

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СКОРОСТИ ЗВУКА В ОКЕАНЕ

И.И. ГОРБАНЬ¹, И.О. ЯРОЩУК²

¹ *Институт проблем математических машин и систем
Национальной академии наук Украины
03187, Киев, пр. Глушкова, 42, Украина
Тел.: (+38-044) 526-70-22, Факс: (+38-044) 526-64-57
Эл. почта: igor.gorban@yahoo.com*

² *Учреждение Российской академии наук Тихоокеанский океанологический
институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия
Эл. почта: yaroshchuk@poi.dvo.ru*

На основе разработанной ранее методики измерения статистической устойчивости физических процессов и экспериментальных данных измерения температуры в прибрежной зоне Тихого океана проведена оценка статистической устойчивости колебаний температуры и скорости звука. Установлено, что колебания температуры в широкой полосе частот носят явно статистически неустойчивый характер, колебания температуры в узких полосах с периодами от 0,5 ч до 2 ч и более 10 ч также статистически неустойчивы. Статистически устойчивыми (а, следовательно, статистически прогнозируемыми) оказываются в некоторых случаях узкополосные колебания с периодом от 2 до 10 ч. Полученные результаты, касающиеся температуры, распространяются на скорость звука.

On the basis of methodology developed for measuring of statistical instability of physical processes and experimental temperature data obtained in the coastal zone of Pacific ocean it has been obtained estimation of statistical stability of temperature and sound velocity. It has been shown that fluctuations of temperature in wide frequency bands have statistically instable character; fluctuations of temperature in narrow frequency bands with periods from 0.5 to 2 hours and more 10 hours are statistically instable too. Statistically stable and therefore statistically predictable in some cases are narrow-band fluctuations with periods from 2 to 10 hours. Obtained results for temperature are spread to sound velocity.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованиям закономерностей различных процессов с целью прогноза их развития посвящено много работ. Исследования строятся на разных модельных представлениях об окружающем мире. Распространенным является стохастический подход, основанный на предположении об идеальной статистической устойчивости физических явлений.

Экспериментальные исследования на больших интервалах наблюдения процессов разной физической природы (в частности колебаний магнитного поля Земли, высоты и периода следования морских волн, температуры воздуха, количества осадков и др. [1–3]) указывают на то, что в реальном мире нет абсолютной статистической устойчивости. Исключение, возможно, могут представлять некоторые мировые константы, такие как скорость света, постоянная Планка и др.

В интересах адекватного описания реальных событий, величин, процессов и полей разработана физико-математическая теория гиперслучайных явлений [4, 5], учитывающая ограниченный характер статистической устойчивости физических

явлений. Из новой теории следует, что точность прогноза ограничена интервалом статистической устойчивости.

Целью настоящего доклада является изложение результатов экспериментальных исследований статистической устойчивости колебаний температуры воды и скорости звука в океане.

ПАРАМЕТРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ НАРУШЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

По определению [1, 5] последовательность X_1, X_2, \dots случайных величин (случайная выборка) считается статистически устойчивой (статистически стабильной), если при устремлении объема выборки N к бесконечности математическое ожидание выборочной дисперсии $\bar{D}_{Y_N} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (Y_n - \bar{m}_{Y_N})^2$ флуктуации выборочного среднего

$Y_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ($n = \overline{1, N}$) стремится к нулю, где $\bar{m}_{Y_N} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_n$ – выборочное среднее флуктуации среднего. Последовательности, не удовлетворяющие этому условию, – статистически неустойчивы.

Процесс обычно описывается последовательностью значений в фиксированные моменты времени, поэтому, говоря о процессах, будем отождествлять их с соответствующими последовательностями.

Заметим, что понятия стационарности и статистической устойчивости – разные понятия.

Безусловно, по результатам наблюдения процесса на конечном интервале, невозможно точно установить факт нарушения статистической устойчивости. Однако можно количественно оценить степень флуктуации выборочного среднего в фиксированные моменты времени и, анализируя динамику происходящих изменений, выявить некоторые тенденции, ведущие к нарушению статистической устойчивости.

Такие тенденции характеризует предложенный в работе [1] параметр статистической неустойчивости γ_N , представляющий собой математическое ожидание выборочной дисперсии \bar{D}_{Y_N} , нормированное на дисперсию выборочного среднего

$D_{Y_N} = \frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N D_{x_n}$ и объем выборки N : $\gamma_N = \frac{M[\bar{D}_{Y_N}]}{ND_{Y_N}}$, где $M[\cdot]$ – оператор

математического ожидания, D_{x_n} – дисперсия случайной величины X_n .

