

УДК 519.2: 530.1:551.465: 600.1

© **И.И. Горбань**¹, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник,
И.О. Ярошук², д.ф.-м.н., с.н.с., заведующий лабораторией «статистической гидроакустики»

¹Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев (Украина)

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного
отделения РАН, г. Владивосток (Российская Федерация)

О СТАТИСТИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕБАНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТИХОМ ОКЕАНЕ

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 воды. 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.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА ВОДЫ,
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, ЧАСТОТА, КОЛЕБАНИЯ, СКОРОСТЬ ЗВУКА

1. Введение

Изучению закономерностей процессов, протекающих в океане, посвящено много работ. При этом используются различные подходы, среди которых особое место занимает стохастический подход [1-3], основанный на предположении об идеальной статистической устойчивости физических явлений [4].

Экспериментальные исследования процессов разной физической природы, проведенные на больших интервалах наблюдения, выявили [4-7] существенные нарушения статистической устойчивости, ограничивающие возможности применения классических стохастических моделей.

Целью статьи является оценка статистической устойчивости колебаний температуры в океане, определяющих динамику многих океанологических процессов.

2. Параметры статистической неустойчивости

По определению [4, 5] последовательность X_1, X_2, \dots случайных величин (случайная выборка) считается статистически устойчивой (статистически стабильной), если при устремлении ее объема 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:

$$Y_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (n = \overline{1, N})$$

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.

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 [5] 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 [6], 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 может выступать величина γ_{0N} [7], представляющая собой параметр γ_N , рассчитанный для идеальной статистически устойчивой последовательности N некоррелированных отсчетов с постоянной дисперсией $D_{x_n} = D_x$ и нулевым математическим

ожиданием. Поэтому параметром статистической неустойчивости является также параметр [7]:

$$h_N = \gamma_N / \gamma_{0N},$$

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 спектра мощности определяет статистическую устойчивость процесса, и показано, что процесс устойчив при изменении спектра по закону $1/f^\beta$, где f – частота β , а параметр $\beta < 1$. Если же параметр $\beta \geq 1$, то процесс статистически неустойчив.

3. Результаты обработки экспериментальных данных

Измерения температуры воды в океане проводились Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН) в период с 23.10.2010 г. по 11.05.2011 г. в заливе Посьета с помощью двух пар термодатчиков, разнесенных на расстояние 3,6 км (рис. 1).

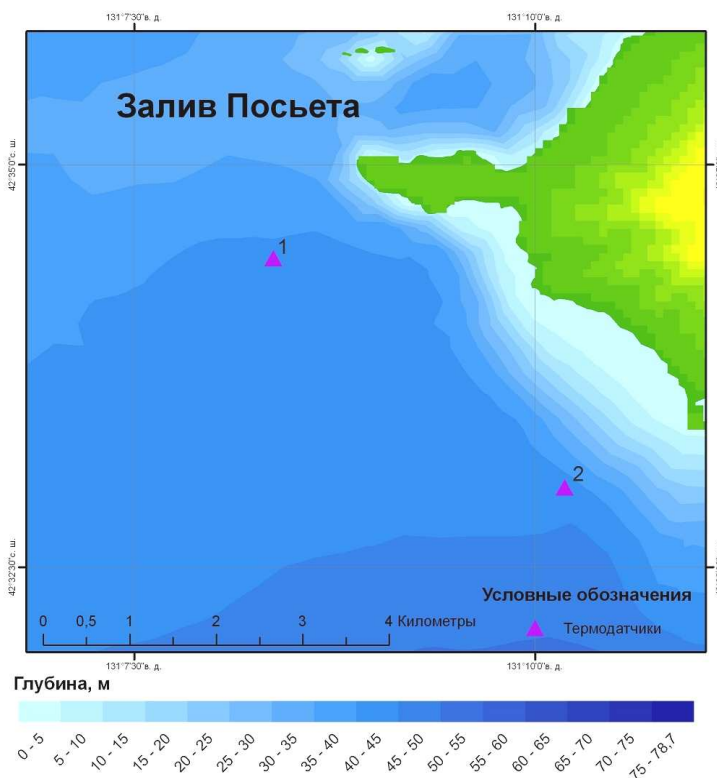


Рис. 1 - Место постановки термодатчиков

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 осуществлялось 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. 2 а, б, на которых приведены наложенные друг на друга кривые колебаний температуры для четырех термодатчиков. Кривые на рис. 2 а получены без какой-либо предварительной обработки, а на рис. 2 б – с предварительной фильтрацией колебаний, обеспечивающей отбрасывание четырех низкочастотных спектральных составляющих.

