



УДК 532.528

**Н.П. Мельников**, к.ф.-м.н. НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а

**Б.И. Резников**, к.ф.-м.н., доцент ФГБОУ ВО «ВГУВТ»  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

## О СВЯЗИ КАВИТАЦИОННЫХ ПОРОГОВ С КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМОЙ И БИОГЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МОРСКОЙ ВОДЫ

*Ключевые слова:* кавитационная прочность морской воды; карбонатная система морской воды; биогенные элементы морской воды

*В настоящей работе на основании проведенных экспериментальных работ по измерению величин кавитационных порогов (ВКП) и других параметров морской воды в различных районах Мирового океана установлена статистическая связь ВКП с концентрацией биогенных элементов и некоторыми элементами карбонатной системы.*

Величина кавитационных порогов морской воды в различных районах Мирового океана и в различные временные интервалы (сезоны, время суток) однозначно определяется концентрацией и распределением по размерам зародышей кавитации [1]. Методика измерения кавитационных порогов и экспериментальная установка для их измерения подробно описана в работе [2]. Достаточно подробный обзор проблемы кавитационных зародышей приведен в [3, 4].

Карбонатная система, биогенные элементы морской воды и ВКП

*Карбонатная система.* Как уже отмечалось, порог возникновения кавитации в основном зависит от присутствия в воде зародышей кавитации. Поэтому изменение концентрации и функции распределения зародышей кавитации по размерам играет существенную роль в процессах возникновения и протекании кавитации. Прямых измерений концентрации пузырьков и их распределения по размерам в приповерхностном слое морской воды проведено достаточно много. Достаточно полный обзор этих исследований приведен в работе [5]. В настоящее время существует неоднозначная информация о распределении пузырьков по размерам и их концентрация в зависимости от поверхностного волнения, силы ветра и других факторов, влияющих на это распределение, в различных районах Мирового океана и на различных глубинах (от 0 до 20 м). Также следует отметить, что параллельные измерения концентрации пузырьков и ВКП морской воды отсутствуют.

Планктон в морской воде является примесью и может, при некоторых условиях, являться зародышем кавитации. Жизнедеятельность планктона приводит к множеству явлений, таких как фотосинтез и распад органического вещества, дыхание и других [6]. Эти явления связаны с круговоротом  $CO_2$  в глобальном масштабе и изучение этого явления связано с изучением карбонатной системы морской воды.

Карбонатная система морской воды включает в себя следующие параметры: кислотность  $pH$ , общую щелочность:  $Alk = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [BOH_4^-]$ , общую концентрацию карбонатных ионов:  $[HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] + [CO_2 + H_2CO_3]$ , концентрацию свободной

