

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1968

УДК 532.507:551.465

Н. К. ШЕЛКОВНИКОВ, С. Ф. МИРКОТАН, Г. Г. ХУНДЖУА

## МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В МОРЕ

Описан метод экспериментального исследования геометрии турбулентных неоднородностей температурного поля в море. Приведен корреляционный анализ в применении к данным условиям. Описана новая электронная аппаратура для непрерывной и синхронной регистрации пульсаций температуры в четырех пространственно-разнесенных точках в море, с чувствительностью к пульсациям температуры порядка  $0,001^{\circ}\text{C}$ .

В качестве чувствительного элемента в схеме использован термистор МТ-54. Приведен образец синхронной записи пульсаций температуры в четырех точках в море.

Турбулентное движение в море оказывает существенное влияние на характер переноса количества движения, содержание тепла и вещества и является одним из определенных факторов в формировании температурной и плотностной стратификации морских вод.

Целый ряд задач динамики и термики океана требует для своего решения знаний полей турбулентных флуктуаций солёности, температуры и скорости течения. Статистическая обработка отдельных реализаций случайных пульсаций указанных элементов позволяет получить прямым методом такие важные характеристики турбулентности, как коэффициенты турбулентной вязкости, температуроводности и диффузии. Однако для более глубокого изучения механизма турбулентного движения необходимо более детальное изучение строения, геометрических размеров и времени жизни турбулентных образований. Исследования в этом направлении будут полезными и в изучении вопросов механизма турбулентного переноса.

В настоящей работе описаны аппаратура и метод корреляционного анализа, позволяющие исследовать геометрию и динамику турбулентных образований. Метод объёмного корреляционного анализа для исследования ионосферы изложен в работах [1, 2, 3].

Сущность метода сводится к следующему. Пусть  $f(x, y, z, t)$  — случайная функция исследуемого турбулентного поля температуры (или других гидрологических элементов) в море. Если процесс стационарный во времени и однородный в пространстве, то некоторые характеристики движения и геометрии турбулентных образований можно получить, зная обобщенную корреляционную функцию

$$\rho(\xi, \eta, \zeta, \tau) = \frac{\overline{f(x-\xi, y-\eta, z-\zeta, t-\tau)f(x, y, z, t)} - \overline{f(x, y, z, t)}^2}{\overline{f(x, y, z, t)}^2 - \overline{f(x, y, z, t)}^2}, \quad (1)$$

где черта означает статистическое осреднение, а  $\xi, \eta, \zeta$  и  $\tau$  — некоторые смещения вдоль координатных осей  $x, y, z$  и  $t$ . Из определения свойств функции корреляции следует, что в достаточно малой окрестности точки  $\xi = \eta = \zeta = \tau = 0$  функция корреляции может быть представлена [2] в виде

$$\rho = \rho(u) = \rho(a_{11}\xi^2 + a_{22}\eta^2 + a_{33}\zeta^2 + a_{44}\tau^2 + 2a_{12}\xi\eta + a_{13}\xi\zeta + 2a_{23}\eta\zeta + 2a_{14}\xi\tau + 2a_{24}\eta\tau + 2a_{34}\zeta\tau). \quad (2)$$

Квадратичная форма  $u = \text{const}$  описывает уровни равной корреляции. В системе координат, совпадающей с главными направлениями  $(\xi_0, \eta_0, \zeta_0)$ , выражение  $u = \text{const}$  принимает канонический вид

$$\frac{(\xi_0 - V_{x_0}\tau)^2}{a^2} + \frac{(\eta_0 - V_{y_0}\tau)^2}{b^2} + \frac{(\zeta_0 - V_{z_0}\tau)^2}{d^2} + \frac{\tau^2}{\tau_c^2} = 1, \quad (3)$$

где  $V_x, V_y, V_z$  — компоненты скорости дрейфа  $V_{др}$  в главной системе координат  $(\xi, \eta_0, \zeta_0)$ . При  $\tau = 0$  выражение (3) описывает эллипсоид, характеризующий среднюю форму температурной неоднородности и величину главных осей этого эллипсоида  $a, b, d$ . Параметр  $\tau_c$  — время релаксации температурной неоднородности.

