

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАВИТАЦИОННОГО ПОРОГА МОРСКОЙ ВОДЫ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2024 г. Н. П. Мельников

*Волжский государственный университет водного транспорта,
ул. Нестерова 5, Нижний Новгород, 603950 Россия*

e-mail: melnikov50@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2023 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 19.06.2024 г.

Приводятся и обсуждаются результаты измерений кавитационных порогов и некоторых гидрологических и гидрохимических параметров морской воды в различных районах Мирового океана. Показана устойчивая временная изменчивость величины кавитационных порогов на временных масштабах нескольких суток. Выявлена суточная, полусуточная и другие периодичности изменения величины кавитационных порогов.

Ключевые слова: порог кавитации, кавитационная прочность морской воды

DOI: 10.31857/S0320791924040112 EDN: XFFTJWJ

1. ВВЕДЕНИЕ

Понижение давления в жидкости приводит к появлению в ней мельчайших пузырьков и каверн, движение которых под действием неоднородных полей давления порождает большое количество явлений, называемых кавитацией. Теоретические расчеты показывают, что разрыв абсолютно чистой жидкости происходит при очень больших напряжениях, порядка 1400 кг/см^2 [1]. Разрыв реальных жидкостей происходит при напряжениях порядка нескольких атмосфер. Максимальное значение этой величины получил Бриггс — от 260 до 270 атм, благодаря особо тщательной очистке воды [2]. В современной литературе принято считать, что такое значительное расхождение значений критических напряжений обусловлено присутствием в жидкости мельчайших неоднородностей, обычно называемых «зародыши кавитации» [3–6]. Зародышами кавитации могут быть мельчайшие пузырьки, гидрофобные твердые взвеси и другие неоднородности. При приложении к жидкости растягивающего напряжения «зародыши кавитации» превращаются в пузырьки и каверны. Таким образом, невозмущенная жидкость имеет некую прочность на разрыв, обычно называемую кавитационной прочностью жидкости.

Кавитация возникает при достижении в жидкости некоторого критического напряжения. Кроме того, любое воздействие на жидкость приводит к изменению её физических, химических и других свойств. Поэтому говорят о «кавитационном пороге» жидкости, который зависит не только от свойств невозмущенной жидкости, но и от способа её возмущения [7]. Акустическая волна в жидкости достаточно высокой интенсивности может инициировать в ней кавитацию (акустическая кавитация). Понижение давления в потоках жидкости также приводит к появлению кавитации (гидродинамическая кавитация). Многочисленные кавитационные явления, такие как: кавитационная эрозия поверхностей, вблизи которых возникает кавитация, сонолюминесценция — излучение акустических и ударных волн, направленная диффузия, коагуляция пузырьков под действием сил Бьеркнеса, градиентная коагуляция пузырьков и др. имеют пороговый характер. Поэтому различают несколько видов порогов кавитации: порог «направленной» диффузии, порог градиентной и Бьеркнесовской коагуляции, порог динамической устойчивости (порог «газовой» кавитации), порог статической устойчивости (порог «паровой» кавитации). Пороги «газовой» и «паровой» кавитации связаны с различными видами пульсаций

пузырьков в акустическом поле. Все эти процессы фиксируются экспериментальными методами.

Критерии возникновения кавитации и методики измерения порога кавитации описаны в работах [7–9]. Многочисленные экспериментальные и теоретические работы, обзор которых приведен в [6], показывают, что величина кавитационных порогов зависит от концентрации и распределения по размерам зародышей кавитации.

В нашей работе мы исследуем величину порога акустической кавитации при потере динамической устойчивости пузырьков, пульсирующих под воздействием акустического поля (порог «газовой» кавитации). В качестве критерия возникновения кавитации используется появление акустического шума выше некоторой критической величины [8].

Натурные измерения кавитационных порогов морской воды проводились с учетом того, что кавитационная прочность является случайной величиной [8].

Экспериментальная установка для измерения кавитационных порогов морской воды в натурных условиях позволяет:

- обеспечить единство методики измерения кавитационного порога в различных экспериментах;
- обеспечить постоянную относительную ошибку измерения величины кавитационного порога исследуемой жидкости;
- максимально сократить время измерения и свести к минимуму воздействие измерительной системы на величину кавитационной прочности жидкости [8].