Другим параметром статистической неустойчивости является параметр μ_N [2], связанный с параметром γ_N соотношением $\mu_N = \sqrt{\gamma_N / (1 + \gamma_N)}$. В отличие от параметра γ_N , ограниченного лишь снизу нулевым значением, параметр μ_N ограничен как снизу, так и сверху: минимально возможное его значение равно нулю, а максимально возможное – единице.

В качестве единицы измерения статистической неустойчивости параметра γ_N при фиксированном N предложена [3] величина γ_{0N} , рассчитываемая для идеальной статистически устойчивой последовательности N некоррелированных отсчетов с постоянной дисперсией $D_{x_n} = D_x$ и нулевым математическим ожиданием. Параметром

статистической неустойчивости является также параметр $h_N = \gamma_N / \gamma_{0N}$ [3], диапазон изменения которого $[0, \infty)$.

Наиболее информативными из перечисленных параметров являются параметры h_N и μ_N , используемые в дальнейшем.

В работе [6] установлено, что форма спектр мощности определяет статистическую устойчивость процесса. Показано, что при изменении спектра по закону $1/f^\beta$, где f – частота, а параметр $\beta \leq 1$, процесс оказывается устойчивым. Если же параметр $\beta > 1$, то процесс статистически неустойчивый.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ И СКОРОСТИ ЗВУКА В ОКЕАНЕ

Измерения температуры воды в океане проводились ТОИ ДВО РАН в период с 23.10.2010 по 11.05.2011 в заливе Посьета с помощью двух пар термодатчиков (1, 2 и 3, 4), разнесенных на расстояние 3,6 км. Глубина места постановки первой пары – 41,5 м, второй – 42 м. Первые датчики каждой пары находились на глубине 10 м, а вторые – на глубине 20 м от дна. Снятие данных осуществлялась с интервалом 15 мин. В итоге за 197 дней наблюдения (4730 ч) было получено $K = 18920$ результатов измерения. Чувствительность датчиков – $0,025^\circ\text{C}$. Представление о динамике изменения температуры дают рис. 1 *а*, *б*, на которых приведены наложенные друг на друга кривые колебаний температуры для четырех термодатчиков. Кривые на рис. 1 *а* получены без какой-либо предварительной обработки, а на рис. 1 *б* – с предварительной фильтрацией колебаний, обеспечивающей отбрасывание четырех низкочастотных спектральных составляющих.

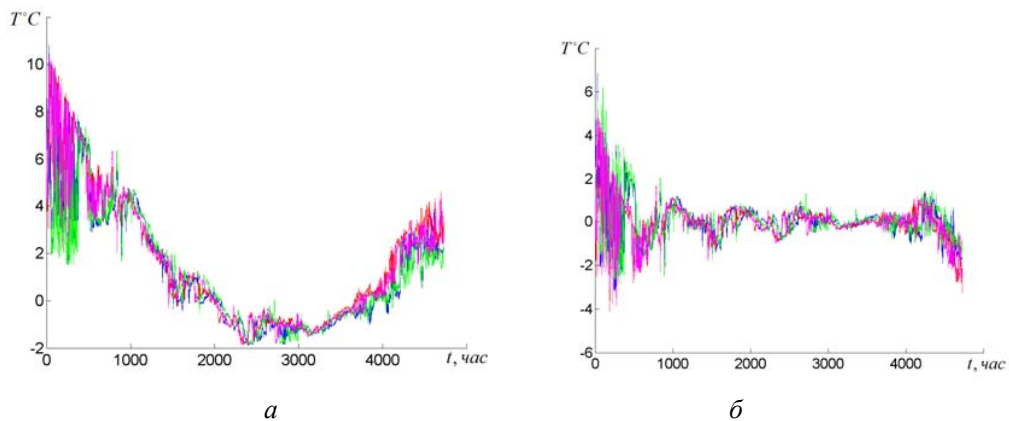


Рис. 1

Мгновенные спектры в децибелах как функции номера спектрального отсчета приведены на рис. 2 (извилистые линии) для всех четырех термодатчиков. Пучок прямых представляет сдвинутые вдоль оси ординат на 100 дБ степенной функции $1/k^\beta$, где k – номер спектрального отсчета, а параметр $\beta = 1,5$. С увеличением β толщина линий возрастает. Разрешение по частоте – $58,7 \cdot 10^{-9}$ Гц.