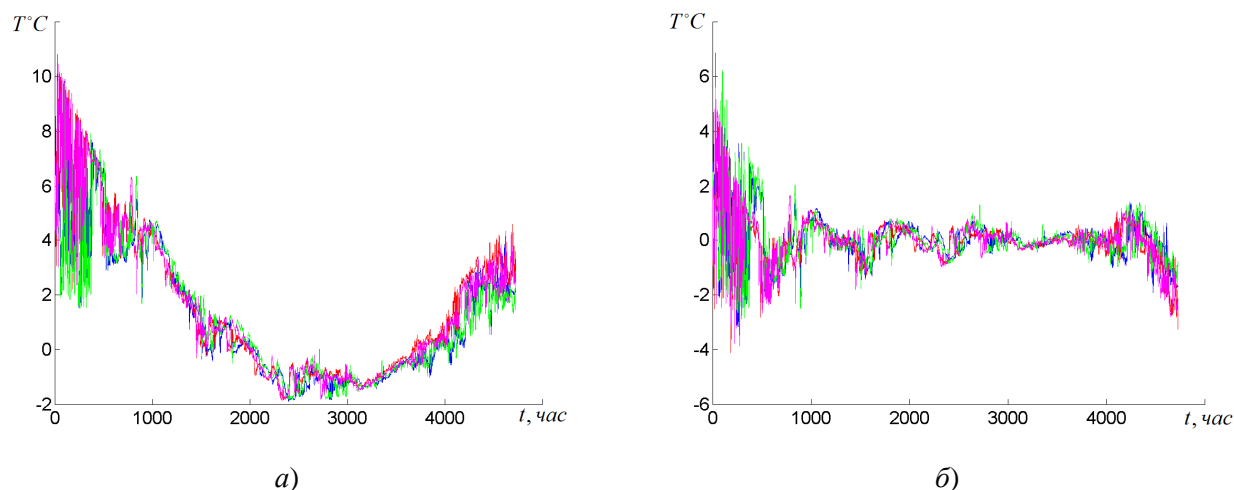


Рис. 2 - Изменение температуры воды во времени при отсутствии (а) и наличии (б) низкочастотной фильтрации

Мгновенные спектры в децибелах, как функции номера спектрального отсчета, приведены на рис. 3 (извилистые линии) для всех четырех термодатчиков.

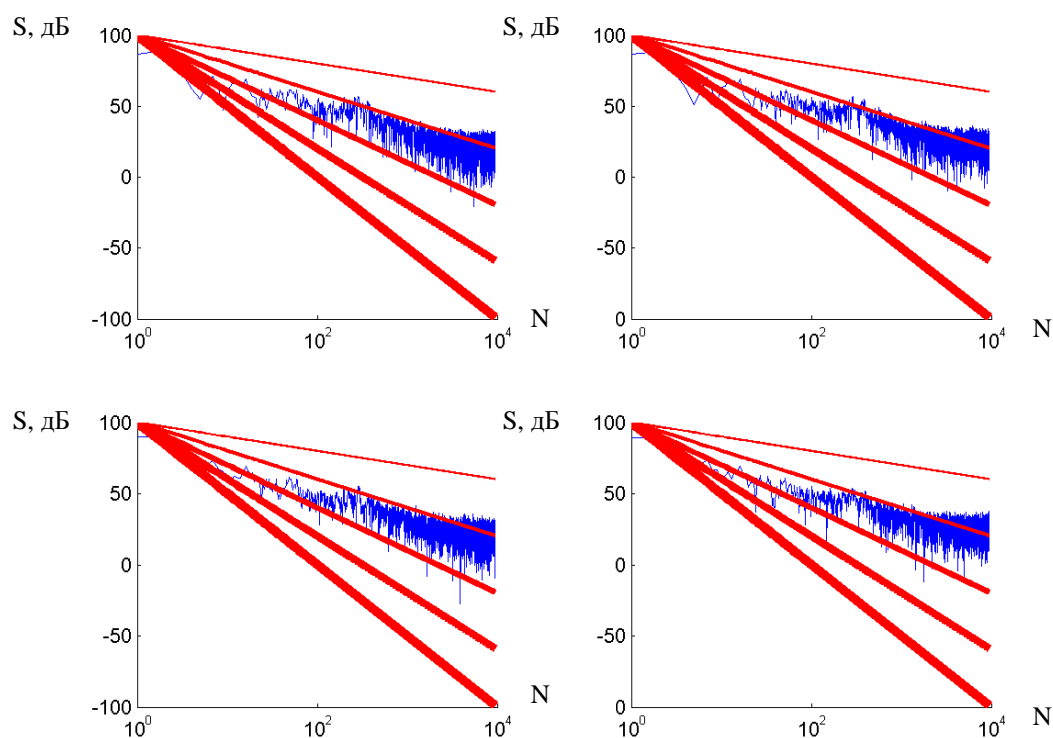


Рис. 3 - Спектры колебаний температуры воды

Пучок прямых представляет сдвинутые вдоль оси ординат на 100 дБ значения степенной функции $1/k^\beta$, где k – номер спектрального отсчета, а параметр $\beta = \overline{1,5}$. С увеличением β толщина линий возрастает. Разрешение по частоте – $58,7 \cdot 10^{-9}$ Гц.