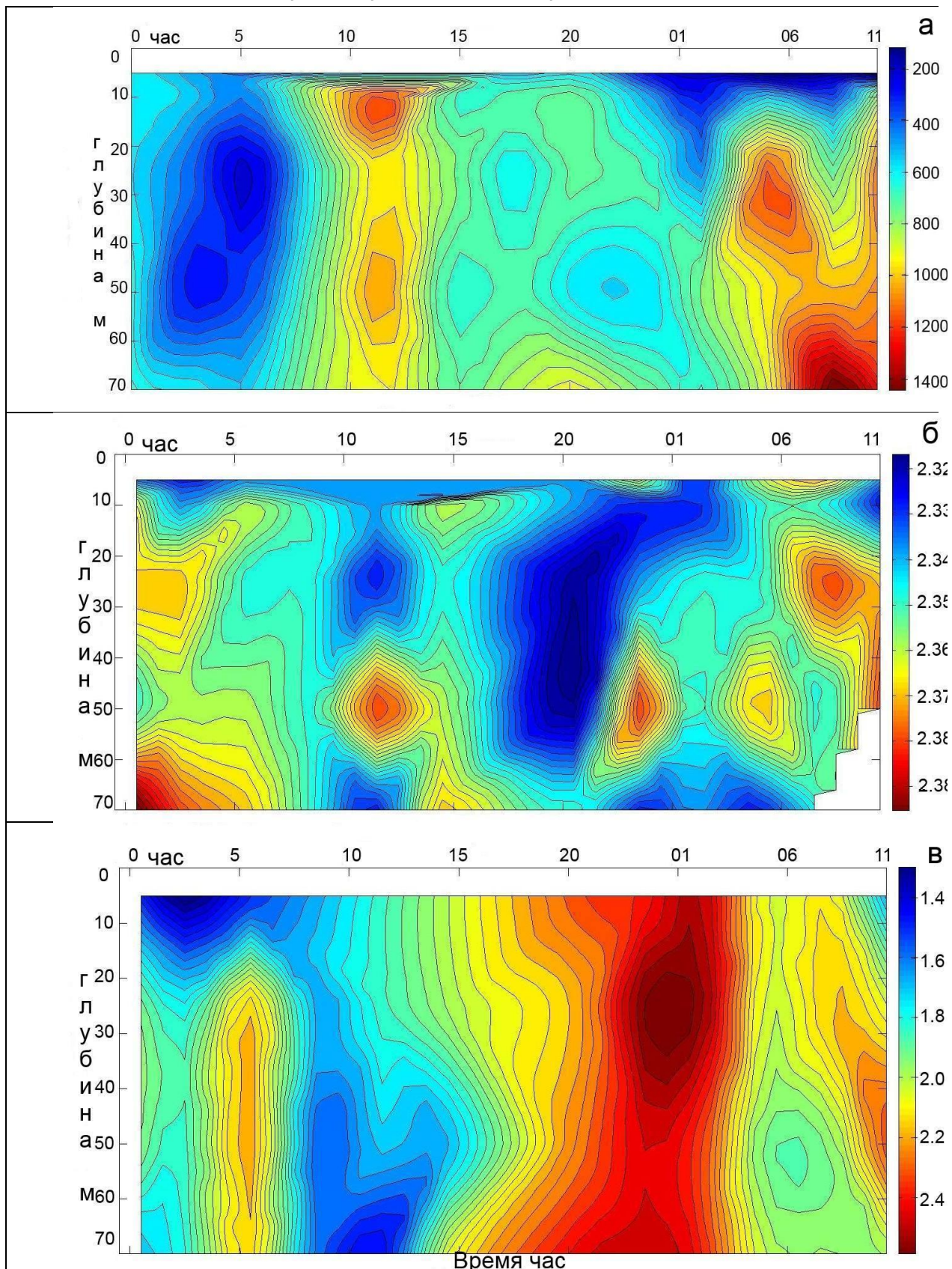


Рис. 1 Изолинии: а – кавитационной прочности  $P_{mk}$ ; б– щелочности  $Alk$ ; в – суммы  $CO_2$ .