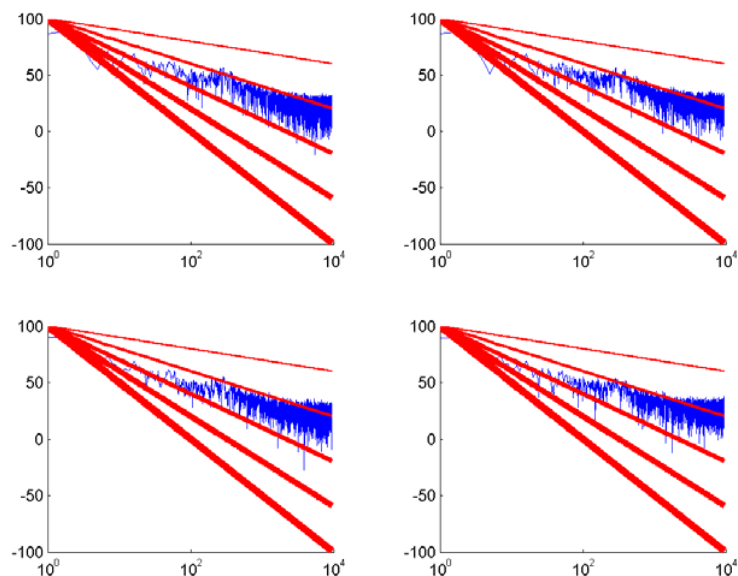


Рис. 2

Из рисунка видно, что в области низких частот спадание спектра с частотой хорошо аппроксимируется степенной функцией с параметром β , практически везде превосходящим единицу. Это обстоятельство указывает на статистическую неустойчивость процесса.

Результаты расчетов параметров статистической неустойчивости h_N и μ_N представлены соответственно на рис. 3 а, 4 а и 3 б, 4 б. Сплошными кривыми изображены зависимости этих параметров от времени t в часах. Толщина линий возрастает с увеличением номера датчика. Пунктирными линиями изображены значения параметров для идеальной статистически устойчивой последовательности, а штрихпунктирными – односигмовые отклонения от эталонных кривых. Рис. 3 получен для исходных данных, а рис. 4 – для данных, подвергнувшихся предварительной низкочастотной фильтрации с отбрасыванием первых четырех спектральных отсчетов.