Коэффициенты в выражении (2) ( $a_{11}, a_{12}, \dots$ ) однозначно связаны с параметрами  $V, a, b, d, \tau_c$  и направляющими косинусами главных осей.

Для определения неизвестных  $a_{ij}$  (соответственно  $V_x, V_y, V_z, a, b, d$  и т. д.) необходимо задать достаточное число сечений  $u = \text{const}$ , в результате получим систему уравнений, решение которых дает параметры размеров и движения неоднородностей.

Если в среде зафиксированы четыре не лежащие в одной плоскости точки  $0, A, B, C$  и в них регистрируются временные флуктуации параметра  $f(t)$ , и вычислены шесть функций взаимной корреляции

$$\begin{aligned} \rho_{0A}(\tau), \quad \rho_{AB}(\tau), \\ \rho_{0B}(\tau), \quad \rho_{AC}(\tau), \\ \rho_{0C}(\tau), \quad \rho_{BC}(\tau) \end{aligned}$$

и одна из автокоррелятивных функций, например  $\rho_{AA}(\tau)$ , то с помощью известной методики [2] могут быть рассчитаны параметры дрейфа  $V_x, V_y, V_z$ ; форма и размер неоднородности ( $a, b, d$ ) и их ориентация, хаотическая изменчивость неоднородностей.

В данной статье разработана аппаратура, позволяющая с необходимой точностью получать отдельные реализации турбулентных флуктуаций температуры в море в четырех пространственно разнесенных точках и также получать некоторые характеристики турбулентных неоднородностей в море (динамики, геометрии) с помощью применения объемного корреляционного анализа. При этом измерительная база должна жестко связывать все четыре точки, в которых находятся датчики, кроме того, при измерениях степень стабилизации всей системы в пространстве определяется значением  $D(f_H)$  и  $D(f)$ . Критерием достаточности является неравенство [4]

$$\frac{D(f_H)}{D(f)} \ll 1,$$

где  $D(f_H)$  — дисперсия флуктуаций, зарегистрированных датчиками в  $O, A, B, C$  за счет движения координатной системы, а  $D(f)$  — дисперсия исследуемой величины. Расстояние между датчиками ( $OA, OB, BC$ ) назовем базами измерительной системы. Выбор базы определяется выражением [5]

$$\Delta_{\min} \ll \Delta \ll \Delta_{\max},$$

где  $\Delta_{\min}$  и  $\Delta_{\max}$  — некоторые минимальные и максимальные размеры турбулентностей, которые могут быть обнаружены системой с определенной степенью точности. Так, если ограничиться точностью  $\sim 10\%$ , то оценка будет:

$$0,3S \ll \Delta \ll (4-5), \quad S = OA = OB = OC.$$

Так, для  $S = 1 \text{ м}$   $30 \text{ см} \ll \Delta \ll (4-5) \text{ м}$ .

При записи непрерывных случайных процессов мерой достаточности объема статистики (длительность сеанса наблюдения) является временной радиус корреляции  $\rho(\tau_0) = 0,5$ . Таким образом,  $N \sim \frac{T}{\tau_0}$ , где  $T$  — длительность сеанса наблюдения,  $N$  — объем выборки [6]. Ограниченность  $T$  приводит к погрешности в определении значений функции  $\rho(\tau)$ .

Как известно, для распределений, близких к нормальному закону, дисперсия  $\sigma_\rho$  функции корреляции определяется следующим выражением:

$$\sigma_\rho \approx \frac{1 - \rho^2}{\sqrt{\frac{T}{\tau}}} \quad (4)$$

Полагая точность измерения пульсаций температуры не хуже  $10\%$  и ограничиваясь значениями  $\rho \geq 0,5$ , из (4) получим в наших исследованиях длительность сеанса порядка ста радиусов корреляции, т. е.  $T \geq 100 \tau_0$ .