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. 4 а, 5 а и 4 б, 5 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. 4 получен для исходных данных, а рис. 5 – для данных, подвергнувшихся предварительной низкочастотной фильтрации с отбрасыванием первых четырех спектральных отсчетов.

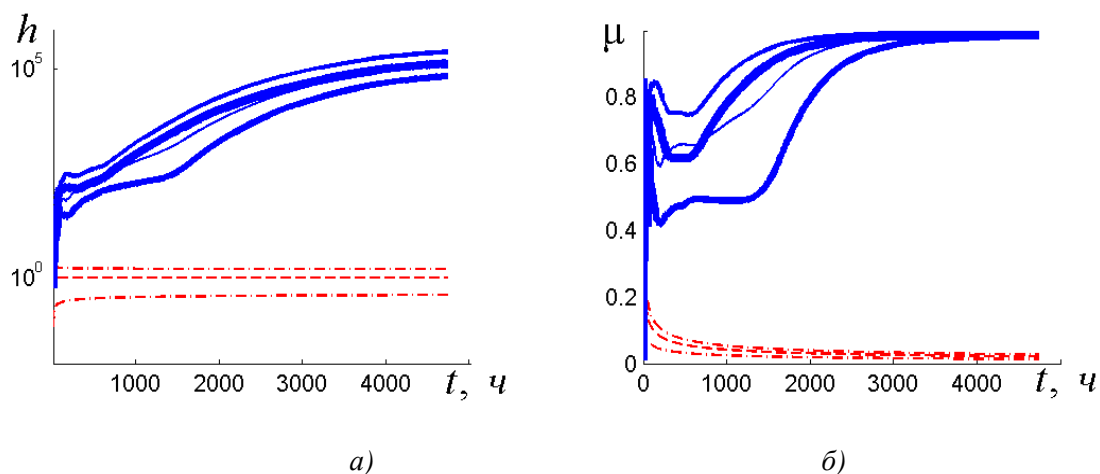


Рис. 4 - Параметры статистической неустойчивости колебаний температуры воды в широком диапазоне частот: h_N (а) и μ_N (б)

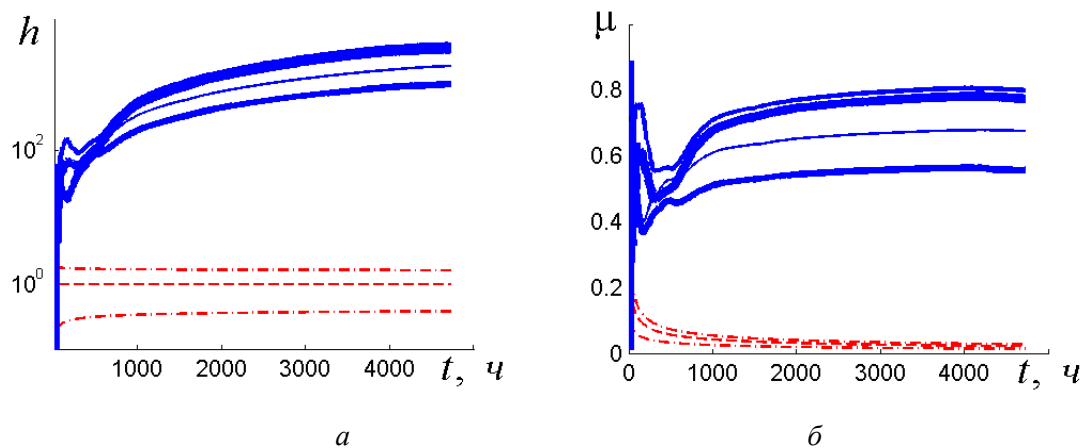


Рис. 5 - Параметры статистической неустойчивости колебаний температуры воды в широком диапазоне частот при наличии низкочастотной фильтрации колебаний: h_N (а) и μ_N (б)

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. 6 а и 6 б.

