

**Временная изменчивость кавитационных порогов морской воды**Н.П. Мельников<sup>1,\*</sup>, В.П. Елистратов<sup>2</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Научно-исследовательский радиофизический институт», Россия,  
603950, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д.25/12а<sup>2</sup>Гидрофизический институт Академии наук Республика Абхазия, г. Сухум  
(Статья поступила 14.11.2014; Подписана в печать 03.12.2014)

Приводится временная изменчивость кавитационных порогов (КП) в трех различных районах Мирового океана. Первый район представляет собой закрытый мелководный морской залив, второй располагается в открытой части Атлантического океана, третий располагается в непосредственной близости от берега в районе мощного стока речных вод. Проведенные исследования показывают, что временная изменчивость КП морской воды в различных районах Мирового океана носит весьма сложный характер и, по видимому, связана с наличием общего суточного ритма физических, химических и биологических процессов в океане, в частности, с приливными явлениями и с суточной миграцией планктона, а также с колебаниями слоя скачка под действием внутренних волн.

PACS: 40.00.00

УДК: 534.222

Ключевые слова: кавитация, кавитационный порог.

**ВВЕДЕНИЕ**

Явление кавитации заключается в образовании пузырьков и каверн в некоторых участках жидкости под действием переменных полей давления. Амплитуду акустического поля  $P_{mk}$ , при котором начинается кавитация, принято называть акустическим порогом кавитации. В экспериментальных работах по измерению КП в реальной морской воде в процессе исследования пространственной изменчивости КП и связи этой величины с различными гидрофизическими, гидрохимическими и гидробиологическими характеристиками морской воды, были обнаружены значительные временные вариации величин КП [1–3]. Для определения характера этих вариаций были предприняты специальные исследования в двух районах Мирового океана, существенно отличающихся гидрологическими условиями. Первый район представлял собой закрытый мелководный морской залив, второй располагался в открытой части Атлантического океана. Кроме того в представленной работе предпринята попытка разделить временную и пространственную изменчивость КП. Величины КП получены в процессе экспериментального исследования мелкомасштабной пространственной изменчивости КП в районе мощного стока речных вод в непосредственной близости от берега в устье р. Меконг.

**1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ**

При проведении измерений кавитационных порогов морской воды в различных районах Мирового океана неизбежно возникает вопрос об идентичности проведенных измерений, т.е. о единой методике про-

ведения экспериментальных исследований. Здесь важен критерий возникновения кавитации и необходима экспериментальная установка, позволяющая реализовать единую методику измерений. Критерии возникновения кавитации достаточно подробно обсуждены в работах [4, 5]. Основным источником информации о процессах, происходящих при воздействии на жидкость переменных полей давления, является акустический шум, излучаемый пузырьками, которые пульсируют под действием этих переменных полей давления. Известно, что спектр шума акустической кавитации в общем случае представляет собой набор дискретных составляющих на фоне широкополосного шума. Среди дискретных составляющих могут быть выделены гармоники, субгармоники, ультрагармоники и модуляционные компоненты. За появление этих компонент ответственна динамика отдельных пульсирующих пузырьков. Динамика пузырьков, находящихся под действием периодического акустического поля носит резонансный характер. Проведенные исследования показали, что:

1. для резонансов любого порядка характерно некоторое пороговое значение амплитуды внешнего поля, ниже которого он не возбуждается; это значение тем выше чем выше порядок резонанса;
2. при вынужденных пульсациях пузырька кавитационный шум представляет собой импульсный процесс с периодом, кратным периоду возбуждающего поля. Форма излучаемой акустической волны определяется порядком пульсаций пузырька. Спектр кавитационного шума линейчатый и спадает в область высоких частот. В зависимости от порядка возбуждаемого резонанса в спектре шума кроме гармоник появляются субгармоники, причем их интенсивность может меняться в значительных пределах, но всегда остается ниже интенсивности гармонических составляющих;

