

ДИСКУССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В данном разделе публикуются статьи, при оценке которых у членов редколлегии возникли существенные разногласия. Однако результаты исследований, приведенные в этих статьях, интересны и их целесообразно широко представить специалистам, что будет способствовать профессиональной дискуссии на страницах научных изданий.

DOI:10.21513/2410-8758-2024-3-439-455

УДК 551.87,551.583

Проявление самоподобия в колебаниях уровня Каспийского моря

А.В. Кислов, Т.А. Янина*

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет
Россия, 119234, г. Москва, тер. Ленинские Горы, д. 1

* Адрес для переписки: avkislov@mail.ru

Реферат. Колебания уровня Каспийского моря многомасштабны. На основе анализа трансгрессий моря (по данным гидрометеорологических измерений, а также на основе палеоданных) установлено, что в диапазоне 10^0 - 10^5 лет флуктуации уровня моря самоподобны с коэффициентом Херста $H \sim 1/2$, что служит признаком случайного процесса типа классического броуновского движения. Использовать для аналогичного исследования регрессии моря менее продуктивно, поскольку их реконструкции гораздо менее надежны, чем реконструкции трансгрессий.

Ключевые слова. Колебания уровня Каспийского моря, самоподобие, эффект Херста, трансгрессивные события, броуновское движение.

Self-similarity in fluctuations in the level of the Caspian Sea

A.V. Kislov, T.A. Yanina*

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
1, Leninskie Gory, 119234, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: avkislov@mail.ru

Abstract. Fluctuations in the level of the Caspian Sea are multi-scale. Based on the analysis of transgressions (the results of hydrometeorological measurements, as well as paleodata, the reconstructions of which are much more reliable than regressions), it was established that in the range of 10^0 - 10^5 years, sea level

fluctuations are self-similar with a Hurst coefficient $H \sim 1/2$, which is a sign of a random process such as a Brownian movement. It is less productive to use sea regressions for a similar study, since their reconstructions are much less reliable than reconstructions of transgressions.

Keywords. Caspian Sea, self-similarity, Hurst effect, sea level transgressive events, Brownian motion.

Введение

Колебания уровня Каспийского моря происходят в широком диапазоне амплитуд и частот, создавая своеобразную многомасштабность флуктуаций. Этот вопрос был исследован в диапазоне межгодовой – междекадной изменчивости, по данным наблюдений за уровнем моря (Кучмент, Поюровский, 1998; Соболев, 2019). Представления о более протяженных событиях могут быть основаны на палеогеографических реконструкциях (Рычагов, 1997; Свиточ, Янина, 1997; Krijgsman et al., 2019; Kroonenberg et al., 2007; Yanina, 2020). Цель статьи заключается в том, чтобы, соединив эти источники информации, исследовать особенность вариаций уровня Каспия.

Если считать, что механизмы вариаций связаны исключительно с особенностями климата (а это обычно принимаемая парадигма подкрепляется геологическими данными (Рычагов, 1997)), то всю совокупность разномасштабных вариаций можно анализировать с единых позиций. Принимая общность климатообразующих факторов, положим в основу своеобразный принцип актуализма, согласно которому разномасштабные колебания происходят одновременно. Это позволяет сопоставить и соотнести друг с другом характеристики колебаний различной протяженности. При этом сразу возникает ощущение, что, как правило, протяженные по времени события характеризуются большей амплитудой, чем менее длительные события.

Это означает, что в многомасштабном наборе случайных флуктуаций уровня Каспия имеется определенная закономерность. Цель данной работы заключается в том, чтобы проверить ее и определить, насколько она универсальна на разных временных масштабах. Практически это означает изучение того, подчиняются ли универсальным связям статистические характеристики изменчивости на разных масштабах. Такое свойство называется самоподобием и служит признаком фрактального поведения (строгое определение фрактала см., например, (Федер, 1991)).

Одной из распространенных характеристик такой организации временной эволюции служит показатель самоподобности H , так называемый параметр Херста, хотя этот термин может использоваться по-разному (Franzke et al., 2018). С его помощью описывается то, что появление экстремумов в выборке увеличивается пропорционально ее объему в соответствии с соотношением $\sim \tau^H$ (τ – объем выборки или, в случае временного ряда, длина временного интервала), причем сам Г. Херст, родоначальник данного направления науки, получил, что поведение многих объектов (не только гидрологических)

характеризуется $H \sim 0.7$ (Hurst, 1951). С другой стороны, в весьма распространенном случае броуновского движения должно быть $H=1/2$ (см., например, Кроновер, 2000; Демченко, Кислов, 2010). С H связаны и другие показатели (в том числе, фрактальная размерность $d=1-H$ (Кроновер, 2000) и др.).

Информация о параметрах H или d полезна потому, что позволяет оценить интегральные свойства объекта, в частности, подобрать для их описания математическую модель. С практической точки зрения это бывает важно, поскольку позволяет переносить информацию о статистических свойствах, определенных (измеренных) на определенном масштабе, на другие уровни. Однако обоснованием возможности такого подхода, кроме формально установленной принадлежности к единому фракталу, должно быть то, что «физика» на всех масштабах изменчивости одинакова. В самом деле, принципиальной особенностью фрактала является не только то, что статистика изменчивости на всех уровнях пропорционально сопоставима, но обычно неявно предполагается, что и механизм, создающий данную структурную особенность, одинаков на всех масштабах. Именно так устроена, например, «каноторова пыль», «снежинка Коха» и другие классические модели фракталов (Федер, 1991). Некоторые авторы, рассматривая проявление фрактальных свойств окружающей среды, вообще не акцентируют внимание на данной проблеме (Федер, 1991) или, хотя и отмечают, что механизмы на разных уровнях неодинаковы (Линник, 2018), но не принимают это во внимание. Другие авторы, наоборот, постулируют свойство одинаковости физики процессов, считая, что оно следует из установленного формального признака – существования единого коэффициента самоподобия (Пузаченко и др., 1997; Lovejoy, 2019).