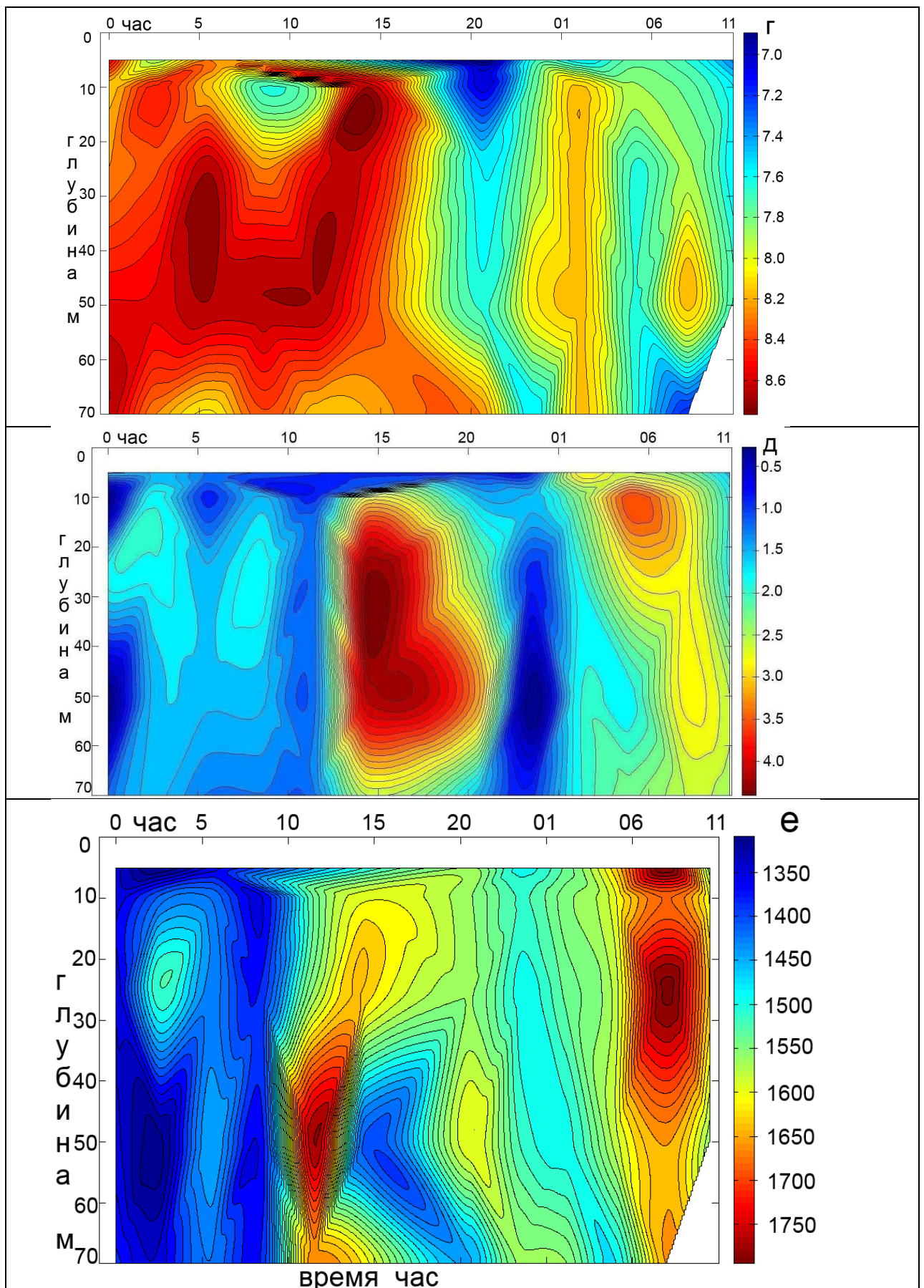


Рис. 1 продолжение. Изолинии: г – содержание фосфатов; д – содержание нитритов; е – содержание кремния.

углекислоты ( $\Sigma CO_2$ ):  $CO_2 + H_2CO_3$  и концентрация  $Ca$ . Карбонатная система связана со многими природными процессами, протекающими в морских водах. В первую очередь,

*Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов*

это процессы фотосинтеза, то есть выделение кислорода  $O_2$  и поглощение углекислого газа  $CO_2$ , окисление органического вещества, то есть поглощение кислорода  $O_2$  и выделение углекислого газа  $CO_2$ , растворение карбонатов ( $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ ) и осаждение карбонатов ( $Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow H_2O + CaCO_3 + CO_2$ ).

Изменчивость элементов карбонатной системы позволяет судить об изменчивости жизнедеятельности планктона и может опосредованным образом отражать наличие в морской воде зародышей кавитации.

Рассмотрим пример изменчивости ВКП морской воды и некоторых элементов карбонатной системы. На рис. 1 приведены результаты измерений вышеперечисленных параметров на суточной станции, проведенной в 14 рейсе НИС «Академик Александр Виноградов» 9 – 10 апреля 1989 года в точке с координатами  $42.4^\circ N$  и  $152.1^\circ E$ . На этом рисунке приведены изолинии перечисленных параметров; по оси  $x$  отложено время в часах, по оси  $y$  отложена глубина в метрах. Ночью с 0 до 5-7 часов ПВК  $P_{mk}$  (рис. 2. а) на всех глубинах имеет небольшую величину, от 200 до 300 относительных единиц. Практически отсутствует зависимость от глубины (от статического давления). Этот факт можно объяснить только присутствием во всей толще воды достаточно крупных (резонансных для частоты излучателя 10 кГц) пузырьков. Щелочность  $Alk$ , мг-экв/л, в этот период времени неравномерно изменяется по глубине от минимального значения 2.32 на глубинах 5 – 7 м до 2.38 на глубинах порядка 60 – 70 м. (рис. 2, б) Концентрация свободной углекислоты  $\Sigma CO_2$ , ммоль/л, незначительно изменяется с глубиной, оставаясь достаточно малой, порядка 1.4 – 1.6, ммоль/л, в период с 0 до 4 часов (рис. 2, в). В районе 5 часов её концентрация возрастает до 2.1, ммоль/л на глубинах от 20 до 70 м. В период времени с 7 до 14 часов распределение всех трех параметров существенно меняется. Величина ПВК резко возрастает. Причем, наибольший рост ( $P_{mk} \approx 1200$ ) происходит на сравнительно небольших глубинах от 5 до 20 м. На глубинах от 20 до 70 м величина ПВК в 1.3 раза меньше чем на небольших глубинах ( $P_{mk} \approx 1000$ ). Такая инверсия величины ПВК, по всей видимости, связана с тем, что с малых горизонтов планктон весь ушел на глубину, а на горизонте 20 – 70 м какая-то небольшая часть планктона осталась. Время с 14 до 01 часа следующих суток характеризуется достаточно однородным распределением величины кавитационной прочности от глубины. Величины  $P_{mk}$  изменяются от 500 до 700 относительных единиц. Начиная с 22 часов, величина кавитационной прочности в приповерхностном слое (10- 20 м) начинает падать. В это время меняются погодные условия. Волнение моря увеличивается от 2 до 4 баллов, а ветер увеличивается от 5 до 15 м/с. Это приводит к значительному обогащению приповерхностного слоя моря пузырьками [13] и, соответственно, к уменьшению величины кавитационной прочности морской воды в этом слое. Начиная с рассвета планктон опять уходит на глубину и величина кавитационной прочности значительно возрастает (время от 5 до 11 часов, вторые сутки измерений). Щелочность и концентрация свободной углекислоты также в эти периоды времени значительно меняются.