Определенные меры должны быть приняты для обеспечения стационарности статистики, которую мы принимаем как независимость средних характеристик от времени. Даже для стационарного процесса ограниченность  $N$  может быть причиной нестационарности. Так, если мы исследуем быстрые вариации, а процесс содержит еще медленно меняющиеся составляющие, то статистика быстрых вариаций будет нестационарной из-за наличия медленных. При этом принимаются меры, чтобы дисперсия медленных и быстрых вариаций находилась в отношении  $\frac{D_{\text{медл}}}{D_{\text{быстр}}} \ll 1$ . При выполнении этого условия медленные вариации могут быть отделены от быстрых методом скользящего среднего.

Некоторые требования накладываются и на размеры датчиков так, чтобы записи носили локальный характер, их геометрические или эффективные размеры должны удовлетворять условию  $r_d \ll S$ , где  $r_d$  — некоторый эффективный размер датчика (точнее радиус сферы, окружающий датчик, за пределами которой сам датчик не возмущает среду),  $S$  — база. При  $r_d = 1 \text{ мм}$  минимальное расстояние между датчиками должно быть  $\sim 10 \text{ см}$ .

В 1965—1966 гг. на кафедре физики моря и вод суши была разработана и создана электронная аппаратура для непрерывной и одно-

временной регистрации турбулентных флуктуаций температуры в деятельном слое моря в четырех пространственно-разнесенных точках.

На рис. 1 приведена электронная часть измерительного прибора. Прибор состоит из следующих блоков: 1 — задающего генератора звуковой частоты, 2 — измерительного моста, 3 — усилителя низкой частоты с фазопережающей  $RC$ -цепочкой, 4 — фазового детектора, 5 — регистрирующего устройства, 6 — блока питания всей аппаратуры (блоки 5 и 6 на этом рисунке не показаны).

Блоки питания, управления и регистрации при работе на судне размещались в судовой лаборатории. Все остальные блоки были заклю-

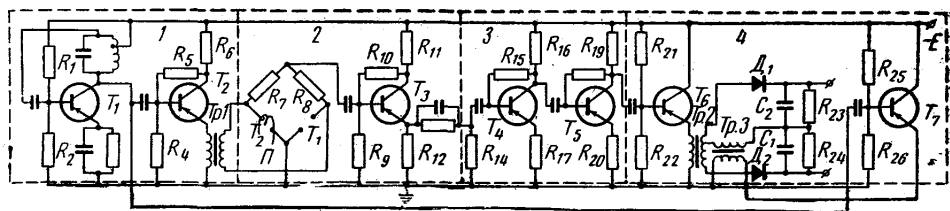


Рис. 1. Электронная часть одного из каналов регистрации турбулентных пульсаций температуры

чены в стальные контейнеры и при работе опускались на заданную глубину. Связь между контейнерами и лабораторной аппаратурой осуществлялась при помощи морского многожильного кабеля РШМ-19.

Измерительный мост питается от генератора 1, собранного по схеме  $LC$  на транзисторе  $T_1$ .

Нестабильность генератора по амплитуде в течение одного сеанса составляет 1%, а нестабильность по частоте составляет менее 1%.

Измерительным мостом служит уравновешенный равноплечий мост переменного тока с терморегулировкой. Разрешающая способность моста составляет  $\Delta\theta/\theta = 10^{-5}$ . Два плеча моста — резисторы,  $R_7$  и  $R_8$ , два других — термисторы, один из которых  $T_1$  выносится в среду и используется как датчик температурных флуктуаций, а другой  $T_2$  — для терморегулировки. Терморегулировка осуществляется путем подогрева термистора печкой (П).

Ток печки и степень разбаланса моста контролируются приборами, расположенными на передней панели пульта управления.

При работе аппаратуры сигнал разбаланса с моста подается на усилитель, собранный на  $T_3$  и  $T_4$  по  $RC$ -схеме. Усиленный сигнал с блока 3 подается на фазовый детектор, опорный сигнал подается на фазовый детектор с генератора через эмитерный повторитель. Выходной сигнал регистрируется шлейфовым осциллографом Н-700 или при включении дополнительного блока двумя магнитофонами «Яуза-10».

В связи с требованиями, предъявляемыми к аппаратуре для регистраций турбулентных пульсаций, рассмотрим элементы схемы, влияющие на точность и надежность работы приборов.