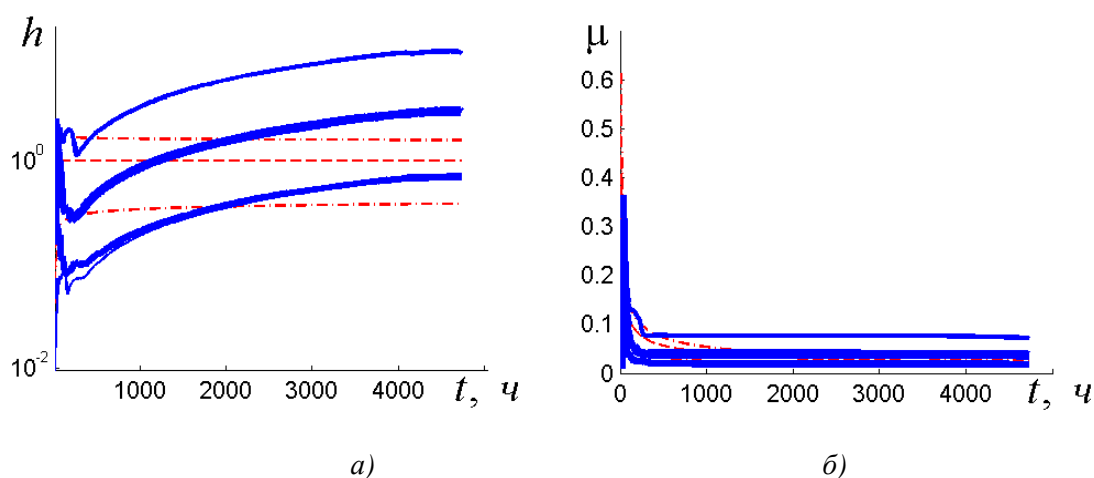


Рис. 6 - Параметры статистической неустойчивости колебаний температуры воды в узкой полосе частот: h_N (а) и μ_N (б)

Как известно, скорость звука в воде зависит от температуры, давления и солености. Определяющим параметром среди них 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 в широком диапазоне частот при отсутствии коррекции сезонных изменений.

4. Выводы

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

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

Авторы выражают признательность В.В. Новотрясову за экспериментальные данные, предоставленные для проведения исследований. Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 12-05-00715а.

Литература

1. Каменкович В.М. Физика океана / В.М. Каменкович, А.С. Монин. - М.: Наука. 1978. Т.2. 455 с.
2. Монин А.С. Океанская турбулентность / Монин А.С., Озмидов Р.В. - Л.: Гидрометеоздат, 1981. - 320 с.
3. Распространение звука во флуктуирующем океане / [Р. Дашен, Ф. Захариасен, У.Г. Манк, К.М. Уотсон]; Под ред. С. Флатте. - М.: Мир, 1982. - 336с.
4. Горбань И.И. Теория гиперслучайных явлений: физические и математические основы / Горбань И.И. - К.: Наукова думка, 2011. - 320 с.
5. Горбань И.И. Нарушение статистической устойчивости физических процессов / Горбань И.И. // Математические машины и системы. - 2010. - № 1. - С. 171 - 184.
6. Gorban I.I. Disturbance of statistical stability / Gorban I.I.// In book Information Models of Knowledge. - Kiev - Sofia: ITNEA. - 2010. - P. 398 - 410.
7. Горбань И.И. Статистическая неустойчивость физических процессов / Горбань И.И. // Известия вузов. Радиоэлектроника. - 2011. - № 9 - С. 40 - 52.
8. Горбань И.И. Статистически неустойчивые процессы: связь с фликкер, неравновесными, фрактальными и цветными шумами / Горбань И.И. // Известия вузов. Радиоэлектроника. - 2012. - Т. 55, № 3 - С. 3 - 18.

Стаття надійшла до редакції 24 квітня 2012 р. російською мовою

© И.И. Горбань, И.О. Ярошук
ПРО СТАТИСТИЧНУ НЕСТІЙКІСТЬ
КОЛИВАНЬ ТЕМПЕРАТУРИ В ТИХОМУ ОКЕАНІ

На основі розробленої раніш методики вимірювання статистичної стійкості фізичних процесів та експериментальних даних вимірювання температури у прибережній зоні Тихого океану проведено оцінку статистичної стійкості коливань температури води. Встановлено, що коливання температури у широкій смузі частот носять виражений нестійкий характер, коливання температури у вузьких смугах з періодом від 0,5 до 2 годин й більше 10 годин також статистично нестійкі. Статистично стійкими (а тому й прогнозованими) з'являються в деяких випадках вузькосмугові коливання з періодом від 2 до 10 годин. Отримані результати розповсюджені на швидкість звуку.

© Igor I. Gorban, Igor O. Yaroshuk
ON THE STATISTICAL INSTABILITY OF TEMPERATURE
FLUCTUATION IN THE PACIFIC OCEAN

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 water temperature. 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. Results for temperature are spread to sound velocity.