Таким образом можно условно выделить четыре периода времени суток в течении которых происходит существенное изменение величины, как кавитационной прочности, так и элементов карбонатной системы.

*Биогенные элементы.* Биогенные химические элементы, находящиеся в водах океана и активно участвующие в геохимических и биохимических процессах, составляют исходную материальную базу биологической продуктивности. Основу пищевых цепей, функционирующих в морских экосистемах в подавляющем большинстве случаев составляет органическое вещество, образованное фитопланктоном в процессе фотосинтеза. Для существования фитопланктона необходимы солнечный свет и биогенные элементы. Одну из групп биогенных элементов образуют элементы, находящиеся в водах океана в малых количествах, но столь важные для новообразования

органического вещества и столь интенсивно потребляемые в процессе фотосинтеза, что нередко оказываются лимитирующими для развития живых организмов. Это в первую очередь азот, фосфор, кремний. Поэтому знание концентрации этих элементов может служить некоторым индикатором концентрации зоопланктона. На рис. 1, г, д, е приведены изолинии концентрации следующих биогенных элементов: г – фосфаты  $PO_4$ , мкг/л; д – нитриты  $NO_2$ , мкг/л; е – кремний  $Si$ , мкг/л. Как и в случае карбонатной системы изменчивость концентрации нитритов и кремния можно условно разбить на четыре временные интервалы, в случае с концентрацией фосфатов изменчивость носит более сложный характер.

Корреляционные связи ВКП и различными параметрами морской воды

При проведении экспериментальных работ в море по возможности вместе с величиной КП измерялись различные параметры морской воды: температура  $T^{\circ}C$ , соленость  $S\%$ , концентрация кислорода  $O_2$ , мл/л,  $O_2\%$ , концентрация азота  $N_2$ , мл/л,  $N_2\%$ , общее газосодержание  $V$ , мл/л,  $V\%$ , концентрация взвеси  $C_0$ , мг/м<sup>3</sup>, концентрация мелкой взвеси  $C_m$ , мг/м<sup>3</sup>, концентрация крупной взвеси  $C_k$ , мг/м<sup>3</sup>, концентрация биовзвеси  $C_{био}$ , мг/м<sup>3</sup>, концентрация биомассы на глубине 10 м  $m_{10}$ , мг/м<sup>3</sup>, концентрация биомассы в слое 0 – 15 м  $m_{сл}$ , мг/м<sup>3</sup>, общая щелочность  $Alk$ , мг-экв/л, кислотность  $pH$ , активность ионов водорода  $\alpha_{H^+}$ , общее содержание неорганического углерода  $\Sigma CO_2$ , ммоль/л и некоторые другие.

Анализ экспериментальных данных показал, что существуют глубокие различия статистических связей величины КП с параметрами морской воды для различных районов Мирового океана.

Можно выделить два типа районов. Первый – это широтные разрезы, где идет пересечение различных водных масс, когда измерения проводятся от высоких широт до тропиков, и второй – это компактные районы измерений (полигоны или суточные станции, когда судно лежит в дрейфе в течение нескольких суток). В таблице 1 приводятся коэффициенты корреляции  $r$  и достоверность в процентах  $D$  для первого типа, а в таблице 2 и в таблице 3 для второго типа. Необходимо отметить, что для широтных разрезов существует статистически достоверная связь величины КП с концентрацией кислорода, концентрацией азота, общим газосодержанием и с температурой. Коэффициент корреляции с температурой положителен, что означает рост величины КП с ростом температуры. Однако лабораторные эксперименты утверждают обратное – с увеличением температуры величина КП падает. Кажущееся противоречие устраняется, если учесть тот факт, что в морской воде рост температуры приводит к уменьшению общего газосодержания. Коэффициенты корреляции с соленостью и с прозрачностью малы. Необходимо отметить, что корреляционная связь величины КП с температурой, общим газосодержанием, концентрацией кислорода и азота, для ограниченных выборок (таблицы 2, 3) отсутствует, как и связь с концентрацией различного вида взвесей и прозрачностью. Это связано, по всей видимости, с их малой изменчивостью в этих районах. Таким образом, лишь усредненная глобальная изменчивость величины КП связана с усредненными глобальными изменениями газосодержания и температуры. Эта зависимость является фоном на который накладывается мелкомасштабная пространственная изменчивость величины КП. Исследование статистических связей величины КП морской воды с её карбонатной системой показало, что для районов №1-№3, ограниченных в пространстве и во времени (таблица 3), величина КП наилучшим образом коррелирует с общей щелочностью  $Alk$ , щелочно-хлорным коэффициентом  $Alk / Cl$  и с суммой неорганического углерода  $\Sigma CO_2$ . Статистическая взаимосвязь величины КП с кислотностью  $pH$  и с активностью ионов водорода  $\alpha_{H^+}$  полностью отсутствует.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции									
H м		V мл/л	N <sub>2</sub> мл/л	N <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> мл/л	T°С	S ‰	$\alpha$
10	r	- 0.48	- 0.39	0 .2	- 0.46	- 0.53	0.34	0. 12	- 0.24
	D	97 .5	90		95	97.5	95		75