Натурные измерения кавитационных порогов (КП) морской воды P_{mk} в различных районах Мирового океана показали, что существуют как пространственная, так и временная изменчивость ее величины [7, 10–18]. Сезонная изменчивость величины P_{mk} обсуждается в [10]. Установлено, что в высокоширотных районах (севернее широты 40°N) пороги кавитации P_{mk} летом в июле выше, чем весной в марте. Для более южных широт вплоть до экватора проявляется другая закономерность — величины P_{mk} в весенний период выше, чем в летний период. В работах [16, 18] были проведены исследования суточной изменчивости P_{mk} . Исследования проводились в открытой части Атлантического океана, в заливе Петра Великого Японского моря и в дельте реки Меконг. В открытой части Атлантического океана были установлены: средняя суточная периодичность изменения P_{mk} , а также средняя периодичность порядка 8, 3.0 и 1.5 ч. В районе

залива Петра Великого установлена средняя суточная периодичность изменчивости P_{mk} , а также более короткая периодичность порядка 14.3, 7.6, 6.0, 2.6, 1.5 и 1.08 ч. В дельте реки Меконг изменчивость обусловлена приливными явлениями и в среднем составляет 24 ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных измерений порогов акустической кавитации, полученные в 11 и 14 рейсах НИС «Академик Александр Виноградов». Все измерения величины кавитационных порогов были проведены на частоте 10 кГц. Полученные экспериментальные значения параметров морской воды были сведены в таблицу с указанием номера станции, горизонта, даты и времени измерения, широты и долготы, силы ветра и волнения. Измерения величины кавитационных порогов и параметров морской воды проводились одновременно.

В 11 рейсе НИС «Академик Александр Виноградов» был сделан разрез по 150°E от 4°S до 4°N для глубин от 2 до 25 м, а также несколько суточных станций с координатами: станции № 1181 — $94^\circ10'\text{E}$, $1^\circ05'\text{S}$; № 1183 — $104^\circ09'\text{E}$, $4^\circ04'\text{S}$; № 1184 $134^\circ24'\text{E}$, $9^\circ58'\text{S}$; № 1185 — $144^\circ48'\text{E}$, $6^\circ04'\text{S}$.

Разрез был проведен в период времени с 19.03.1988 г. по 21.03.1988 г. На рис. 1а–1б для разреза приведены изолинии величины кавитационных порогов P_{mk} . Па. Пространственная изменчивость кавитационных порогов P_{mk} (рис. 1а) при проходе с юга на север имеет волнообразный характер: на широтах от 3°S до $2^\circ40'\text{S}$; от $01^\circ40'\text{S}$ до $01^\circ20'\text{S}$; от 0.4°S до 0.4°N ; от 01°N до $01^\circ40'\text{N}$; от $01^\circ50'\text{N}$ до $01^\circ58'\text{N}$; от 03°N до $03^\circ50'\text{N}$ наблюдается максимум значений кавитационных порогов. На глубине 25 м P_{mk} изменяется в пределах от 2.8×10^5 до 3.5×10^5 Па, причем идет плавное уменьшение величины P_{mk} при движении судна на север. Соответственно, на широтах между этими значениями наблюдаются минимумы величины кавитационных порогов: на глубине 25 м от 2.2×10^5 до 2.4×10^5 Па. Изменчивость P_{mk} с глубиной имеет классический характер: увеличивается с увеличением глубины без инверсий. Кроме того, эта изменчивость носит явный периодический по пространству характер.

Изменчивость температуры и солёности по пространству и во времени в этом районе крайне незначительна. Изменчивость же кавитационных порогов существенна и составляет на глубине 25 м около 25%. Изменчивость щёлочности по

