

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 2 — 1974

УДК 532.517.4

Е. С. КОФАНОВ, Н. К. ШЕЛКОВНИКОВ, А. А. ПИВОВАРОВ,  
Ю. И. ГОРБАТОВ

## МЕТОДИКА И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ МОРСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Рассматривается методика для исследования трехмерной структуры турбулентности в море. Приводится описание прибора для регистрации пульсаций температуры в четырех пространственно разнесенных точках, а также средней скорости течения, средней температуры и их вертикальных градиентов. Описана механическая часть донной установки, позволяющая ориентировать весь комплекс датчиков по потоку, если угол крена установки не превышает  $30^\circ$ .

Характерной особенностью развитой морской турбулентности надо считать наличие широкого спектра временных и пространственных масштабов, обусловленных различными областями притока энергии от океанических движений. В глобальных масштабах порядка  $10^6$  м и порядка  $10^4$  м у инерционных и приливных колебаний эти притоки и диссипация энергии на единицу массы составляют примерно  $10^{-5}$  и  $10^{-3}$   $\text{см}^2/\text{сек}^3$  соответственно, порождая квазидвумерную горизонтальную турбулентность. В более мелких масштабах порядка 10 м приток и диссипация энергии составляют примерно  $10^{-1}$   $\text{см}^2/\text{сек}^3$ , что приводит к развитию мелкомасштабной турбулентности [1]. Последняя обуславливает значительное возрастание по сравнению с молекулярными процессами вертикального переноса импульса, тепла и массы, являющихся одним из определяющих факторов формирования физических полей в океане.

К развитию мелкомасштабной турбулентности в поверхностном слое океана приводит опрокидывание поверхностных волн, неустойчивость в дрейфовых течениях и в течениях средних и крупных масштабов, конвекция в слоях с неустойчивой стратификацией плотности. Во внутренних слоях океана турбулентность генерируется главным образом за счет разрушения внутренних волн, а в придонных слоях — вследствие неустойчивости придонных течений.

Несмотря на различие в механизмах генерации, мелкомасштабную турбулентность можно считать статистически стационарной во времени до минутных периодов и статистически однородной по горизонтали в масштабах до сотен метров. Однако в вертикальном направлении морская турбулентность неоднородна вследствие действия сил плавучести.

Изучение структуры мелкомасштабной турбулентности, размеров и формы турбулентных образований, их движения и изменчивости во времени представляет важную задачу гидрофизики. Однако исследования, посвященные решению этой задачи прямыми методами на основе синхронной пространственной регистрации турбулентных пульсаций физических полей в морях и океанах, практически отсутствуют.

Применительно к температурному полю разработка методики и аппаратуры для исследования турбулентных неоднородностей по записям пульсаций температуры в четырех пространственно разнесенных точках была начата в МГУ в 1967 г. [2, 3].

Широкий спектр масштаба морской турбулентности предъявляет жесткие, а иногда и противоречивые требования к методике и измерительной аппаратуре. Поэтому при экспериментальном исследовании невозможно охватить полностью весь спектр мелкомасштабной турбулентности и приходится ограничиваться той или иной частью его.

Настоящая работа развивает предыдущие [2, 3], в ней рассматриваются вопросы методики определения геометрии и динамики температурных неоднородностей в море, а также описывается новый вариант электронного прибора для регистрации пульсаций температуры одновременно в четырех пространственно разнесенных точках.

В основу методики определения размеров и формы температурных неоднородностей в море, а также их движения положено следующее [4]. Считая случайные колебания температуры стационарными во времени, можно вычислить пространственно-временную функцию корреляции:

$$R_{11}^{(k)}(S_1, S_2, S_3, \tau) = \frac{t'_1(x, y, z, t) t'_k(x + S_1, y + S_2, z + S_3, t + \tau)}{\sigma'_{t_1} \sigma'_{t_k}}, \quad (1)$$

$$k = 1, 2, 3.$$

На рис. 1 в качестве примера приведена функция  $R_{11}^{(1)}$ , полученная по записи пульсаций температуры в двух точках, разнесенных вдоль потока. Записи пульсаций температуры были получены в 1968 г. на Черном море. Как видно из рис. 1, для функции  $R_{11}^{(1)}$  характерен сдвиг максимума функции взаимной корреляции относительно нулевого смещения двух записей пульсаций температуры. Если известны расстояния  $S_1$  между датчиками, расположенными вдоль потока, временное смещение максимума  $\tau_{01}$  функции взаимной корреляции и временной параметр  $\tau_s$ , то среднестатистический размер  $l_1$  неоднородностей в этом направлении можно определить по формуле

$$l_1 = \bar{V}_1 \tau_s. \quad (2)$$

Входящая в соотношение (2) величина  $\bar{V}_1$  определяет скорость переноса центра турбулентных неоднородностей в горизонтальном направлении и может быть выражена через  $S_1$  и  $\tau_{01}$ :

$$\bar{V} = \frac{S_1}{\tau_{01}}. \quad (3)$$

Размеры температурных неоднородностей в двух других направлениях могут быть определены по уровням равной корреляции.

