($r \approx 0,96$) получается между h и значениями нормированной интегральной разностной кривой результирующего водного баланса, которая представляет собой накопленные разности между значением переменной на каждом временном шаге и ее средним значением [5]. Это говорит о том, что изменения уровня есть медленный отклик инерционного объекта на высокочастотные воздействия.

Отметим, что при всей естественной привлекательности использования данных непосредственных измерений уровня следует иметь в виду, что столетний интервал наблюдений не может дать надежную статистическую картину поведения такого инерционного объекта, как Каспийское море [1, 7]. В самом деле, для Каспия выявлена высокая связь межгодовых состояний: коэффициент корреляции между изменениями уровня в смежные годы оказывается очень высоким ($\sim 0,95$), так что 100-летнему ряду наблюдений (фактически ряду зависимых данных) эквивалентно всего примерно 5 независимых значений [10].

Поэтому с точки зрения независимости данных требуется ряд в несколько тысяч лет. Анализ ряда продолжительностью в 2000 лет (любезно предоставленного автору Р.К. Клите, рис. 1, б) показал, что приращения уровня имеют функцию распределения, прак-

тически совпадающую с гауссовой кривой (с 2%-м уровнем значимости по критерию χ^2). Сопоставление изменений уровня Каспия с “календарем” глобальных климатических событий, проявившихся в центральной части Восточно-Европейской равнины (региона, где формируется основная часть стока Волги и Камы), показало [2], что уровень моря был выше во время холодных аномалий малой ледниковой эпохи и снижался в теплые эпохи средневекового потепления.

Сложность и разномасштабность реакции моря или озера на внешние воздействия предопределяют возможность применения стохастических моделей для описания изменчивости объема (площади или уровня). Так, в достаточно общей модели стохастического резервуара [11, 16] решается задача определения вероятностных характеристик динамики объема на основе информации о эмпирически определяемых функциях распределения вероятностей составляющих водного баланса.

В статье ставится другая цель — определить особенности динамики уровня стохастического резервуара, опираясь на детерминированные соотношения водного баланса. Для решения этой задачи рассмотрим соответствующее уравнение, описывающее изменение во времени объема (V) воды произвольного озера [11]:

$$\frac{dV(t)}{dt} = v^+(t) - f(t)e(t) - v^-(t), \quad (1)$$

где f — площадь поверхности озера,

$$V(t) = V_* + \int_{h_*}^{h(t)} f dz,$$

e — “видимое испарение” т.е. разность между испарением и количеством осадков над зеркалом; v^+ , v^- — вклад речного стока в озеро и объем вытекающей воды соответственно.

Прежде всего отметим, что рассматривается непересыхающее озеро, у которого колебания уровня относительно среднесуточного значения малы. Это делает возможным линеаризацию уравнения (1). Это условие, типично представляющее собой в сложных задачах ограничение общности, в данном случае является естественным, поскольку означает, что на протяжении рассматриваемого интервала времени мы имеем дело с одним и тем же озером, не претерпевающим катастрофических изменений своих свойств. В диапазоне небольших колебаний уровня с достаточно высокой степенью точности выполняется линейное соотношение, связывающее положение уровня с площадью зеркала озера, т.е. $f = a + bh$. Это позволяет, в частности, принять $(a + bh)^{-1} \approx 1 - hb/a$, что понадобится далее. Затем, представляя сток воды из озера гидравлической зависимостью $v^- = v_0^- + a_*h(t)$ (в которой первое слагаемое — величина среднесуточного стока), запишем уравнение (1) в виде [11]

$$\frac{dh(t)}{dt} = -\frac{bv^+(t)}{a^2}h(t) - \left(\frac{\alpha_*}{a} - \frac{v_0^-b}{a^2}\right)h(t) + \frac{v^+(t) - v_0^-}{a} - e(t). \quad (2)$$