\*E-mail: melnikov50@mail.ru

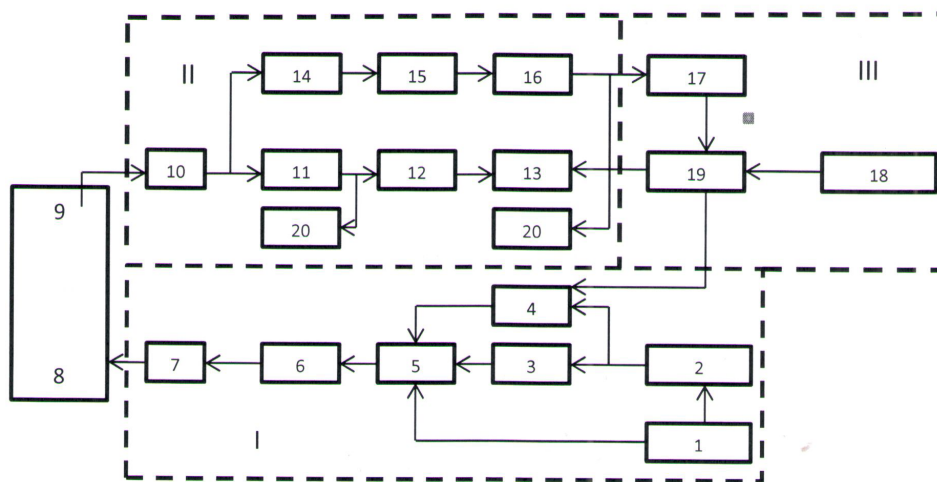


Рис. 1: Блок-схема установки для измерения кавитационных порогов

3. при воздействии на пузырек акустического поля, частота которого ниже основной резонансной частоты пузырька, резонансного возбуждения пузырька не происходит; при достижении амплитуды внешнего поля некоторой критической величины наблюдается потеря статической устойчивости;
4. в зависимости от амплитуды внешнего поля в спектре шума пузырька, пульсирующего в области гармонических и ультрагармонических резонансов, могут появляться и исчезать субгармонические компоненты, и поэтому их появление в спектре не может служить достаточно надежным критерием возникновения кавитации. И только в случае возбуждения пузырька на субгармоническом резонансе субгармоника в спектре присутствует всегда и, следовательно, только этом случае ее бурный рост служит критерием возникновения кавитации.

Блок-схема экспериментальной установки по измерению величины кавитационных порогов в натуральных условиях приведена на рис. 1. На блок-схеме можно выделить три основных канала: I — канал излучения, II — канал приема и измерения, III — канал автоматики. В канале излучения формируется непрерывный сигнал  $U_k$ , ступенчато нарастающий во времени по линейному закону. Форма сигнала на выходе излучения приведена на рис. 2. Параметры сигнала могут дискретно и независимо варьироваться в пределах  $T_c = (10-2000)$  мс,  $t_3 = 3$  с–10 мин. Каждая серия ступенек на выходе канала состоит из 128 импульсов, причем амплитуда последнего и, следовательно, скорость амплитуды может меняться в широких пределах в зависимости от возможности усилителя мощности. С выхода мощного усилителя сигнал  $U$  поступает на

цилиндрический фокусирующий преобразователь, возбуждающий кавитацию в морской воде. Таким образом, выбирая одинаковую амплитуду последней ступеньки можно получить постоянную скорость роста давления в фокальном пятне концентратора.

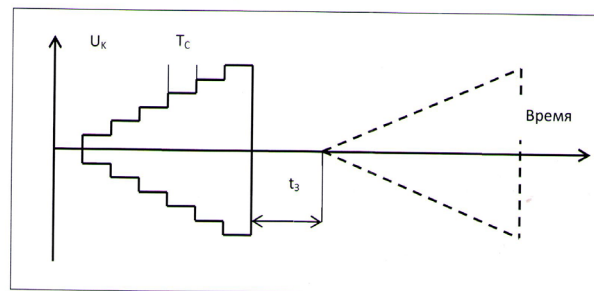


Рис. 2: Форма сигнала на выходе канала излучения

На блок-схеме канала излучения обозначено: 1 — задающий генератор (частота заполнения); 2 — генератор периода следования импульсов; 3 — генератор длительности импульса; 4 — реле времени задержки; 5 — модулятор; 6 — индикатор номера ступеньки (импульса); 7 — усилитель мощности; 8 — акустический концентратор.