Требование единства физики создает серьезные проблемы при обосновании использования фрактальных свойств. Кроме того, выделяемые в природе самоподобные объекты, строго говоря, фракталами не являются из-за принципиальной невозможности реализации «бесконечного зума», поэтому самоподобие наблюдается только в ограниченном диапазоне частот.

В данной работе для анализа взято Каспийское море потому, что оно представляет собой уникальный гидрологический объект, демонстрирующий многомасштабные вариации уровня с большой амплитудой в связи с изменениями регионального и глобального климата. Для исследования использованы только трансгрессии, поскольку реконструкции уровня Каспия в регрессивные эпохи для большинства из них не выполнены (кроме ательской (поздний плейстоцен) и мангышлакской (голоцен) регрессий).

При попытке определить особенности многомасштабных вариаций уровня Каспия существует ряд методологических трудностей. В том числе, априорно неясно, к какому классу относится случайный процесс изменений уровня моря – стационарному или нестационарному, является ли динамика случайным процессом с «короткой» или «бесконечной» LRD памятью (long-range distance) (Franzke et al., 2018) и др. Понимание этого позволило бы следовать изначально по правильному пути, с последовательным применением, например, идеологии классического броуновского движения или обобщенного броуновского движения. Однако такой подход невозможен потому, что

данные наблюдений (разной природы) совершенно недостаточны для требуемой характеристики объекта. Поэтому авторы ставят скромную задачу – только определить показатель H , а затем, на этой основе, сделать выводы об особенностях случайного процесса, который может служить моделью поведения вариаций уровня моря.

В следующем разделе проанализированы палеоданные, примененные, вместе с данными гидрологических наблюдений, для дальнейшего анализа. Затем представлена методика определения показателя H . Далее рассмотрены полученные результаты.

Материалы и методы

Данные инструментальных наблюдений дают неоценимый материал для исследования межгодовых особенностей вариаций уровня. Однако они охватывают сравнительно непротяженный интервал времени, поэтому для оценки гораздо более длительных изменений следует обратиться к палеогеографическим реконструкциям.

В монографии Г.И. Рычагова (1997) в основу реконструкции трансгрессивных и регрессивных событий Каспия положены многолетние исследования на дагестанском побережье, где в строении морских террас и долин малых рек отражены происходившие в прошлом колебания уровня. В монографии А.А. Свиточа и Т.А. Яниной (1997) приведены результаты как их собственных многолетних исследований в различных районах Каспийского региона (азербайджанское и дагестанское побережье, Северный Прикаспий, долины Волги и Урала), так и обширный опубликованный материал по всему региону. Одними из последних обзорных публикаций по реконструкции колебаний уровня Каспия, оценке их размаха и времени проявления, являются статьи (Krijgsman et al., 2019; Yanina, 2020). Обобщенная кривая приведена на рис. 1А. Основанные на ее использовании данные представлены в табл. 1.

Колебания уровня Каспия становятся все более надежно интерпретируемы при приближении к современности. Наиболее полно реконструированы трансгрессивно-регрессивные события позднего плейстоцена (130 тыс. лет) (рис. 1Б). Но они же относятся к самым дискуссионным. Так, начало позднего плейстоцена, по мнению большинства исследователей, ознаменовалось позднехазарской межледниковой трансгрессией, уровень которой не превышал -10 м (абс.). Последовавшая за ней гирканская трансгрессия, установленная Г.И. Поповым (1967), не получила подтверждения (Федоров, 1978; Свиточ, Янина, 1997). Однако выполненное в последние годы обширное бурение в Северном Каспии (Sorokin et al., 2018; Yanina et al., 2018) подтвердило существование гирканского трансгрессивного бассейна. Методом оптически стимулированной люминесценции возраст события определен примерно в 100 тыс. лет (Курбанов и др., 2018). О признании гирканской трансгрессии высказался и Г.И. Рычагов (2016) на основе ревизии своих материалов по дагестанскому побережью. На этом основании гирканская трансгрессия включена в палеогеографическую схему колебаний уровня Каспия.