Перейдем к анализу межгодовых флуктуаций. Для этого выполним осреднение уравнения (2) за год. Как оказалось [11], с достаточной точностью выполняется соотношение $\overline{v^+(t)h(t)} \approx \overline{v^+(t)}\overline{h(t)}$. Это позволяет записать уравнение (2) в следующей форме:

$$\frac{dh(t)}{dt} = -\lambda h(t) + g(t), \quad (3)$$

$$g(t) = \frac{v^+(t) - v_0^-}{a} - e(t).$$

$$\text{где } \lambda = \frac{bv^+(t)}{a^2} + \left(\frac{\alpha_*}{a} - \frac{v_0^-b}{a^2}\right) \equiv \lambda_1 + \lambda_2.$$

Решение уравнения (3) возможно при известном начальном условии $h(t_0) = h_0$.

Для Каспия в соотношении $f = a + bh$ a равно 366 тыс. км², b составляет 14 тыс. км²/м, h отсчитывается в метрах относительно отметки −28,5 м. Речной сток в среднем составляет $v_0^+ = 275$ км³/год, сток в залив Кара-Богаз-Гол оценивается как $v^- = 8,8 + 8,6h$, км³/год. За счет испарения Каспийское море отдает в атмосферу приблизительно в 5 раз больше влаги, чем получает в виде осадков, выпадающих на зеркало озера, и видимое испарение с зеркала составляет приблизительно 0,75 м/год. Показатели $\lambda_1 = 0,03/\text{год}$ и $\lambda_2 = 0,02/\text{год}$. Если не пытаться конкретизировать функцию $g(t)$, то ее поведение можно рассматривать как случайный процесс. Эмпирические данные показывают, что коэффициент корреляции между величинами, сдвинутыми на год, составляет около 0,3, а при сдвиге в 2 года можно прийти к ситуации статистически независимых событий. В этом случае уравнение (3) записывается так:

$$\frac{dh(t)}{dt} = -\lambda h(t) + \eta(t). \quad (4)$$

Оно воспроизводит “медленную” динамику уровня моря $h = h(t)$ под влиянием быстро флуктуирующего внешнего воздействия $\eta = \eta(t)$, представляющего собой белый шум. Здесь λ описывает эффективность линейной обратной связи системы, определяя характерное время медленной эволюции λ^{-1} , составляющее около 20 лет. Уравнение (4) представляет собой так называемое стохастическое уравнение Ланжевена, в котором система медленно эволюционирует под воздействием накапливающихся быстрых случайных воздействий.

Автокорреляционная функция быстрого воздействия может быть записана, например, в следующем виде:

$$\langle \eta(\xi) \eta(\zeta) \rangle = \sigma_{\eta}^2 \exp(-|\xi - \zeta|/\tau_r).$$

Чтобы отражать сущность рассматриваемой задачи, эта функция должна быть “быстро затухающей”. Условие множественности случайных воздействий, создаваемых функцией $\eta = \eta(t)$, в пределе при выполнении неравенства $\tau_r \ll \lambda^{-1}$, позволяет говорить о приближении к условиям так называемого дельта-коррелированного процесса (его спектром является спектр белого шума).

Процедура решения уравнения (4) направлена на получение вероятностных характеристик описываемого уравнением случайного процесса. Так, выражение для дисперсии медленного процесса имеет следующий вид [8]:

$$\sigma_h^2 = \frac{\tau_r \sigma_{\eta}^2}{\lambda} (1 - e^{-2\lambda t}). \quad (5)$$

На длительных отрезках времени $t \gg \lambda^{-1}$ достигается стационарное состояние, т.е.

$$\sigma_{h,st}^2 = \frac{\tau_r \sigma_{\eta}^2}{\lambda}, \quad (6)$$

дисперсия уже не зависит от времени, и процесс приобретает характер установившихся нерегулярных флуктуаций.

Уравнение (4) и следствия решения (5)–(6) описывают типичный случай “классического” одномерного броуновского блуждания частицы.