Кавитационный шум с гидрофона поступает на канал II — канал приема и измерения, в котором с помощью режекторных фильтров и фильтров верхних частот из суммарного сигнала (кавитационный шум плюс сигнал от акустического концентратора) выделяется кавитационный шум, точнее его составляющая, лежащая выше третьей гармоники возбуждающей частоты; измеряется амплитуда звукового давления и вырабатывается сигнал возникновения кавитации. В качестве

критерия возникновения кавитации выбран скачкообразный рост уровня высших гармонических составляющих спектра выше третьей в случае потери динамической устойчивости кавитационных пузырьков и бурный рост уровня спектральных составляющих еще более высоких порядков и появления сплошной части спектра в случае потери статической устойчивости пузырьков [4]. Эти критерии иллюстрируются на рис. 3.

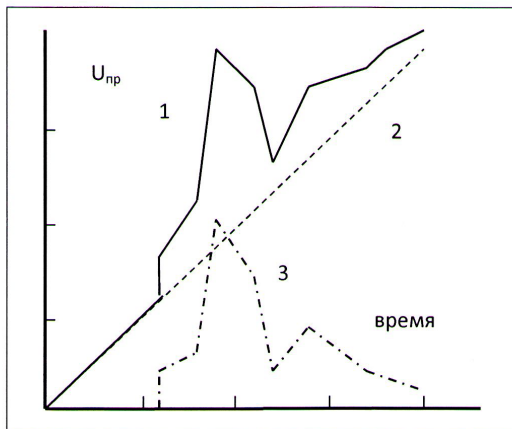


Рис. 3: Сигнал принимаемый гидрофоном (1), напряжение, подаваемое на акустический концентратор (2), кавитационный шум (3)

На этом рисунке кривая 1 — суммарный сигнал, принимаемый гидрофоном; 2 — сигнал основной частоты; 3 — кавитационный шум. Видно, что кавитационный шум появляется при некотором значении сигнала на основной частоте, что соответствует потере динамической устойчивости, и резко возрастает при некотором другом значении сигнала на основной частоте, что соответствует потере статической устойчивости. Оба эти момента легко фиксируются в эксперименте

На рис. 1 цифрами обозначено: 9 — гидрофон; 10 — форусилитель; 11 — усилитель с автоматическим делителем; 12 — вольтметр; 13 — регистрирующее устройство; 14 — усилитель с дискретным АРУ; 15 — фильтр режекторный; 16 — фильтр высоких частот; 20 — осциллограф. Канал автоматики при возникновении кавитации отключает канал излучения, прекращая рост амплитуды возбуждающего поля в фокальном пятне концентратора, включает регистрирующее устройство, фиксирующее величину порогового давления, приводит всю схему в исходное состояние и запускает реле времени задержки между отдельными измерениями. В состав канала автоматики входят: 17 — схема управления; 18 — генератор опорного сигнала; 19 — схема управления. Такая экспериментальная установка позволяет:

- уменьшить ошибки, вносимые непостоянством скорости нарастания амплитуды давления в фокальном пятне концентратора;
- обеспечить единство методики измерения величины кавитационного порога;
- обеспечить постоянную относительную ошибку измерения величины кавитационного порога;
- максимально сократить время измерения и свести к минимуму воздействие измерительной системы на величину кавитационного порога.

Методика измерения КП следующая: в дрейфе на станциях на глубине 10 м делалось 10 измерений КП, эти измерения усреднялись и усредненное значение принималось за кавитационный порог; в первом и втором районах измерения проводились через равные промежутки времени (0,5 часа), временная реализация первого района составляет 48 часов, второго — 36 часов; в третьем районе всего было выполнено 27 станций. Полученные данные анализировались с помощью авторегрессионных методов — наиболее оптимальных методов спектрального анализа коротких временных рядов [6]. Частота возбуждения акустического концентратора равнялась 10 кГц для всех измерений.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходный временной ряд для первого района приведен на рис. 4а. На этом же рисунке штриховой линией показан линейный тренд, выделенный с помощью метода наименьших квадратов. На рис. 4б показана оценка спектра исходного ряда, полученная после вычитания линейного тренда. Видно, что спектр содержит как высокочастотные, так и низкочастотные компоненты. Для разрешения низкочастотных составляющих (27 ч и 6 ч) выполнена численная фильтрация и децимация (прореживание) исходного временного ряда. Результаты такой обработки приведены на рис. 4в, г. Спектры исходного ряда и его низкочастотной составляющей (см. рис. 4б, г), показывают, что временная изменчивость кавитационных порогов в исследуемом районе имеет весьма сложный характер: кроме наиболее интенсивной суточной составляющей, в спектре наблюдаются значимые (с достоверностью 80%) спектральные компоненты с более короткими периодами — 14,3; 7,6; 6; 2,6; 1,9; 1,5 и 1,08 ч. Для анализа временной изменчивости отдельных спектральных составляющих выполнены оценки спектров для временных рядов длительностью 24 ч со сдвигом по времени 3 ч. Наиболее характерные спектры показаны на рис. 5.