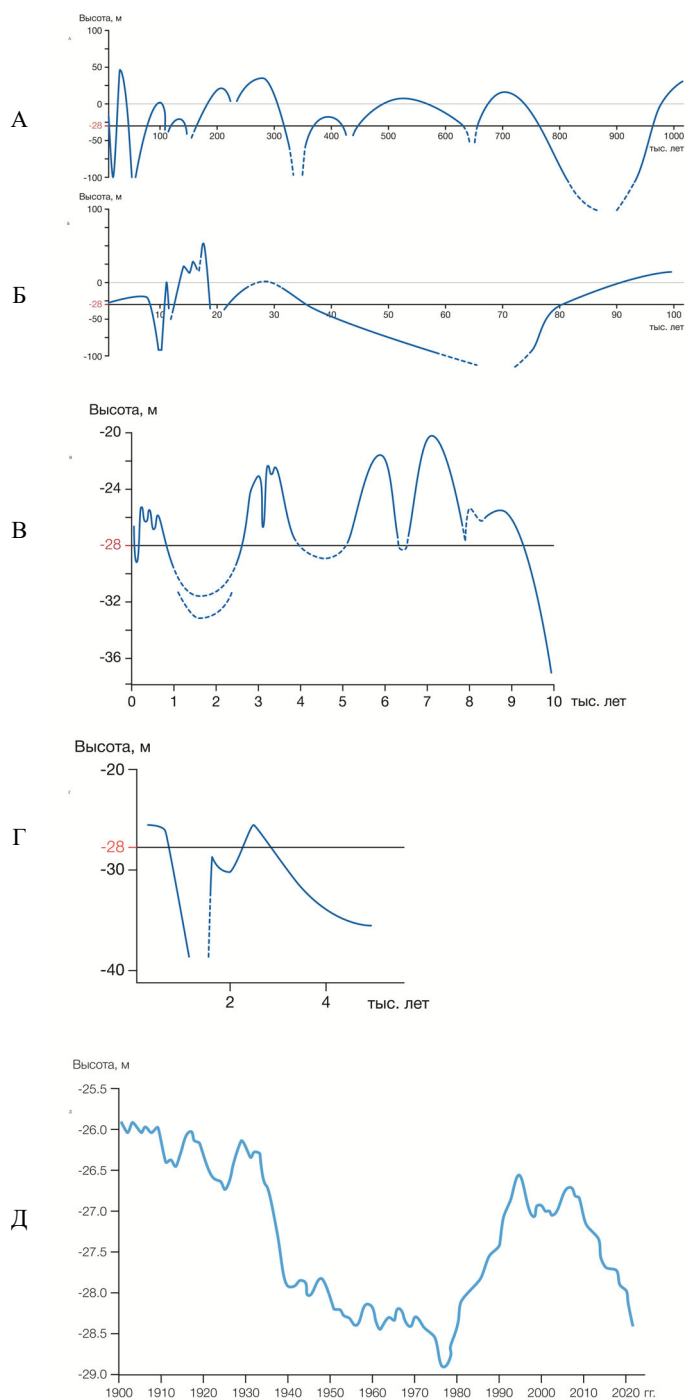


Рисунок 1. Разномасштабные колебания уровня Каспийского моря
*A – за 1 миллион лет, Б – за 100 тысяч лет, В – за 10 тысяч лет (по Рычагову, 1993а),
Г – уточнения кривой (В) в интервале 5 тысяч лет, Д – инструментальные данные*

Figure 1. Different fluctuations of the Caspian Sea
*A – during 1 000 000 years, Б – during 100 000 years, В – during 10 000 years (Rychagov, 1993a),
Г – improvement curve C in the range 5 000 years, Д – observational data*

Таблица 1. Параметры трансгрессий Каспийского моря, использованные в данной работе

Table 1. Parameters of the Caspian Sea Transgressions using in this paper

Название трансгрессии (или отметка времени)	Продолжительность (t), лет	Максимальное отклонение уровня (h), м
Ранняя Бакинская	130 000	48
Поздняя Бакинская	180 000	43
Урунджикская	70 000	13
Ранняя Хазарская	165 000	63
Поздняя Хазарская	10 000	18
Гирканская	20 000	38
Хвалынская	26 000	78
Новокаспийская	8 000	8
Голоцен		
~7.9-6.5 тыс. лет назад	1 400	8
~6.2-5.2	1 000	5.5
~3-2.2	800	5
Дербентско-Каспийская	1 000	4
Новокаспийская 5-я трансгрессивная фаза		
1400-1500	100	0.5
1550-1700	150	1
1700-1800	100	1
Инструментальные данные		
Межгодовые вариации	3.8	0.3
1980-2020	40	1.5
1930-1990	60	2

Дискуссионным вопросом в течение многих лет является хвалынский этап развития бассейна, несмотря на то, что в отличие от более ранних трансгрессий, его следы отмечаются на всех побережьях Каспия. Особенно четко в рельефе прослеживается уровень максимального стояния хвалынского моря, располагающийся, за некоторым исключением, на отметках 46-50 м (абс.) по всему периметру палеобассейна. Почти все исследователи Каспия пришли к заключению о двух хвалынских трансгрессиях (стадиях) – ранне- и позднехвалынской, разделенных енотаевской регрессией. Раннехвалынская трансгрессивная стадия в свой максимум достигала абсолютных отметок 46-50 м; позднехвалынская не поднималась выше 0 м.

Для максимального уровня комплексом методов датирования (радиоуглеродным, торий-урановым, оптико-люминесцентным) получен возраст 19-18 тыс. лет (Kurbanov et al., 2021; Макшаев, Ткач, 2023). Острая дискуссия в связи с этим возникла о возрасте позднехвалынской стадии (Рычагов, 2014;

Yanina et al., 2018; Макшаев, Ткач, 2023). В результате принято решение выделить хвалынский этап как единую трансгрессию с максимальным уровнем +50 м и полной ее продолжительностью в 26 тыс. лет, включив в этот интервал все ее стадии и фазы.

Информация о колебаниях уровня Каспийского моря в голоцене наиболее достоверно отражена в работах Г.И. Рычагова (Рычагов, 1993а; Rychagov, 1997) (рис. 1В). Работы С. Крооненберга с соавторами (Kroonenberg et al., 2007; Hoogendoorn et al., 2005), проведенные на побережье Дагестана, в дельтах Волги и Куры, на основе массива аналитических данных и радиоуглеродных датировок позволили уточнить кривую колебаний уровня Г.И. Рычагова, начиная с дербентской регрессии (рис. 1Г, табл. 1).

Для установления колебаний уровня моря в исторический период широко используются, помимо палеогеографических исследований, данные археологии и исторические источники (Варущенко и др., 1987; Рычагов, 1993б, 1994; Naderi Beni et al., 2013). Наиболее яркими проявлениями изменений являются «средневековая аномалия» с снижением уровня Каспия до -33...-35 м и «малый ледниковый период» с повышением уровня до -25...-24 м (табл. 1). Отметим, что, как и для более древних временных интервалов, в оценке колебаний уровня в исторический период среди специалистов полного согласия нет.