При выводе уравнения (4) подразумевается неизменность климата, это условие проявляется, в частности, в том, что λ принимается константой. Если изменения происходят, то на динамике уровня моря они сказываются и прямо (уровень реагирует на изменения водного баланса), и косвенно, поскольку меняется степень инерционности. Важно подчеркнуть, что зависимость от фонового состояния характеризуется средними величинами, т.е. теми, о которых имеется достоверная информация как по палеореконструкциям, так и по данным моделирования. Именно такой путь, т.е. определение вероятностных свойств через известные средние значения, применяется в статье. Правильнее было бы, разумеется, применить для расчета динамики уровня глобальную климатическую модель, воспроизводящую все звенья влагооборота. Однако, как отмечено во введении, в реальности осуществить такую процедуру пока еще не удастся из-за невысокого качества модельных полей.

Дисперсия и функция распределения вероятности декадных колебаний уровня Каспия для трансгрессий и регрессий в голоцене. Оценим применимость формул для дисперсии колебаний уровня. Для этого рассчитаем значение стандартного отклонения уровня Каспия в современную эпоху и сравним полученное значение с эмпирическим значением. Под современной будем понимать субатлантический этап голоценовой истории Земли, наступивший около 2 тыс. л.н., в соответствии с компетентным мнением Г.И. Рыча-

гова, за этот период состояние климата и природной среды не испытывало принципиальных перестроек, а флуктуировало в пределах некоторой “установившейся” изменчивости. Воспользуемся уравнением (6), в котором время корреляции, как оговорено выше, берется равным 2 годам. Как было показано, $\lambda = 0,05/\text{год}$. Что касается возбуждающей функции, то из компонентов водного баланса Каспийского моря наиболее быстро и ощутимо изменяется речной сток, основу которого составляет сток Волги. Например, по данным наблюдений, величины дисперсий флуктуаций стока и колебаний видимого испарения (выраженные в единицах высоты слоя) составляют 0,026 и 0,007 (м/год)² соответственно. Таким образом, σ_{η}^2 равно 0,033 (м/год)². Будем считать эти величины типичными для всего двухтысячелетнего этапа (хотя можно думать, что они окажутся несколько занижены). В итоге расчета по (6) получается, что $\sigma_{h,st} \approx 1,1\text{м}$. Стандартное отклонение ряда реконструированных значений приращений уровня (см. выше) составляет 1,4 м, что, как видно, близко к теоретической оценке.

То, что теоретическое значение $\sigma_{h,st}$ получилось несколько меньше соответствующего эмпирического значения, возможно, связано не только с тем, что за длительный период должно было проявиться несколько резких аномалий, повышающих уровень изменчивости и не учитываемых при использовании величины σ_{η}^2 для периода инструментальных наблюдений. Важно отметить, что в ряду 2000-летних изменений уровня Каспийского моря проявились (см. выше) отклики на глобальные климатические события, появление которых связано с вариациями солнечной постоянной [2]. Это обеспечило некоторый внешний дополнительный (по сравнению с шумом) вклад в дисперсию колебаний.

Теперь рассчитаем величину $\sigma_{h,st}$ для некоторых событий прошлого. Главную роль в вариации уровня Каспийского моря играет изменение речного стока — такая ситуация отмечена и сейчас, и в голоцене в целом [13]. Изменим в (6) только значение величины λ , которая прямо пропорциональна среднему уровню притока речных вод. Этот подход представляется верным в том отношении, что используются только те величины, которые могут быть реально определены. Так, при современном уровне развития моделирования климата определение приращения речного стока больших водных бассейнов в ответ на глобальные климатические изменения представляет задачу, решаемую достаточно надежно [3, 14, 15]. Представляется разумным считать, что выбор $\tau_r = 2$ года также правилен для любого длительного интервала временной изменчивости речного стока. Величина σ_{η}^2 , определяемая главным образом изменениями объема среднего притока речных вод должна, конечно, меняться, однако для такого большого водосбора, как бассейн Каспийского моря, она не может измениться очень существенно. Поэтому в первом, оценочном приближении можно рассмотреть, к каким послед-

ствиям для величины дисперсии приведут вариации значения λ .