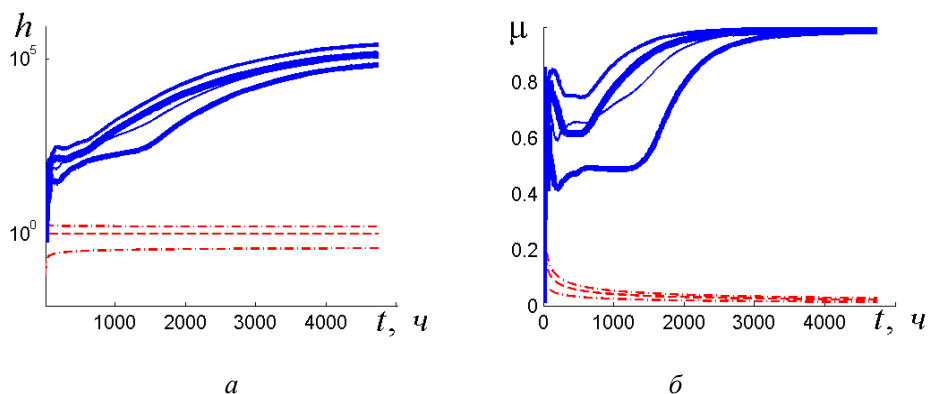


Рис. 3

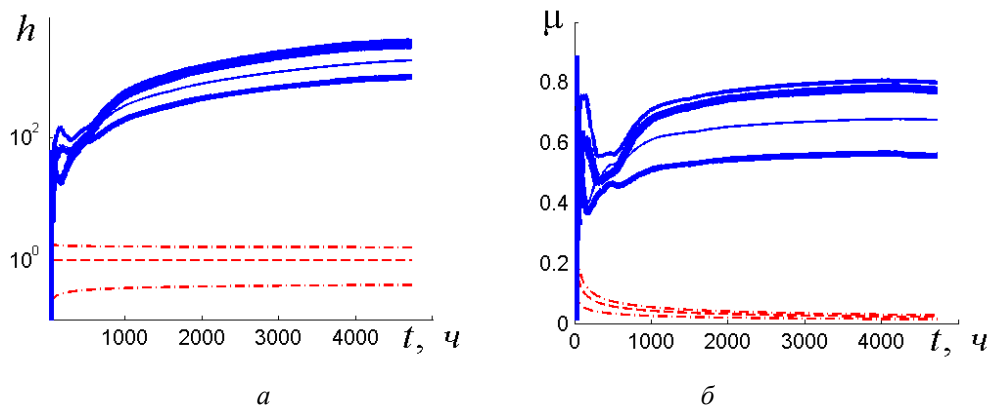


Рис. 4

Как видно из рисунков, исходные процессы статистически неустойчивы на всем интервале наблюдения. Это можно объяснить наличием мощной детерминированной низкочастотной составляющей спектра колебаний, связанной с сезонным изменением температуры. Исключение низкочастотных составляющих повышает устойчивость, однако не меняет статистически неустойчивый характер колебаний.

Исследования колебаний температуры в третьоктавных и четвертьоктавных полосах частот, показали, что колебания с периодом от 0,5 ч до 2 ч и более 10 ч статистически неустойчивые. Статистически устойчивыми на исследованном интервале времени оказались некоторые (но не все) узкополосные колебания со средними периодами от 2 до 10 ч. Результаты расчета параметров h_N и μ_N для одного из таких колебаний (средний его период равен примерно 5 ч) приведены соответственно на рис. 5 а и 5 б.

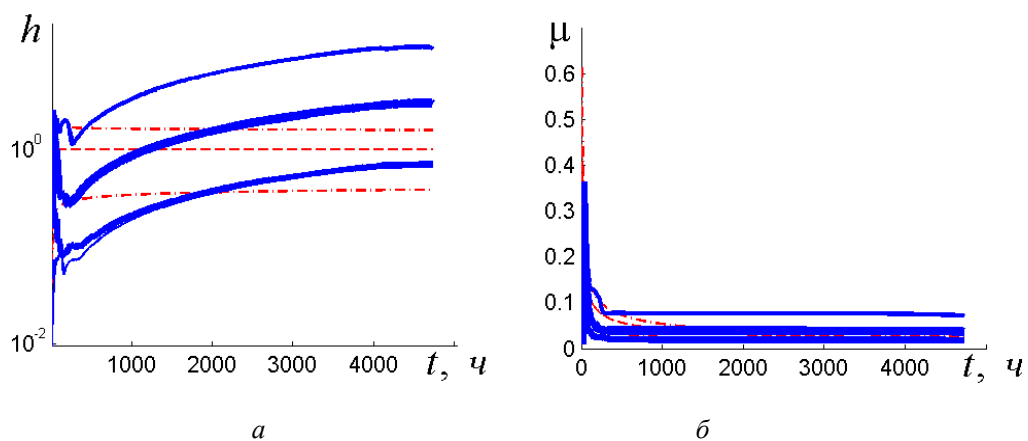


Рис. 5

Как известно, скорость звука в воде зависит от температуры, давления и солености. Основным среди этих параметров является температура. Поэтому статистически неустойчивые колебания температуры естественно порождают статистически неустойчивые колебания скорости звука. Расчеты показывают, что зависимости параметров неустойчивости для скорости звука практически не отличаются от аналогичных зависимостей для температуры, представленных на рис. 3.

ВЫВОДЫ

Результаты обработки полученных экспериментальных данных указывают на то, что на большом интервале наблюдения

- колебания температуры в широкой полосе частот носят явно статистически неустойчивый характер;
- колебания температуры в узких полосах с периодами от 0,5 ч до 2 ч и более 10 ч статистически неустойчивые;
- статистически устойчивыми в некоторых случаях являются узкополосные колебания с периодом от 2 до 10 ч;
- статистически неустойчивые колебания температуры порождают статистически неустойчивые колебания скорости звука.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбань И.И. Нарушение статистической устойчивости физических процессов // Математические машины и системы. – 2010. – № 1. – С. 171 – 184.
2. Gorban I.I. Disturbance of statistical stability // Information Models of Knowledge. – Kiev – Sofia: ITHEA. – 2010. – P. 398 – 410.
3. Горбань И.И. Статистическая неустойчивость физических процессов // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – (в печати).
4. Горбань И.И. Теория гиперслучайных явлений. К.: ИПММС НАН Украины, 2007. – 184 с. – ISBN 978-966-02-4367-5. – <http://ifsc.uair.edu/jdberleant/intprob/>.
5. Горбань И.И. Теория гиперслучайных явлений: физические и математические основы. – К.: Наукова думка, 2011. – 320 с. – ISBN 978-966-00-1093-2.
6. Горбань И.И. Статистическая устойчивость фликкер-шумов // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – (в печати).