Таким образом, имея синхронные записи пульсаций температуры в нескольких пространственно разнесенных точках, можно определить геометрию и динамику температурных неоднородностей в море.

Для этого была разработана измерительная система, включающая в себя регистратор пульсаций температуры в четырех точках, разнесенных по осям прямоугольной системы координат. Для выявления зависимости параметров неоднородностей от средних значений температурного и скоростного полей в измерительную установку были включены устройства, позволяющие регистрировать средние значения температуры  $\bar{T}$ , скорости течения  $\bar{V}$ , а также вертикальные градиенты этих величин.

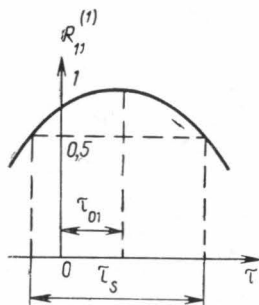


Рис. 1. График функции взаимной корреляции пульсаций в двух точках, разнесенных вдоль потока

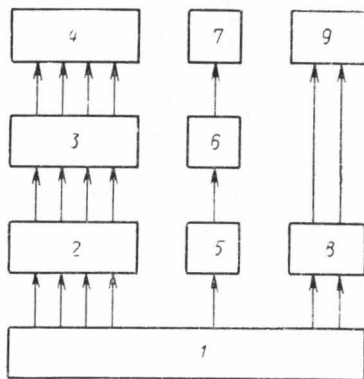


Рис. 2. Блок-схема измерительной системы: 1 — комплекс датчиков, 2 — четырехканальный усилитель пульсаций температуры, 3 — блок регулировки, 4 — регистратор пульсаций температуры, 5 — измерительный мост, 6 — блок балансировки, 7 — автоматический самопишущий потенциометр, 8 — двухканальный усилитель сигналов устройства счета оборотов вертушек, 9 — регистратор счета оборотов вертушек

Блок-схема измерительной системы приведена на рис. 2, принципиальная схема канала регистрации пульсаций температуры — на рис. 3.

В качестве датчика пульсаций температуры использовалась батарея терморпар. Для усиления сигнала, снимаемого с батареи терморпар, изготовлен усилитель постоянного тока по схеме МДМ. Усилитель имеет следующие функциональные узлы: преобразователь малых сигналов постоянного тока в переменное напряжение (модулятор), полусовой усилитель с низким уровнем помех, фазовый демодулятор и генератор прямоугольных импульсов.

При создании усилителя первостепенное внимание было уделено преобразователю малых сигналов постоянного тока в переменное напряжение, так как в большинстве случаев именно преобразователь определяет характеристику УПТ в целом. Модулятор описываемого прибора выполнен на полевом транзисторе. Коммутирующее напряжение с частотой 1,2 кГц поступает на транзистор модулятора от мультивибратора  $T_1$  и  $T_2$  (см. рис. 3). Нейтрализация тока смещения, возникающего от паразитной емкости и тока утечки, осуществляется с помощью конденсатора  $C_5$  и резистора  $R_8$ . После нейтрализации тока