Таким образом, колебания уровня Каспия представлены разнородными данными, причем только последние ~130 лет представлены непрерывной кривой данных гидрологических измерений, а в остальном случае это набор сведений о разновозрастных трансгрессивных явлениях. Своеобразие материала накладывает ограничения на возможности использования апробированных методов при определении характеристик самоподобия, которые развиты для длинных и полных рядов. Среди них метод нормированного размаха (Hurst, 1951; Федер, 1991; Кучмент, Поюровский, 1998; Соболев, 2019), метод удаления тренда (Bashan et al., 2008), метод, основанный на расчетах функции спектральной плотности (Пузаченко и др., 1997; Кислов, 2018), метод окон переменного размера (Schmittbuhl et al., 1995), метод Ричардсона для определения зависимости суммарной протяженности объекта от размера измерителя (Сидорчук, 2014) и некоторые другие (Franzke et al., 2018).

Применительно именно к Каспийскому морю в работе (Кучмент, Поюровский, 1998) с использованием данных за 1890-1994 гг., получено, что $H=0.63$. Однако эта оценка оказалась статистически неустойчива, поскольку добавление к анализу пятнадцати лет измерений XXI века показало, что $H=0.52$ (Соболев, 2019).

В нашей работе за основу взят адаптированный метод окон переменного размера (Schmittbuhl et al., 1995). В оригинале он применяется к длинному временному ряду измерений с достаточно большой дискретностью. Этот ряд разделяется на l_r «окон» продолжительностью r . Внутри каждого «окна» подсчитывается размах значений ϵ . Такая процедура повторяется для разных разбиений. Обозначим усредненный размах

$$\frac{1}{l_r} \sum_{i=1}^{l_r} \varepsilon_i = V(r).$$

Если при изменении числа окон получается зависимость $V(r) \sim r^H$, и если качество аппроксимации удовлетворительное, то это служит основанием для утверждения о том, что количество экстремумов в ряду пропорционально длине ряда в степени H . Это означает проявление самоподобия и позволяет определить H .

Для палеоданных формальная реализация подобного подхода невозможна, поскольку временного ряда с высокой дискретностью не существует, а изменчивость представлена набором разреженных аномалий (событий) разного возраста. Поэтому процедура выделения многих «окон», отвечающих определенному масштабу, и проведение усреднения по всему их количеству невозможна. Мы предполагаем, что в нашем случае «усредненный размах» описывается амплитудой аномалии уровня Каспия (h), выступающей как представитель явлений данного масштаба, а размер «окна» есть продолжительность этой аномалии (τ). На этой основе из постулируемого соотношения $h = A\tau^H$ можно оценить показатель H . При этом, учитывая специфику палеореконструкций (см. выше), в качестве аномалий использованы только трансгрессии. Они характеризовались, в соответствии с требованиями методики, максимальным отклонением и продолжительностью, которая может быть ассоциирована с половиной периода колебания (см. табл. 1).

Аналогичным образом были проанализированы и ряды гидрологических наблюдений (рис. 1Д). Отметим, что имея более чем столетний ряд измерений, можно было бы применить рассматриваемый метод (Schmittbuhl et al., 1995) и в оригинальной трактовке. Однако нам хотелось провести анализ по единой методике, и для этого мы сняли с кривой вариаций уровня информацию о нескольких четко выраженных аномалиях, имевших продолжительность в несколько лет (от 2.5 до 5 лет). Эти данные были усреднены, позволив получить таким способом типичное значение межгодовых вариаций (см. табл. 1). Такой подход, несмотря на кажущуюся грубость по сравнению с количественным формальным анализом данных, имеет свои преимущества, поскольку фактически отфильтровывает малые аномалии, «зашумляющие» результаты.

Результаты и обсуждение

Практически удобно находить H логарифмируя соотношение $h = A\tau^H$, преобразуя его в удобную форму

$$\ln(h) = H\ln(\tau) + \ln(A) \quad (1)$$

и применяя метод наименьших квадратов.

В соответствии с предложенным подходом соотнесем данные табл. 1 друг с другом в логарифмических координатах. В случае, если между параметрами есть связь, то точки должны расположиться вдоль отрезка прямой линии. Видно (рис. 2), что во всем диапазоне изменчивости получена зависимость, соответствующая формуле (1), причем с достаточно высокой точностью (это характеризует большой коэффициент детерминации 0.88). Определение показателя самоподобия, осуществленного по подобранному уравнению регрессии, показало, что $H \cong 0.49$. Отклонение этого значения от $1/2$, при весьма невысокой точности рассматриваемых данных, несущественно. Это означает, что вариации отвечают модели броуновского стационарного случайного процесса с «короткой» памятью. Полученное отсутствие эффекта Херста подтверждает результаты (Кислов, 2018; Соболев, 2019), полученные путем применения иных подходов. Следует отметить, что к выводам, касающимся эффекта Херста, вообще надо относиться осторожно, учитывая погрешности данных и методов и принимать его во внимание только тогда, когда отклонения H от $1/2$ действительно велики.

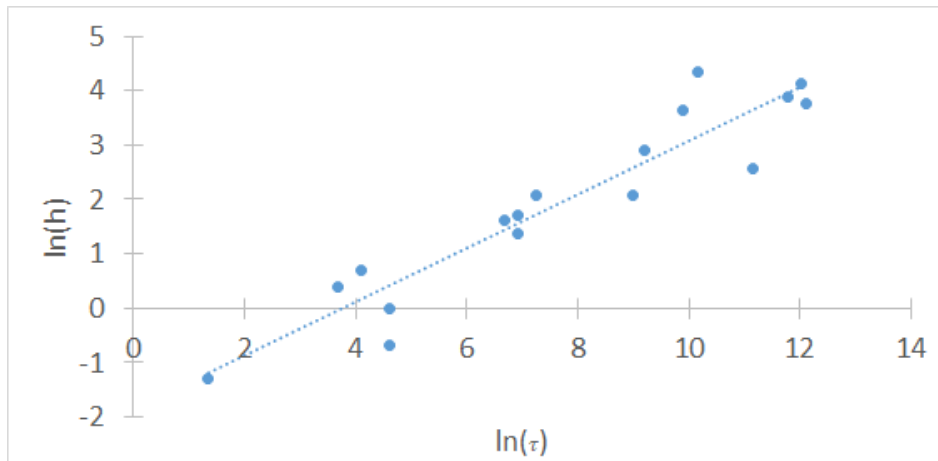


Рисунок 2. Связь амплитуды и продолжительности аномалий уровня Каспийского моря
Показано аппроксимирующее связь уравнение регрессии: $\ln(h) = 0.49 \cdot \ln(68.1 + \tau)$.
Коэффициент детерминации равен 0.88