Обнаружилось, что частота и амплитуда некоторых спектральных компонент претерпевают значительные изменения во времени. В частности спектральные компоненты со средними периодами 6; 1,5 и 1,08 ч могут

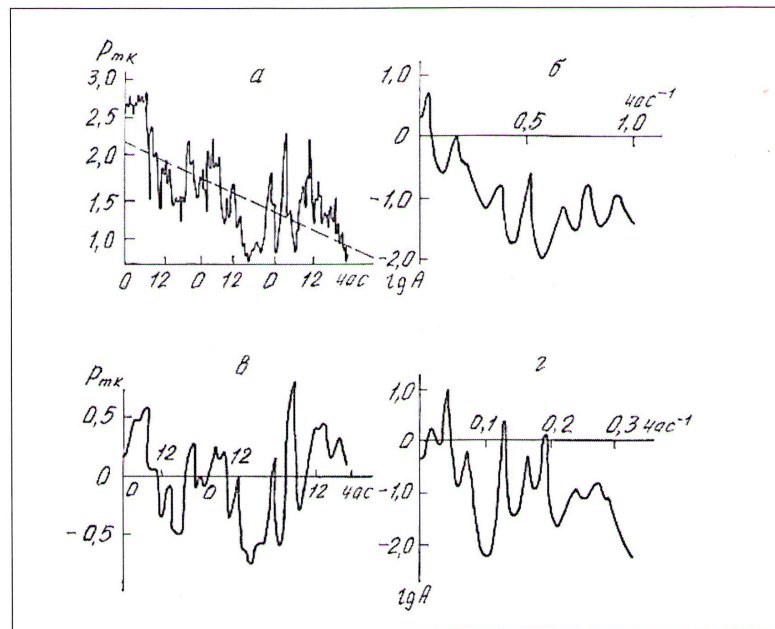


Рис. 4: а — исходный ряд (сплошная линия) и его тренд (штриховая линия); б — спектр исходного ряда без линейного тренда ( $\lg A$  — спектральная плотность); в — низкочастотная часть исходного ряда; г — спектр низкочастотной части исходного ряда

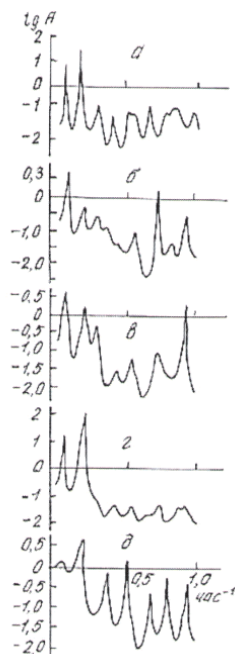


Рис. 5: Спектры суточных серий. Начальное время: а —  $t_i=00.30$ ; б —  $t_i=22.00$  первого дня; в —  $t_i=01.00$ ; г —  $t_i=19.00$  второго дня измерений

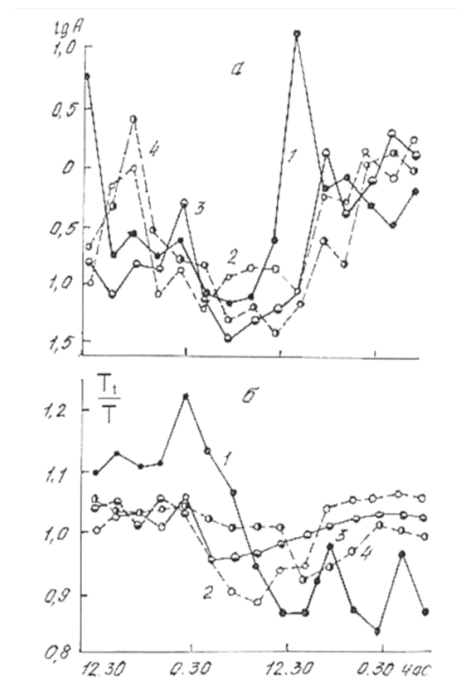


Рис. 6: Временная изменчивость спектральных компонент (1, 2, 3, 4 —  $T=6; 2,6; 1,9; 1,25$  часовые компоненты соответственно);  $T_i$  — текущий период