Выполненные ранее оценки влияния изменений речного стока на величину уровня Каспийского моря показали, что 50%-му уменьшению стока соответствует падение уровня на 50 м — такое событие имело место в период максимума позднелейстоценового криохрона [14, 15]. Амплитуды голоценовых регрессий и трансгрессий на порядок меньше, поэтому и вариации стока, их вызывающие, не могут быть столь велики. В работе [6] приводится диаграмма, с помощью которой можно определить следующее: чтобы обеспечить положение уровня моря на отметках –20 и –31 м (рис. 1, а) требуется изменить приток с водосбора (по сравнению с современным) примерно на +30 и –10% соответственно.

Расчеты по (6) показывают, что при увеличении стока на 30%, $\sigma_{h,sl}$ получается равной 1,05 м, а при уменьшении на 10% составляет 1,2 м. Таким образом, серьезные аномалии водного режима вызвали лишь очень небольшие изменения режима изменчивости.

Функция распределения вероятности приращений уровня, как отмечено выше, представляет собой нормальное распределение. На рис. 2 гауссовы кривые представлены для трех рассматриваемых ситуаций — современного положения уровня Каспийского моря (–28 м) и двух крайних по величине аномалий голоцена: –31 и –20 м. На рис. 2 видно, что при практическом отсутствии зависимости дисперсии от фонового состояния голоценовые трансгрессии и регрессии Каспия проявлялись преимущественно как изменения средних значений.

Заключение. В статье рассмотрена проблема “декадной” изменчивости флуктуаций уровня Каспийского моря в стадиях крупных трансгрессий и регрессий, имевших место в голоцене. Показано, что при вариациях (в весьма широких пределах) речного стока, изменяющего среднее положение уровня моря, дисперсия флуктуаций уровня остается фактически аналогичной современной. Таким образом, в перио-

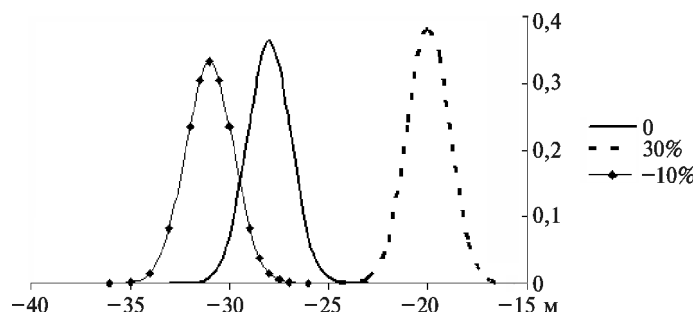


Рис. 2. Дифференциальные функции распределения вероятностей (гауссовы кривые) колебаний уровня Каспийского моря для «современного» периода (0), а также стадий крупных трансгрессий и регрессий голоцена, создаваемых +30%-ми и –10%-ми аномалиями речного стока

ды трансгрессий и регрессий голоцена изменения состояния моря проявлялись преимущественно как “изменения средних значений”. Это позволяет использовать статистические параметры, определенные по современным данным, для оценки доверительных интервалов при анализе палеогидрологических аномалий голоцена. Это можно считать в некотором смысле обоснованием использования “принципа актуализма” при интерпретации палеогидрологических изменений в терминах современных изменений климата.