Таблица

2

Коэффициенты корреляции									
H= 10м	V мл/л	O <sub>2</sub> мл/л	N <sub>2</sub> мл/л	C мг/л	C <sub>m</sub> см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	C <sub>k</sub> см <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	C <sup>био</sup> мг/м	T° С	S‰
r	- 0,1	0, 06	- 0,29	- 0,22	- 0,18	- 0,18	- 0,07	- 0,02	0,52
D	-	-	90	9 0	75	75	-	-	99,5

Таблица

3

Коэффициенты корреляции									
H= 15 м	A лк	Al к/Cl	T° С	S ‰	O <sub>2</sub> мл/л	$\Sigma CO_2$	CO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Ca	Ca/ Cl
1	0. 48	0.3 9	0. 32	0. 14	0.04	0.41	- 0.39	0. 51	0.50
	9 7.5	95	90	-	-	95	95	90	90
2	0. 55	0.5 5	- 0.12	0. 22	0.016	0.22	- 0.05	0. 15	0.15
	9 0	97. 5	-	75	-	75	-	-	-
3	0. 75	0.7 9	- 0.34	- .047		0.83	0.13	-	-
	9 5	95	75	75		97.5	-	-	-

Коэффициенты корреляции величины кавитационной прочности морской воды с концентрацией биогенных элементов приведены в Таблице 4

Таблица 4

H=70 м	T em	S%	PH	$\Sigma CO_2$	NO	PO	Si
Pmk	0. 3	0.2 7	0.1 1	0.45	0.1 3	- 0.53	- 0.25

Величина ВКП определяется и постоянным присутствием в жидкости зародышей кавитации в виде газовых пузырьков и твердых частиц. Под воздействием звукового поля микророзродыши увеличивают размер и превращаются в нестационарные кавитационные

полости. На пространственное распределение зародышей и скорость их роста оказывают влияние физические и химические свойства морской воды, которые определяются районированием гидрологии и водных масс, сезонными изменениями, течениями, зонами дивергенции и конвергенции. Идентификация водных масс по ВКП хорошо согласуется с традиционным районированием и разделением водных масс по гидрологическим характеристикам.

Наблюдается глобальное (широтное) распределение ПВК, для которого характерны устойчивые корреляционные связи с газосодержанием и температурой.

#### **Список литературы:**

- [1]. Акуличев В.А., Ильичев В.И. // Акуст. журн. 2005. **51**, №2. С. 167.
- [2]. Мельников Н.П., Елистратов В.П. // Акуст. ж., 2017. **63**, №2. С. 187.
- [3]. Перник А.Д. Проблемы кавитации. Судостроение. Л., 1966.
- [4]. Мельников Н.П., Резников Б.И. // Труды конгресса «Великие реки 2017», выпуск 6, 2017 год, секция XIII физика.
- [5]. Буланов В.А. Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей // Дальнаука. Владивосток, 2001
- [6]. Планктон Тихого океана под ред. Г.И. Семина. Наука. М., 1968.

### **ABOUT THE RELATIONSHIP OF CAVITATION THRESHOLDS WITH CARBONATE SYSTEM AND BIOGENIC PARAMETERS OF SEA WATER**

N.P. Melnikov, B.I. Reznikov

*Key words: cavitation strength of sea water; carbonate system of sea water; biogenic elements of sea water*

*In the present work, on the basis of the experimental work on the measurement of the values of cavitation thresholds and other parameters of sea water in different areas of the world ocean, a statistical relationship with the concentration of WCP nutrients and some elements of the carbonate system is established.*