становится сравнимыми и даже превышать амплитуду суточной компоненты (см. рис. 5а, г). Следует отме-

тить, что амплитуды и частоты спектральных составляющих (рис. 6) со средними периодами  $T=6; 2,6; 1,9$

и 1,25 ч изменяются во времени сходным образом, причем максимальные значения амплитуд этих составляющих наблюдались в дневное время (между 12 и 15 ч), а минимальные — в утренние часы. Особенно сильная изменчивость во времени характерна для компоненты со средним периодом 6 ч: её частота изменяется от 7,8 до 5,15 ч, а амплитуда — более чем на два порядка. В то же время частота и амплитуда суточной компоненты (средний период 24 ч) изменяются значительно меньше (в пределах 10% по частоте и одного порядка по амплитуде). Следует отметить также, что в конце вторых суток эта спектральная компонента исчезает вовсе и появляется в начале третьих суток, оставаясь весьма малой.

Для объяснения наблюдаемой временной изменчивости КП и отдельных спектральных составляющих необходимо учесть метеорологические условия, в которых проводился эксперимент. Начало работ пришлось на длительный период ясной безветренной погоды. К концу первых суток поднялся ветер, постепенно усиливающийся в течении вторых суток и стихший к середине третьих. Кроме того, в конце первых суток начался дождь, прекратившийся только к утру третьих суток. По-видимому, постепенное снижение величины КП, исчезновение суточной компоненты и уменьшение амплитуд отдельных спектральных составляющих могут быть связаны с перемешиванием и распреснением поверхностного слоя воды. Кроме того, оценки показали, что в данном районе под действием шквальных ветров могут генерироваться внутренние волны с периодами, близкими к наблюдаемым нами периодами во временной изменчивости КП. В частности, с этим явлением может быть связано заметное увеличение амплитуд спектральных составляющих со средними периодами 5; 2,6; 1,9 и 1,05 ч, приходящиеся на вторую половину вторых суток.

Аналогичная обработка проведена и для полуторасуточных измерений КП во втором районе. Оценка спектра этого ряда также содержит компоненты со средними периодами часа: 24; 8; 3 и 1,5 (рис. 7).

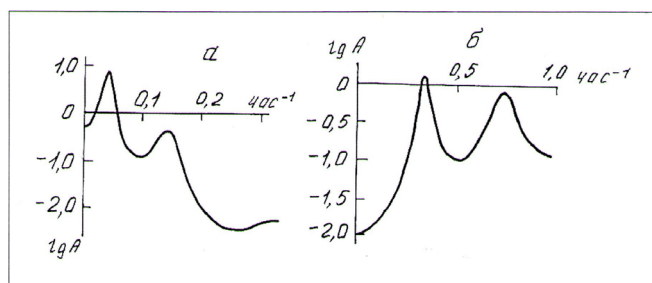


Рис. 7: Низкочастотная (а) и высокочастотная (б) части спектра полуторасуточного временного ряда, полученного во втором районе

Пространственное распределение основных океанологических характеристик в третьем районе — температуры, солености, концентрации твердых взвесей

приведены на рис. 8а–в. Распределение основных гидрологических характеристик в этом районе отличается большой сложностью. Диапазон изменения температуры здесь незначителен, но конфигурация изолиний довольно сложна. Распределение солености имеет сложную, ячеистую структуру. В общем изолинии ориентированы вдоль береговой черты и образуют в центральной части полигона меандр, обращенный вершиной к берегу. В вершине меандра располагаются более холодные и соленые воды. Рядом находится точка с максимальной соленостью и высокой температурой, расположенная в русле выноса речных вод, измерения в которой проводились во время отлива. Чередование зон минимальных и максимальных океанологических характеристик по сечению полигона вдоль берега наводит на мысль о существенной роли приливов в формировании океанологических полей. По-видимому, в данном районе синхронно с приливами может происходить и последовательная смена областей минимальных и максимальных значений гидрологических характеристик. Также сложный, ячеистый характер носит и распределение концентрации твердых взвесей и распределение величины кавитационных порогов. Точки с максимальной концентрацией твердых взвесей расположены в основном на мелководье, и концентрация твердых взвесей уменьшается при удалении от берега