Figure 2. Relationship between the amplitude and duration of Caspian Sea level anomalies
A straight line is shown that approximates formula (1), regression equation
is $\ln(h) = 0.49 \cdot \ln(\tau) + 1.86$. The coefficient of determination is 0.88

Факт самоподобия вариаций уровня Каспийского моря означает то, что изменчивость на масштабах от 10^0 до 10^5 лет обладает, в определенном смысле, универсальными свойствами. То есть, несмотря на использование дискретных и даже очень разрозненных данных, создается впечатление, что дисперсия флуктуаций континуально распределена по спектру. Так может происходить, если имеется источник (источники) возбуждения изменчивости, от которых энергия способна передаваться от одного масштаба к другому. Поскольку гидрологический режим определяется состоянием климата, то из общих соображений можно предположить, что постоянно действующими

являются два источника. В высокочастотном участке спектра «энергия» создается за счет бароклиной гидродинамической неустойчивости, присущей общей циркуляции атмосферы. Генерируемые вариации метеорологических полей определяют изменчивость речного стока, осадков и испарения. Возникающие вариации разных знаков не погашают друг друга, а вызывают накопление долгоживущих аномалий уровня (и площади) Каспийского моря на межгодовых, междекадных и, возможно, «вековых» масштабах. Это порождает изменчивость типа красного шума (при этом $H=1/2$), и построенные на этой основе теоретические модели не противоречат данным наблюдений (Kislov, 2016). Другой источник изменчивости климата и гидрологического цикла может быть связан с долговременными вариациями радиационного режима, которые активируются ритмами Миланковича на периодах 41, ~20 и 100 тысяч лет, возбуждая широкий набор флуктуаций в климатической системе и, возможно, каскадный перенос энергии в сторону высоких частот (Huubers, Curry, 2006; Кислов, 2023).

Эти рассуждения следовало бы подкрепить описанием механизмов, однако ничего более конкретного, чем использование общих представлений о закономерностях нелинейного взаимодействия разномасштабных структур, предложить нельзя, и это, разумеется, снижает ценность концепции.

Кроме того, рассматривая по отдельности события, слагающие историю Каспия, можно прийти к выводу, что изменчивость уровня в каждом случае определяется разными причинами. Так, можно определенно утверждать, что на масштабах в несколько лет изменения уровня определяются вариациями в системе атмосферы и океана, то есть опосредованно чувствуют изменения Североатлантической осцилляции, Южного колебания, Тихоокеанской и Атлантической междекадной изменчивости и др. На масштабах в десятки тысяч лет в динамике уровня прослеживается ритм вариаций климата в плейстоцене - голоцене, непосредственно связанный с механизмом Миланковича и развивающимися в климатической системе обратными связями. В этом контексте уникальности физики явлений в зависимости от их масштаба, возникает обоснованное опасение, что эмпирически установленное наличие универсальной связи не имеет смысла, поскольку, как было отмечено во Введении, кроме формально установленной принадлежности к единому фракталу, должно быть единство «физики» на всех масштабах изменчивости. В этом случае альтернативным объяснением упорядоченности статистических свойств, обнаруженных в данном исследовании, могла бы быть интерпретация полученного результата с точки зрения нарастания ошибок информации с уменьшением частоты флуктуаций.

Выводы

Целью работы было исследование общих закономерностей колебаний уровня Каспийского моря, проявляющихся в широком диапазоне изменчивости от нескольких лет до сотен тысяч лет. Для анализа взяты трансгрессии, поскольку они в циклических вариациях восстановлены гораздо надежнее,

чем регрессии. Показано, что колебания уровня Каспия в диапазоне от 1 до 10^5 лет обладают свойством статистического самоподобия с показателем Херста $H=1/2$. Это позволяет предположить, что моделью аномалий может служить простое (классическое) броуновское движение, порождающее так называемый «красный шум». Следствием данной теории служит, в том числе, представление о том, что средняя амплитуда трансгрессий пропорциональна квадратному корню из продолжительности событий.

В то же время, к данной универсальной закономерности следует относиться с осторожностью. Возможно, что это не следствие физической закономерности (тем более, что известно, что на каждом уровне изменчивости имеются свои управляющие процессы), а проявления эффекта нарастания амплитуды ошибок информации пропорционально масштабу явления.

Благодарности

Работа А.В. Кислова выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”, а также финансирование осуществлено Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова (№ 121051400081-7).

Работа Т.А. Яниной выполнена в рамках тем Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова № 121051100135-0 и № 121040100323-5.

Список литературы

Варущенко, С.И., Варущенко, А.Н., Клиге, Р.К. (1987) Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени, М., Наука, 255 с.

Демченко, П.Ф., Кислов, А.В. (2010) *Стохастическая динамика природных объектов. Броуновское движение и геофизические приложения*, М., Геос, 190 с.

Кислов, А.В. (2018) Вековая изменчивость уровня Каспийского моря, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 71-80.