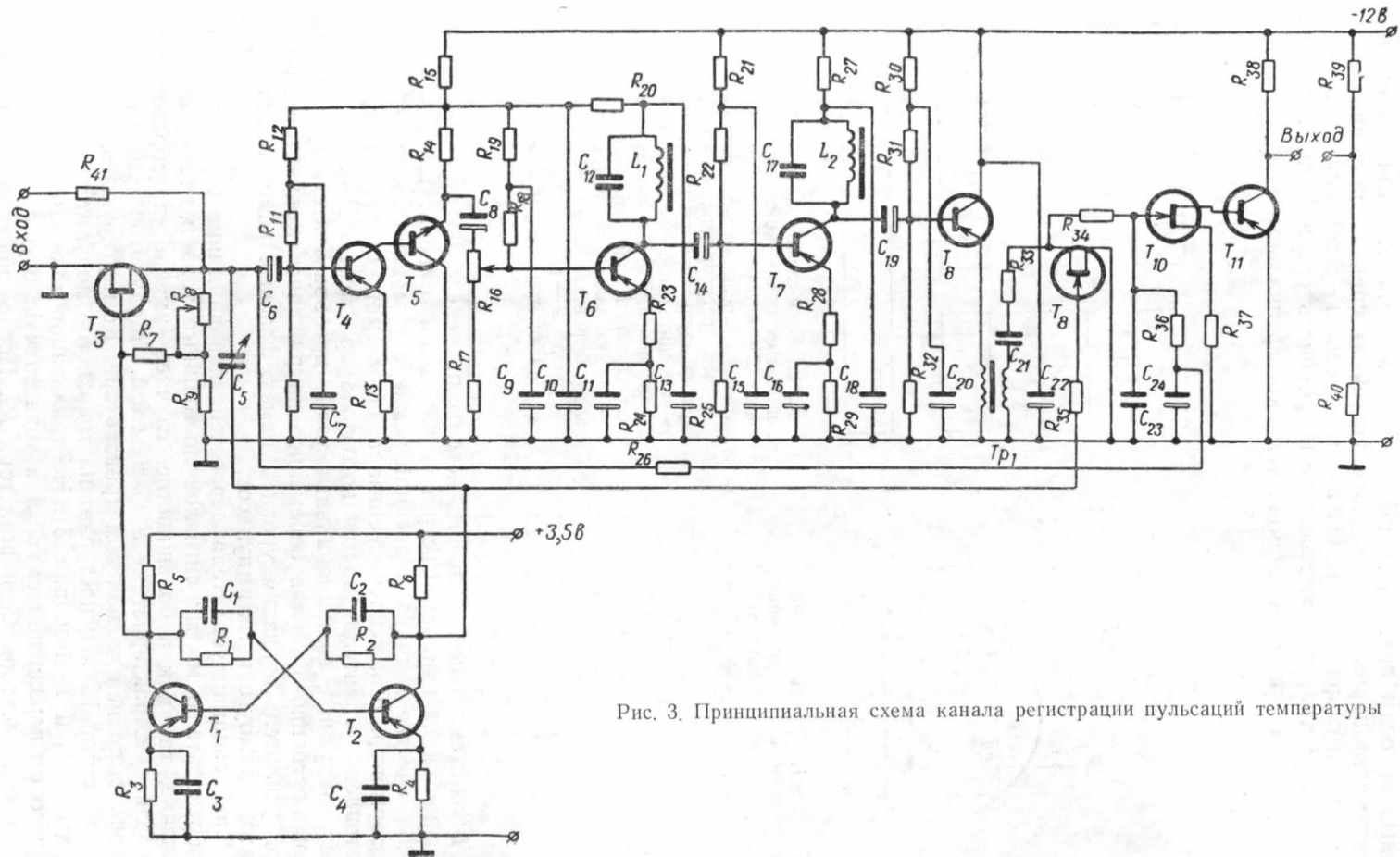


Рис. 3. Принципиальная схема канала регистрации пульсаций температуры

смещения дрейф нуля прибора в течение часа практически отсутствует. Уровень собственных шумов модулятора не превосходит 0,4 мкв [5].

Напряжение с модулятора поступает на узкополосный усилитель с большим коэффициентом усиления. Два каскада предварительного усиления выполнены на транзисторах  $T_4$  и  $T_5$  по схеме с непосредственной связью. Режим транзистора  $T_4$  по постоянному току задается делителем  $R_{10}$ ,  $R_{11}$  из условий наилучшей температурной стабилизации. Для обеспечения хорошей стабильности усилителя на низких частотах введены развязывающие емкостные фильтры  $C_7$ ,  $C_9$ ,  $C_{10}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{15}$ ,  $C_{18}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{22}$ . Необходимая полоса пропускания усилителя достигается настройкой контуров  $L_1$ ,  $C_{12}$  и  $L_2$ ,  $C_{17}$  на частоту коммутирующего напряжения генератора прямоугольных сигналов.

Генератором прямоугольных сигналов является мультивибратор, собранный на транзисторах  $T_1$ ,  $T_2$ , который управляет модулятором и фазовым демодулятором. Частота коммутирующего напряжения определяется постоянной времени цепей  $R_1$ ,  $C_1$  и  $R_2$ ,  $C_2$ . Для стабилизации частоты коммутирующего напряжения питание мультивибратора осуществляется от отдельного источника, в качестве которого используется батарея напряжением 3,5 в. Для обеспечения защиты модулятора и входного каскада полосового усилителя от наводок, они заключены в заземленный корпус из магнито-мягкого железа.