На рис. 9а приведено пространственное распределение КП в этом районе. Цифры около точек означают величину КП на данной станции в условных единицах, а линии представляют собой изолинии КП. Расположение максимальных и минимальных значений КП не носит явно выраженного закономерного характера. Видны языки максимальных и минимальных величин КП. Изменчивость величины КП в данном районе складывается из изменчивости, обусловленной приливными явлениями, или временной изменчивостью, и из пространственной изменчивости, обусловленной сложным характером выноса речных вод. Был проведен спектральный анализ временной реализации КП, выделены низкочастотная и высокочастотные составляющие. Очевидно, что низкочастотная составляющая (~24 ч) есть временная, связанная с приливом, изменчивость КП. Изолинии КП в условных единицах без учета низкочастотной составляющей приведены на рис. 9б. Здесь явно видны русла пониженных значений КП, расположенные напротив выноса речных вод, показанных на этом рисунке стрелками, а районы повышенных КП расположены напротив мысов. Следует отметить, что в районах выноса речных вод (рис. 9а, участки I, III, V) резко увеличивается изменчивость КП, в отличие от участков (II, IV), не имеющих стока, и русла пониженных значений КП лежат на руслах выноса речных вод. Вычитая низкочастотную составляющую значений КП, т. е. исключая временную компоненту и оставляя пространственную, мы, по существу, исключаем влияние прилива с суточным периодом на величину КП, т. е. как бы синхронизируем измерение КП в различных точках.



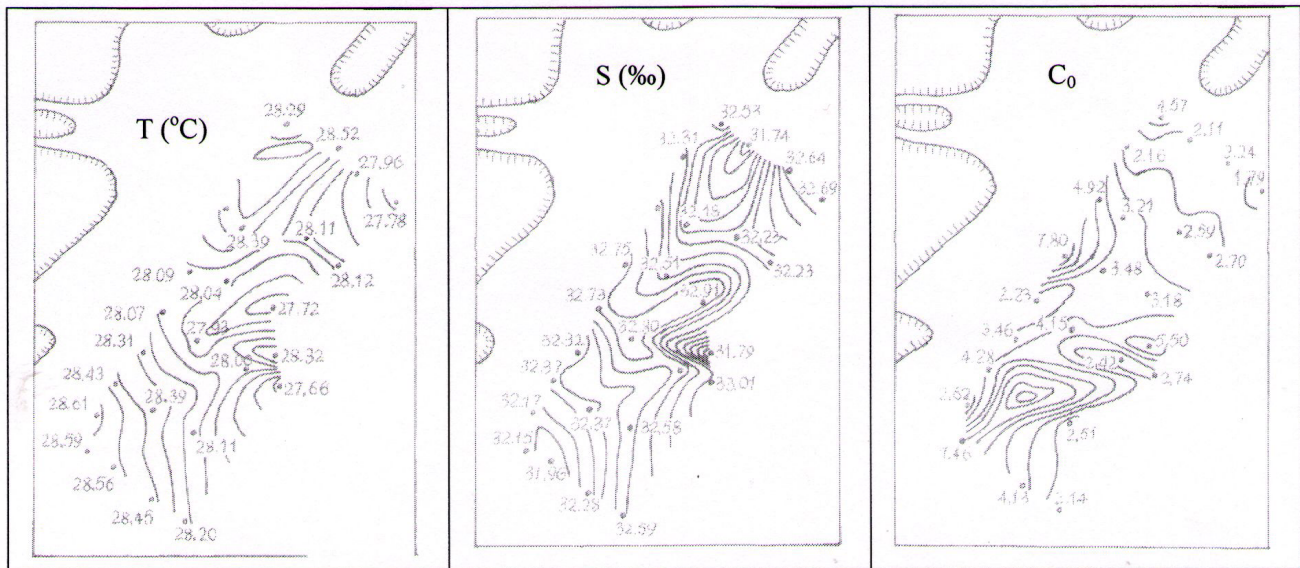


Рис. 8: Распределение гидрологических характеристик. а – изолинии температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), б – изолинии солёности  $S$  (%); в – изолинии концентрации твердых взвесей  $C_0$  (мг/л)