Коэффициент усиления по напряжению двухкаскадного резистивного усилителя составляет 60 дБ и имеет линейную характеристику усиления. Динамический диапазон достаточен для записи сигнала по всей ширине ленты регистрирующего осциллографа. Чувствительность прибора к относительным изменениям температуры составила 0,001°.

Чувствительным элементом для регистрации турбулентных пульсаций температуры в разработанной аппаратуре применяется термистор.

Как известно, величина сопротивления термистора изменяется от температуры по закону  $R = Ae^{\frac{a}{T}}$ , где  $A$  и  $a$  — постоянные данного термистора,  $T$  — абсолютная температура.

Применение термистора обусловлено большим значением коэффициента термосопротивления, малыми геометрическими размерами (диаметр чувствительной головки термистора 1 мм) и относительно малой тепловой инерцией, равной 0,1 сек. Что касается нелинейности характеристики, то при записи пульсаций температуры с амплитудой порядка 0,01° искажения из-за нелинейности датчиков ниже точности измерения пульсаций температуры.

При изучении турбулентных пульсаций в море особую значимость приобретает тепловая инерция датчика. Рассмотрим вопросы тепловой инерции термистора. В стационарном состоянии теплообмен между датчиком и средой описывается уравнением

$$\frac{d\Theta_T}{dt} = -\frac{hS}{mS}(\Theta_T - \Theta_c), \quad (5)$$

здесь  $\Theta_T$  и  $\Theta_c$  — температура термистора и среды,  $h$  — коэффициент теплообмена,  $S$  — поверхность термистора, а тепловую инерцию термистора обозначим  $T = \frac{mc}{hS}$ .

Для анализа переходных процессов применим метод фазочастотных характеристик [7]. Преобразование Лапласа для (5) дает

$$W(S) = \frac{\Theta_T(S)}{\Theta_c(S)} = \frac{1}{TS - 1}$$

Полученное соотношение есть выражение для передаточной функции термистора. Учитывая зависимость сопротивления термистора от температуры, получим

$$W(S) = \frac{\Delta R}{\Theta_c(S)} = \frac{k_1}{TS + 1}, \quad (6)$$

где

$$k_1 = \frac{\Delta R(S)}{\Theta_T(S)} = \alpha R_0.$$

Из (6) получим выражение для модуля амплитудночастотной характеристики

$$A(\Omega) = W(j\Omega) = \frac{k_1}{\sqrt{1 + \Omega^2 T^2}}, \quad (7)$$

а для фазочастотной характеристики:

$$\varphi(\Omega) = \text{arctg } \Omega T. \quad (8)$$

На рис. 2 приведен график для модуля амплитудночастотной характеристики. Из графика видно, что минимум амплитудных и фазовых искажений будет при работе датчика в интервале частот, изменяющихся от нуля до сопряженной частоты  $f_c$ .

Численный расчет показывает, что при точности измерения температурных пульсаций среды порядка 10% полоса пропускания термистора составляет около 0,8 гц, при отставании фазы в 26°. Естественно принять специальные меры для расширения полосы пропускания и уменьшения фазовых искажений термистором. Для этого введем в из-

мерительную аппаратуру корректирующие  $RC$ -цепочки с передаточной функцией

$$kW_k(S) = \frac{k(T_k S + 1)}{kT_k S + 1}.$$

В нашем случае корректирующая цепочка включается в усилитель между его входным и выходным каскадами, такое звено дает возможность расширить полосу пропускания всего измерительного канала в 2—2,5 раза и уменьшить сдвиг фаз до  $5^\circ$ .

Градуировка аппаратуры показала синхронность записи показаний пульсаций температуры при одновременной работе всех четырех каналов. Запоздывание по фазе сигналов регистрации при  $f=10$  гц составляет  $5^\circ$ . При этом амплитудные искажения на верхней частоте огибающей (10 гц) ниже точности измерений турбулентных пульсаций температуры.