Нагрузкой оконечного каскада полосового усилителя является фазовый демодулятор, включенный во вторичную обмотку выходного трансформатора усилителя. Демодулятор выполнен на полевом транзисторе  $T_9$ . Демодулированное напряжение дополнительно усиливается двухкаскадным усилителем постоянного тока, выполненным на транзисторах  $T_{10}$  и  $T_{11}$ .

Применение глубокой отрицательной обратной связи по постоянному току позволяет обеспечить температурную стабилизацию, а также устранить помехи с частотой менее 0,1 гц. Сигнал обратной связи подается на исток полевого транзистора модулятора через емкость  $C$ .

При подготовке прибора к работе осуществляется регулировка для получения оптимальной нейтрализации тока смещения. Настройка осуществляется переменной емкостью  $C_5$  и переменным резистором  $R$  при отключенной обратной связи. Нулевое выходное напряжение достигается с помощью делителя  $R_{39}$ ,  $R_{40}$  при закороченном входе.

Для контроля чувствительности прибор калибруется следующим образом: при помощи реле на вход усилителя через делитель от нормального элемента подается контрольный сигнал до начала и в конце записи. В результате интерполяции могут быть найдены поправки.

Инерционность прибора в основном определяется постоянной времени батареи термопар и равна  $\sim 0,1$  сек. Чувствительность канала регистрации пульсаций температуры составляет  $\sim 0,002^\circ\text{C}$  на 1 мм шкалы регистратора, в качестве которого использовался шлейфовый осциллограф  $H-700$  с гальванометрами чувствительностью  $10^{-5}$  А (ММ) м.

Для измерения скорости течения в описываемой установке использовались специально разработанные высокочувствительные вертушки с дискретным отсчетом числа оборотов. Световой поток, направленный от осветителя на фотодиод, при вращении ротора прерывается экранами, равномерно расположенными по окружности. Изменение сопротивления фотодиода, вызванное изменением светового потока, регистрируется электронной схемой.

Ротор вертушки выполнен из органического стекла и установлен на агатовых подшипниках, которые прижимаются к оси ротора посред-

ством пружины с регулировочным винтом, чем достигается отсутствие люфта и минимальное трение. Скорость трогания вертушки составляет  $2 \text{ см/сек}$ . Градиент скорости определяется по показаниям двух вертушек, установленных на вертикальной штанге донной установки.