С другой стороны, теоретическая оценка стандартного отклонения (1,1 м), полученная выше, позволяет сделать важные выводы относительно текущих изменений уровня Каспийского моря. Как известно, с середины XIX в. и до начала XX в. вариации уровня были невелики, а затем в 1930-х гг. произошло его резкое падение, сменившееся в конце 1970-х гг. быстрым ростом. Однако эти события не являются экстраординарными. Например, вероятность того, что аномалия уровня Каспия находится в диапазоне 0–3 м, равна: $P(\Delta h \leq 3) = \Phi(0) + \Phi(3/1,1) = 0,5$ (Φ — функция Лапласа), то есть появление подобных событий возможно в половине рассматриваемых случаев. Аналогичный вывод о инерционном характере современных вариаций уровня был сделан С.Г. Добровольским [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский С.Г. Климатические изменения в системе “гидросфера — атмосфера”. М.: ГЕОС, 2002. 232 с.
2. Кислов А.В. Климат в прошлом, настоящем и будущем. М.: МАИК Наука/Интерпериодика, 2001. 326 с.
3. Кислов А.В., Евстигнеев В.М., Малхазова С.М. и др. Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: Макс-Пресс, 2008. 292 с.
4. Кислов А.В., Торопов П.А. Моделирование вариаций речного стока Восточно-европейской равнины при различных климатах прошлого // Водн. ресурсы. 2006. Т. 33, № 5. С. 515–526.
5. Косарев А.Н., Кураев А.В., Никонова Р.Е. Особенности современных гидрологических условий Северного Каспия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1996. № 2. С. 47–53.

6. Панин А.В., Сидорчук А.Ю., Борисова О.К. Флювиальные процессы и речной сток на Русской равнине в конце поздневалдайской эпохи // Горизонты географии. К 100-летию К.К. Маркова. М., 2005. С. 114–127.
7. Раткович Д.Я., Болгов М.В. Исследование вероятностных закономерностей многолетних колебаний уровня Каспийского моря // Водн. ресурсы. 1994. Т. 21. С. 389–404.
8. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976. 496 с.
9. Рычагов Г.И. Уровенный режим Каспийского моря за последние 10000 лет // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1993. № 2. С. 38–49.
10. Фортус М.И. Об эквивалентном числе независимых наблюдений // Изв.РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. С. 591–599.

11. *Фролов А.В.* Динамико-статистические методы многолетних колебаний уровня проточных озер. М.: Наука, 1985. 104 с.
12. *Hasselmann K.* Stochastic climate models. Pt I. Theory // *Tellus*. 1976. Vol. 28. P. 473—485.
13. *Kislov A.V., Surkova G.V.* Simulation of the Caspian Sea level changes during the last 20000 years // *Palaeohydrology and Environmental Change* / Ed. G. Benito et al. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. P. 235—244.
14. *Kislov A.V., Toropov P.A.* East European river runoff and Black Sea and Caspian Sea level changes as simulated within the Paleoclimate modeling intercomparison project // *Quaternary Intern.* 2007. Vol. 167—168. P. 40—48.
15. *Kislov A.V., Toropov P.A.* Simulation of Black Sea and Caspian Sea responses to quaternary climate scenarios // *Geography, Environment, Sustainability*. 2008. N 1. P. 68—79.
16. *Lloyd E.H.* The stochastic reservoir: exact and approximate evaluations of the storage distribution // *J. Hydrology*. 1993. Vol. 151. P. 65—107.

Поступила в редакцию
20.07.2010

A.V. Kislov

ABOUT MULTI-SCALE NATURE OF THE CASPIAN SEA LEVEL FLUCTUATIONS

During the last 10 kyr the Caspian Sea experienced several transgressions and regressions with characteristic periodicity of about 2000 years and standard deviation of the sea level $\sigma \approx 3$ m. These “centennial” fluctuations were accompanied by shorter “decade” oscillations resulting in sea level changes during several dozens of years. The article deals with the problem of decade variability dependence on the stage (transgression or regression) of the sea. Theoretical approach is based on the application of the mathematical apparatus of the Brownian motion theory. Analysis and solution of the corresponding stochastic equation (the Langevin equation) provided a formula for the dispersion of decade fluctuations. The dispersion values are poorly dependent on the observed variations of water balance components. Thus, during the Holocene transgressions and regressions sea level fluctuations were mainly “changes of the average values”. Therefore it is possible to use statistical parameters calculated on the basis of present-day data for the estimation of confidence intervals while analyzing the palaeohydrological anomalies of the Holocene.

Key words: the Caspian Sea, sea level fluctuations, decade oscillations, mathematical apparatus of the Brownian motion theory.