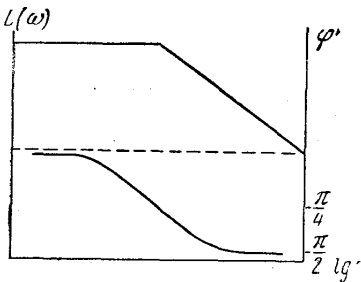


Рис. 2. График амплитудночастотной характеристики датчика

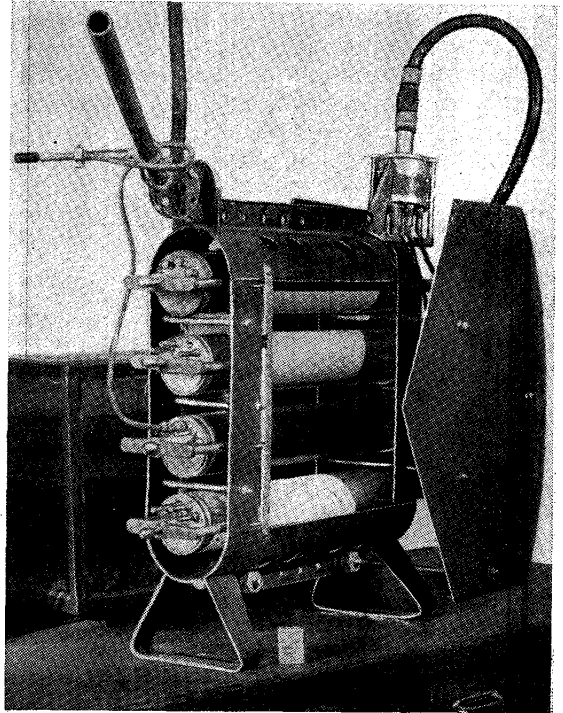


Рис. 3. Общий вид аппаратуры для записи пульсаций температуры

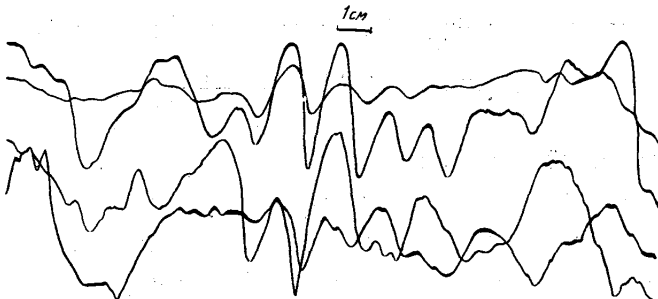


Рис. 4. Образец синхронной записи пульсаций температуры в четырех пространственно-разнесенных точках

Таким образом, разработанная аппаратура имела чувствительность, равную  $0,001^\circ$ , на 1 мм шкалы осциллографа Н-700, полосу пропускания 5 гц, что находится в соответствии с требованиями для регистрации турбулентных неоднородностей в море.

Общий вид аппаратуры показан на рис. 3.

В 1966 г. во время экспедиционных работ на Черном море с борта научно-исследовательского судна «Московский университет» получена серия систематических наблюдений отдельных реализаций турбулентных пульсаций температуры в четырех пространственно-разнесенных точках. На рис. 4 приведена осциллограмма одновременной записи пульсаций температуры при размере базы 70 см, скорость протяжки ленты 1 см/сек. Работа с прибором в море показала полную эффективность и надежность новой аппаратуры для регистрации турбулентных пульсаций температуры в пространственно-разнесенных точках.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В. Д., Миркотан С. Ф. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 4, 3, 1961.
2. Гусев В. Д. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мат., мех., астрон., физ., химии, № 6, 1959.
3. Миркотан С. Ф. Объемные свойства ионосферных неоднородностей. Сб. «Исследования неоднородностей в ионосфере», № 4. М., Изд-во АН СССР, стр. 20.
4. Бунимович В. И. Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. М., «Советское радио», 1951.
5. Гусев В. Д., Миркотан С. Ф., Березин Ю. В., Княновский М. П. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мат., мех., астрон., физ., химии, № 4, 105, 1951.
6. Миркотан С. Ф. «Вестн. Моск. ун-та», сер. мат., мех., астрон., физ., химии, № 6, 1956.
7. Солодовников В. В. Основы автоматического регулирования. М., Гостехиздат, 1954.

Поступила в редакцию  
1. 11 1966 г.

Кафедра  
физики моря и вод суши