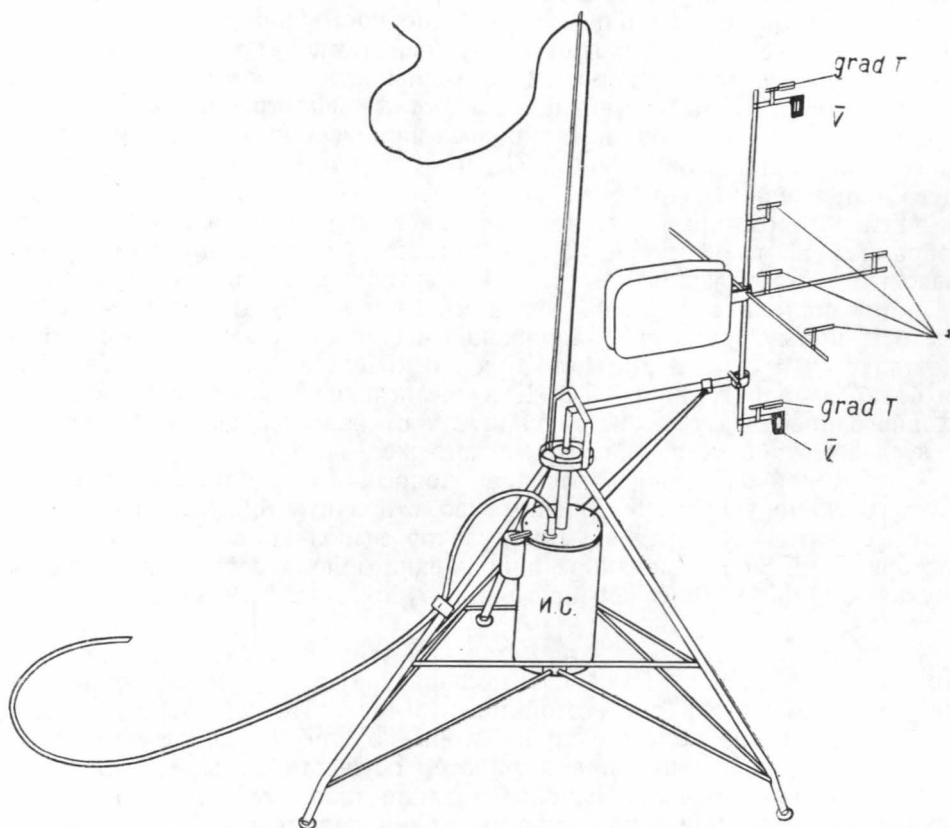


Рис. 4. Схема донной установки

Для непрерывной регистрации среднего значения температуры и ее градиента используются платиновые термометры сопротивления; в последнем случае из них полностью собран измерительный мост так, что на каждом горизонте находятся по два датчика температуры. Для питания моста используется сухой гальванический элемент с начальным напряжением  $1,6 \text{ в}$ . При таком питании моста можно вести непрерывную регистрацию градиента температуры с точностью не менее  $0,02 \text{ град/м}$  в интервале от  $5$  до  $26^\circ\text{C}$  автоматическим самопишущим потенциометром типа КСП-4 без дополнительного усиления [6].

Часть измерительной системы, погружаемая в море, монтируется на донной установке.

Донная установка (рис. 4) представляет собой треногу, на платформе которой в шаровом шарнире установлена мачта. Ниже шаровой опоры к мачте крепится контейнер, в котором размещается четырехканальный электронный прибор для регистрации пульсаций температуры, а также питание моста датчиков температуры и осветителей устройства счета оборотов вертушек. В верхней части мачты на штангах, образующих прямоугольную систему координат, расположены

батареи терморпар. Штанги закреплены на шарикоподшипнике, что позволяет всему комплексу датчиков при помощи стабилизатора устанавливаться по потоку. Мачта установки всегда находится в вертикальном положении, если только угол крена не превышает  $30^\circ$ . Это достигается закреплением контейнера на мачте ниже шаровой опоры. Донная установка опускается в море на капроновом тросе и соединяется с комплексом бортовой аппаратуры при помощи многожильного морского кабеля.

Описываемая установка и измерительная система испытывались в экспедиции на НИС «Московский университет» летом 1971 г. на Черном море. Испытания показали удовлетворительную работу основных узлов системы.

С помощью данной измерительной системы были получены пробные записи пульсаций температуры в море, по которым и вычислены структурные, авто- и взаимно-корреляционные функции.

На рис. 5 в качестве иллюстрации приведена функция автокорреляции пульсаций температуры в придонном слое моря, построенная в полулогарифмическом масштабе. В данном случае функция автокорреляции может быть аппроксимирована экспонентой

$$k(\tau) = e^{-\alpha\tau}, \quad (4)$$

где  $\tau$  — временное смещение,  $\alpha$  — показатель экспоненты ( $\alpha > 0$ ).

Так как интегральный масштаб турбулентности выражается формулой

$$R = \frac{1}{\alpha}, \quad (5)$$

то его можно определить непосредственно по графику (рис. 5). Для рассматриваемого случая он составляет  $\sim 0,4$  сек.

Пробная обработка записей пульсаций температуры показала, что описываемая измерительная система может быть использована для регистрации мелкомасштабной турбулентности в море.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Монин А. С. «Океанология», 10, вып. 2, 1970.
2. Шелковников Н. К., Миркотан С. Ф., Хунджуа Г. Г. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., № 1, 1968.
3. Доброклонский С. В., Миркотан С. Ф., Хунджуа Г. Г., Шелковников Н. К. «Изв. АН СССР», физика атмосферы и океана, 4, № 4, 1968.
4. Шелковников Н. К. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астроном., 12, № 6, 1971.
5. Беленький Б. И., Минц М. Б. Высокочувствительные усилители постоянного тока с преобразователями. Л., 1970.
6. Восканян А. Г., Пивоваров А. А., Хунджуа Г. Г. «Океанология», 6, вып. 5, 1966.

Поступила в редакцию  
19.4 1972 г.

Кафедра  
физики моря и вод суш

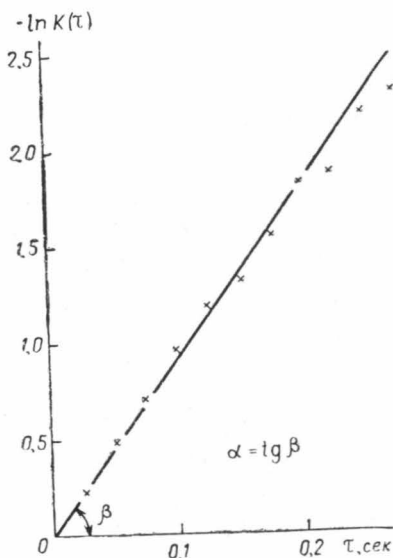


Рис. 5. График функции автокорреляции пульсаций температуры в полулогарифмическом масштабе