Кислов, А.В. (2023) К теории климата плиоцена – плейстоцена и голоцена, *Геоморфология и палеогеография*, т. 54, № 1, с. 3-16, URL: <https://doi.org/10.31857/S0435428123010066>; <https://elibrary.ru/GQCYHO>.

Кучмент, Л.С., Поюровский, Л.В. (1998) Эффект Херста в многолетних колебаниях уровня Каспийского моря, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 73-79.

Кроновер, Р.М. (2000) *Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории*, М., Постмаркет, 352 с.

Курбанов, Р.Н., Янина, Т.А., Мюррей, А., Борисова, О.К. (2018) Гирканский этап в позднеплейстоценовой истории Манычской депрессии, *Вестник Московского университета. Серия География*, № 3, с. 77-88.

Линник, В.Г. (2018) *Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклеидов*, М., ГЕОХИ РАН, 372 с.

Макшаев, Р.Р., Ткач, Н.Т. (2023) Хронология хвалынского этапа развития Каспия, по данным радиоуглеродного датирования, *Геоморфология и палеогеография*, т. 54, № 1, с. 37-54, URL: <https://doi.org/10.31857/S0435428123010066>; <https://elibrary.ru/GQCYHO>.

Попов, Г.И. (1967) Гирканская трансгрессия в Северном Прикаспии, *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода*, № 33, с. 77-86.

Пузаченко, Ю.Г., Дьяконов, К.Н., Иванов, А.Н. (1997) Анализ иерархической структуры рельефа как основа организации природно-территориального комплекса, *Вестник Московского университета. Серия География*, № 5, с. 3-9.

Рычагов, Г.И. (1993а) Уровенный режим Каспийского моря за последние 10 000 лет, *Вестник Московского университета. Серия География*, № 2, с. 38-49.

Рычагов, Г.И. (1993б) Уровень Каспийского моря за историческое время, *Вестник Московского университета. Серия География*, № 4, с. 42-49.

Рычагов, Г.И. (1994) Уровень Каспийского моря на рубеже XVIII-XIX веков, *Геоморфология*, № 2, с. 102-108.

Рычагов, Г.И. (1997) *Плейстоценовая история Каспийского моря*, М., Изд-во МГУ, 267 с.

Рычагов, Г.И. (2014) Хвалынский этап в истории Каспийского моря, *Вестник Московского университета. Серия География*, № 4, с. 3-9.

Рычагов, Г.И. (2016) Гирканский этап в истории Каспийского моря, *Геоморфология*, № 1, с. 3-17.

Свиточ, А.А., Янина, Т.А. (1997) *Четвертичные отложения побережий Каспийского моря*, М., РАСХН, 267 с.

Сидорчук, А.Ю. (2014) Фрактальная геометрия речных сетей, *Геоморфология*, № 1, с. 3-14.

Соболь, С.В. (2019) *Фрактальные параметры водных объектов*, Н. Новгород, ННГАСУ, 232 с.

Федер, Е. (1991) *Фракталы*, М., Мир, 254 с.

Федоров, П.В. (1978) *Плейстоцен Понто-Каспия*, М., Наука, 165 с.

Bashan, A., Bartsch, R., Kantelhardt, J.W., Havlin, S. (2008) Comparison of detrending methods for fluctuation analysis, *Physica A*, issue 387, pp. 5080-5090, available at: [10.1016/j.physa.2008.04.023](https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.04.023).

Franzke, C.L.E., Graves, T., Watkins, N.W., Gramacy, R.B., Hughes, C. (2012) Robustness of estimators of long-range dependence and self-similarity under non-Gaussianity, *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 370, pp. 1250-1267, available at: [10.1098/rsta.2011.0349](https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0349).

Hoogendoorn, R.M., Boels, J.F., Kroonenberg, S.B. et al. (2005) Development of the Kura delta, Azerbaijan; a record of Holocene Caspian sea level changes, *Marine Geology*, no. 222-223, pp. 359-380, available at: 10.1016/j.mar-geo.2005.06.007.

Hurst, H. (1951) Long-term storage capacity of reservoirs, *Trans. Am. Resour. Res.*, vol. 14, pp. 509-516.

Huybers, P.J., Curry, W. (2006) Links between annual, Milankovitch and continuum temperature variability, *Nature*, issue 441, pp. 329-332, available at: <https://doi.org/10.1038/nature04745>.

Kislov, A. (2016) The interpretation of secular Caspian Sea level records during the Holocene, *Quaternary International*, vol. 409, part A, pp. 39-43, available at: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.026>.

Krijgsman, W., Tesakov, A., Yanina, T. et al. (2019) Quaternary time scales for the Pontocaspian domain, interbasinal connectivity and faunal evolution, *Earth-Science Reviews*, no. 188, pp. 1-40, available at: 10.1016/j.earscirev.2018.10.013.

Kroonenberg, S.B., Abdurakhmanov, G.M., Aliyeva, E.G. et al. (2007) Solar-forced 2600 BP and Little Ice Age highstands of the Caspian Sea, *Quaternary International*, no. 173-174, pp. 137-143, available at: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.03.010>.

Kurbanov, R.N., Murray, A.S., Yanina, T.A. et al. (2021) First optically stimulated luminescence ages of the Early Khvalynian Caspian sea transgression in the lower Volga, *Boreas*, vol. 50, issue 1, pp. 134-146, available at: 10.1111/bor.12478.

Lovejoy, S. (2019) *Weather, Macroweather and the Climate*, Oxford Univ. Press., 347 p.

Naderi Beni, A., Lahijani, H., Mousavi Harami, R. et al. (2013) Caspian sea-level changes during the last millennium, Historical and Geological evidence from the south Caspian Sea, *Clim. Past*, no. 9, pp. 1645-1665, available at: 10.5194/cp-9-1645-2013.