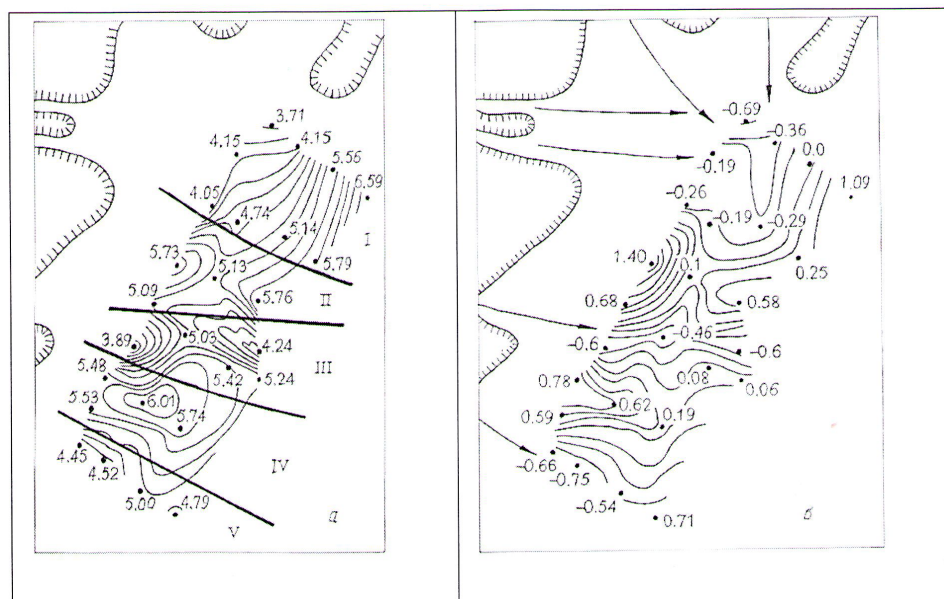


Рис. 9: а – изолинии кавитационных порогов (относительная величина); б – пространственная изменчивость кавитационных порогов (относительная величина)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что временная изменчивость КП морской воды в различных районах Мирового океана носит весьма сложный характер

и связана, по видимому, с наличием общего суточного ритма физических, химических и биологических процессов, в частности, с приливными явлениями и суточной миграцией планктона, а также с колебаниями слоя скачка под действием внутренних волн.

[1] Ильичев В.И., Елистратов В.П., Корец В.Л., Кузнецов Г.Н., Мельников Н.П. ДАН. **312**, № 4. С. 974. (1990).

[2] Ильичев В.И., Елистратов В.П., Корец В.Л., Мельников

- Н.П. ДАН. 324, №5. С. 1108. (1992).*
- [3] *Акуличев В.А., Ильичев В.И. Акуст. журнал. 51, №2. С.167. (2005).*
- [4] *Ильичев В.И., Корец В.Л., Мельников Н.П. Акуст. журнал. 39, №1. С.101. (1993).*
- [5] *Ilyichev V.I., Koretz V.L., Melnikov N.P. Ultrasonics. 27. P.357. (1989).*
- [6] *Парзен Э. В. Подводная акустика и обработка сигналов. (М.: Мир, 1985).*

## The time variability of the cavitation thresholds of sea water

**N.P. Melnikov<sup>1,a</sup>, V.P. Elistratov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Federal State Scientific Institution (FSSI) Radiophysical Research Institute (NIRFI), Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Hydrophysical Institute of Academy of Sciences of Abkhazia, Sukhum*

*E-mail: <sup>a</sup>melnikov50@mail.ru*

The investigation of the time variability of the cavitation thresholds of sea water in the three region of the World Ocean is presented. The first region is closed shallow sea gulf, the second region is in open part of Atlantic ocean, the third region is near the coast in region of powerful flow of river water. The made studies show that the time variability of the cavitation thresholds of sea water in the different region of the World Ocean is complex character and apparently connected with the presence of total daily rhythm of physical, chemical and biological processes in the ocean, particularly, with the tidal phenomena, as well as with the fluctuations discontinuity layer under the action of internal waves.

PACS: 40.00.00

Keywords: cavitation, cavitation threshold.

Received 14.11.2014.

### Сведения об авторах

1. Николай Павлович Мельников — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; e-mail: melnikov50@mail.ru.
2. Валерий Петрович Елистратов — старший научный сотрудник; тел.: 8 (940) 990-64-62.