Rychagov, G.I. (1997) Holocene oscillations of the Caspian Sea, the forecasts based on palaeogeographical reconstructions, *Quaternary International*, no. 41-42, pp. 167-172.

Schmittbuhl, J., Vilotte, J.-P., Roux, S. (1995) Reliability of self-affine measurements, *Phys. Rev. E*, vol. 51, pp. 131-147, available at: 10.1103/PhysRevE.51.131.

Sorokin, V.M., Yanina, T.A., Bezrodnykh, Y.P., Romanyuk, B.F. (2018) Identification and age of submarine Girkanian sediment beds (upper Pleistocene) in the Caspian Sea, *Quaternary International*, vol. 465, part A, pp. 152-157, available at: 10.1016/j.quaint.2016.08.044.

Yanina, T.A. (2020) Environmental variability of the Ponto-Caspian and Mediterranean basins during the last climatic macrocycle, *Geography*,

Environment, Sustainability, vol. 13, issue 4, pp. 6-23, available at: 10.24057/2071-9388-2020-120.

Yanina, T., Sorokin, V., Bezrodnykh, Yu., Romanyuk, B. (2018) Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data), *Quaternary International*, vol. 465 (A), pp. 130-141, available at: 10.1016/j.quaint.2017.08.003.

References

Varushchenko, S.I., Varushchenko, A.N., Klige, R.K. (1987) *Izmenenie rezhima Kaspiyskogo morya i besstochnykh vodoemov v paleovremeni* [Changes in the regime of the Caspian Sea and endorheic water bodies in paleotime], Nauka, Moscow, Russia, 255 p.

Demchenko, P.F., Kislov, A.V. (2010) *Stokhasticheskaya dinamika prirodnykh lyu"yektov. Brounovskoye dvizheniye i geofizicheskiye prilozheniya* [Stochastic dynamics of natural objects. Brownian motion and geophysical applications], Geos, Moscow, Russia, 190 p.

Kislov, A.V. (2018) Vekovaya izmenchivost' urovnya Kaspiyskogo moray [Secular variability of the Caspian Sea level], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 71-80.

Kislov, A.V. (2023) K teorii klimata pliotsena – pleystotsena i golotsena [On the Theory of Pliocene – Pleistocene and Holocene Climate], *Geomorfologiya i paleogeografiya*, no. 1, pp. 3-16, URL: <https://doi.org/10.31857/S0435428123010066>; <https://elibrary.ru/GQCYHO>.

Kuchment, L.S., Poyurovsky, L.V. (1998) Effekt Khersta v mnogoletnikh budushchikh urovnyakh Kaspiyskogo moray [The Hurst Effect in Long-Term Fluctuations of the Caspian Sea Level], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 73-79.

Kronover, R.M. (2000) *Fraktaly i khaos vo soderzhashchikhsya v nikh veshchestvakh. Osnovy teorii* [Fractals and Chaos in Dynamic Systems. Fundamentals of Theory], Postmarket, Moscow, Russia, 352 p.

Kurbanov, R.N., Yanina, T.A., Murray, A., Borisova, O.K. (2018) Girkanskiy etap v pozdnepleystootsenovoy istorii Manychskoy depressii [The Hyrcanian stage in the late Pleistocene history of the Manych depression], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, no. 3, pp. 77-88.

Linnik, V.G. (2018) *Landshaftnaya differentsiatsiya tekhnogennykh radionukleidov* [Landscape differentiation of technogenic radionuclides], GEOKHI RAN, Moscow, Russia, 372 p.

Makshaev, R.R., Tkach, N.T. (2023) Khronologiya khvalynskogo razvitiya Kaspiya po dannym radiouglerodnogo datirovaniya [Chronology of the Khvalynsk stage of the Caspian development based on radiocarbon dating], *Geomorfologiya i paleogeografiya*, vol. 54, no. 1, pp. 37-54, URL: <https://doi.org/10.31857/S0435428123010066>; <https://elibrary.ru/GQCYHO>.

Popov, G.I. (1967) Girkanskaya transgressiya v Severnom Prikaspii [Hyrceanian transgression in the Northern Caspian region], *Byull. Komis. po izuch. chetvertich. Period* [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period], no. 33, pp. 77-86.

Puzachenko, Yu.G., Dyakonov, K.N., Ivanov, A.N. (1997) Analiz iyerarkhicheskoy struktury rel'yefa kak osnova organizatsii prirodno-territorial'nogo kompleksa [Analysis of the hierarchical structure of relief as a basis for organizing a natural-territorial complex], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, no. 5, pp. 3-9.

Rychagov, G.I. (1993a) Urovenny rezhim Kaspiyskogo morya za posledniye 10 000 let [Geografiya, Caspian Sea level regime over the last 10 000 years], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5*, no. 2, pp. 38-49.

Rychagov, G.I. (1993b) Uroven Kaspiyskogo morya za istoricheskoe vremya [Caspian Sea level over historical time], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, no. 4, pp. 42-49.

Rychagov, G.I. (1994) Uroven Kaspiyskogo morya na rubezhe XVIII-XIX vekov [Caspian Sea level at the turn of the 18th-19th centuries], *Geomorfologiya*, no. 2, pp. 102-108.

Rychagov, G.I. (1997) *Pleystoosenovaya istoriya Kaspiyskogo morya* [Pleistocene history of the Caspian Sea], Moscow State University Publishing House, Moscow, Russia, 267 pp.

Rychagov, G.I. (2014) Khvalynskiy etap v istorii Kaspiyskogo moray [Khvalynsk stage in the history of the Caspian Sea], *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya*, no. 4, pp. 3-9.

Rychagov, G.I. (2016) Girkanskiy etap istorii Kaspiyskogo moray [Hyrceanian stage in the history of the Caspian Sea], *Geomorfologiya*, no. 1, pp. 3-17.

Svitoch, A.A., Yanina, T.A. (1997) *Chetvertyye otlozheniya poberezhnyy Kaspiyskogo moray* [Quaternary sediments of the coasts of the Caspian Sea], Russian Academy of Agricultural Sciences, Moscow, Russia, 267 p.

Sidorchuk, A.Yu. (2014) Fraktal'naya geometriya rechnykh setey [Fractal geometry of river networks], *Geomorfologiya*, no. 1, p. 3-14.

Sobol, S.V. (2019) *Fraktal'nyye parametry vodnykh ob'yektov* [Fractal parameters of water bodies], NNGASU, N. Novgorod, Russia, 232 p.

Feder, E. (1991) *Fraktaly* [Fractals], World, Moscow, Russia, 254 p.

Fedorov, P.V. (1978) *Pleystotsen Ponto-Kaspiya* [Pleistocene of the Ponto-Caspian Sea], Nauka, Moscow, Russia, 165 p.

Bashan, A., Bartsch, R., Kantelhardt, J.W., Havlin, S. (2008) Comparison of detrending methods for fluctuation analysis, *Physica A*, issue 387, pp. 5080-5090, available at: [10.1016/j.physa.2008.04.023](https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.04.023).

Franzke, C.L.E., Graves, T., Watkins, N.W., Gramacy, R.B., Hughes, C. (2012) Robustness of estimators of long-range dependence and self-similarity under non-Gaussianity, *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 370, pp. 1250-1267, available at: [10.1098/rsta.2011.0349](https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0349).

Hoogendoorn, R.M., Boels, J.F., Kroonenberg, S.B. et al. (2005) Development of the Kura delta, Azerbaijan; a record of Holocene Caspian sea level changes, *Marine Geology*, no. 222-223, pp. 359-380, available at: [10.1016/j.margeo.2005.06.007](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.06.007).

Hurst, H. (1951) Long-term storage capacity of reservoirs, *Trans. Am. Resour. Res.*, vol. 14, pp. 509-516.

Huybers, P.J., Curry, W. (2006) Links between annual, Milankovitch and continuum temperature variability, *Nature*, issue 441, pp. 329-332, available at: <https://doi.org/10.1038/nature04745>.

Kislov, A. (2016) The interpretation of secular Caspian Sea level records during the Holocene, *Quaternary International*, vol. 409, part A, pp. 39-43, available at: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.026>.

Krijgsman, W., Tesakov, A., Yanina, T. et al. (2019) Quaternary time scales for the Pontocaspian domain, interbasinal connectivity and faunal evolution, *Earth-Science Reviews*, no. 188, pp. 1-40, available at: [10.1016/j.earscirev.2018.10.013](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.10.013).

Kroonenberg, S.B., Abdurakhmanov, G.M., Aliyeva, E.G. et al. (2007) Solar-forced 2600 BP and Little Ice Age highstands of the Caspian Sea, *Quaternary International*, no. 173-174, pp. 137-143, available at: <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2007.03.010>.

Kurbanov, R.N., Murray, A.S., Yanina, T.A. et al. (2021) First optically stimulated luminescence ages of the Early Khvalynian Caspian sea transgression in the lower Volga, *Boreas*, vol. 50, issue 1, pp. 134-146, available at: [10.1111/bor.12478](https://doi.org/10.1111/bor.12478).

Lovejoy, S. (2019) *Weather, Macroweather and the Climate*, Oxford Univ. Press., 347 p.

Naderi Beni, A., Lahijani, H., Mousavi Harami, R. et al. (2013) Caspian sea-level changes during the last millennium, Historical and Geological evidence from the south Caspian Sea, *Clim. Past*, no. 9, pp. 1645-1665, available at: [10.5194/cp-9-1645-2013](https://doi.org/10.5194/cp-9-1645-2013).

Rychagov, G.I. (1997) Holocene oscillations of the Caspian Sea, the forecasts based on palaeogeographical reconstructions, *Quaternary International*, no. 41-42, pp. 167-172.

Schmittbuhl, J., Vilotte, J.-P., Roux, S. (1995) Reliability of self-affine measurements, *Phys. Rev. E*, vol. 51, pp. 131-147, available at: [10.1103/PhysRevE.51.131](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.131).

Sorokin, V.M., Yanina, T.A., Bezrodnykh, Y.P., Romanyuk, B.F. (2018) Identification and age of submarine Girkanian sediment beds (upper Pleistocene) in

the Caspian Sea, *Quaternary International*, vol. 465, part A, pp. 152-157, available at: 10.1016/j.quaint.2016.08.044.

Yanina, T.A. (2020) Environmental variability of the Ponto-Caspian and Mediterranean basins during the last climatic macrocycle, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 13, issue 4, pp. 6-23, available at: 10.24057/2071-9388-2020-120.

Yanina, T., Sorokin, V., Bezrodnykh, Yu., Romanyuk, B. (2018) Late Pleistocene climatic events reflected in the Caspian Sea geological history (based on drilling data), *Quaternary International*, vol. 465 (A), pp. 130-141, available at: 10.1016/j.quaint.2017.08.003.

Статья поступила в редакцию (Received): 21.06.2024;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 04.08.2024;

Принята к публикации (Accepted): 08.08.2024.

Для цитирования / For citation:

Кислов, А.В., Янина, Т.А. (2024) Проявление самоподобия в колебаниях уровня Каспийского моря, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 3, с. 439-455, doi:10.21513/2410-8758-2024-3-439-455.

Kislov, A.V., Yanina, T.A. (2024) Self-similarity in fluctuations in the level of the Caspian Sea, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 3, pp. 439-455, doi:10.21513/2410-8758-2024-3-439-455.