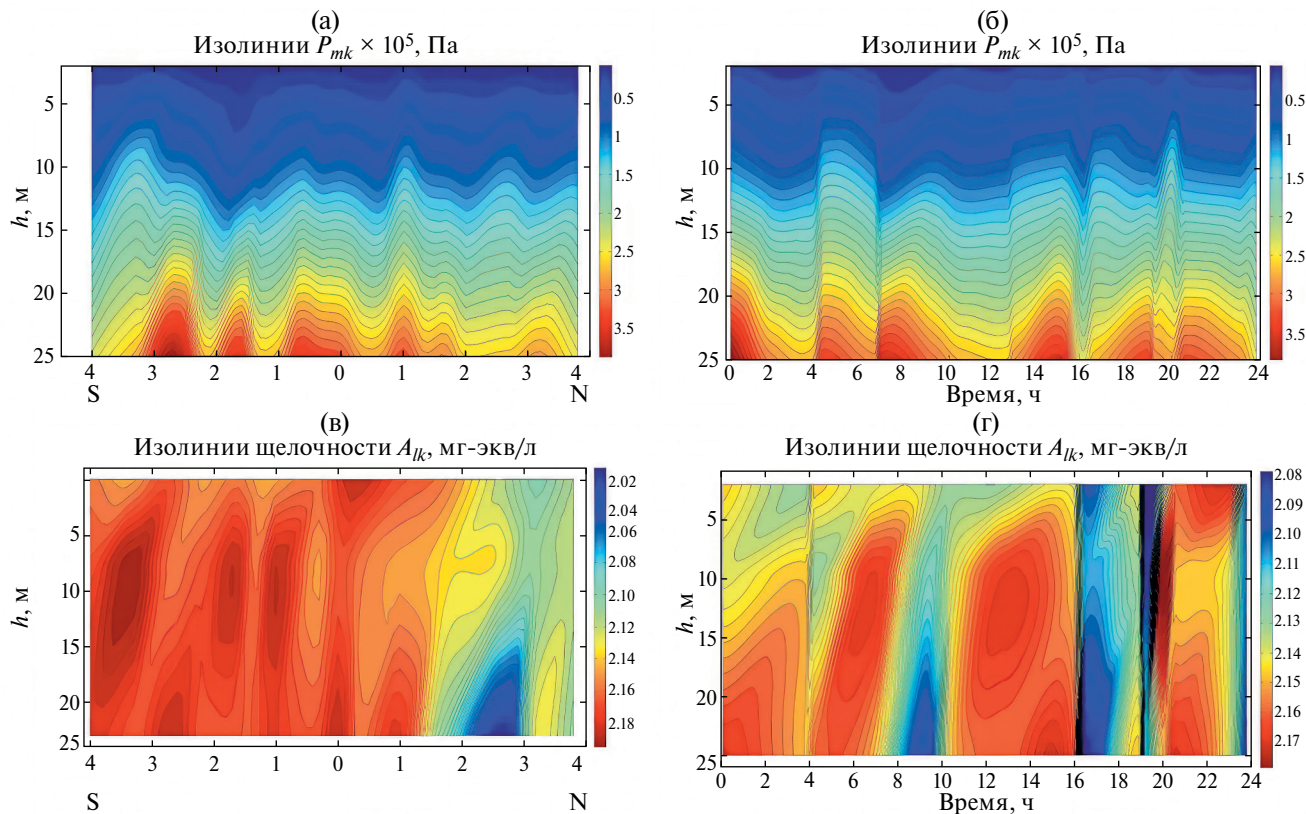


Рис. 1. (а), (в) — Пространственная изменчивость. Изолинии: (а) — КП, $P_{mk} \times 10^5$ Па; (в) — щелочность, A_{ik} , мг-экв/л; по оси абсцисс отложена широта в градусах. По оси ординат отложена глубина в метрах. (б), (г) — Временная изменчивость. Изолинии: (б) — КП, $P_{mk} \times 10^5$ Па; (г) — щелочность, A_{ik} , мг-экв/л; по оси абсцисс отложено время в часах. По оси ординат отложена глубина в метрах.

пространству (рис. 1б) также имеет периодический характер в районе от 4°S до 2°N . Севернее величина щелочности уменьшается и имеет «изрезанный» характер по широте и глубине. Такое распределение величин кавитационных порогов и щелочности по пространству наводит на мысль о существенном влиянии на их величину временного фактора (времени суток). Чтобы выяснить существование такой зависимости, были построены временные ряды величины кавитационных порогов щелочности в пределах от 00.0 до 24.0 ч. Эти зависимости приведены на рис. 1в–1г. На них можно выделить несколько характерных периодов: для $P_{mk} \sim 8$ ч, ~ 4 ч, ~ 3 ч; для $A_{ik} \sim 8$ ч, ~ 5 ч, 2.5 ч.

На рис. 2 приведены зависимости величины кавитационных порогов P_{mk} , Па от времени суток T , час для суточных станций №№ 1181, 1183 и 1184 на глубине $h = 10$ м.

Рассмотрим временную изменчивость P_{mk} на станции № 1181. Начало работ на станции —

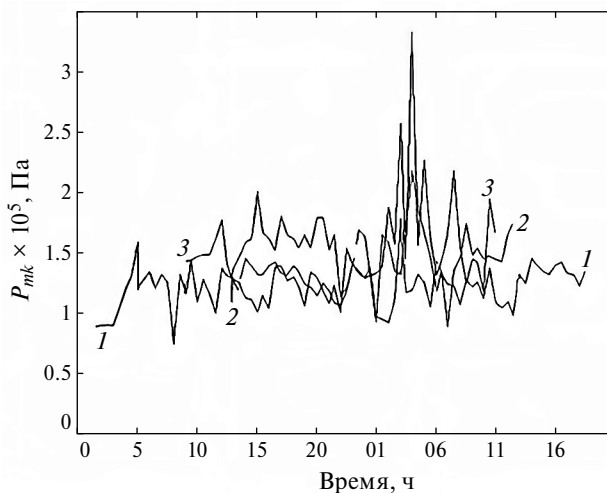


Рис. 2. Зависимость величины КП, $P_{mk} \times 10^5$ Па от времени в часах. Кривая 1 — станция № 1181; Кривая 2 — станция № 1183; Кривая 3 — станция № 1184. Глубина 10 м.

21.02.1988 г. с 01.5 ч. Окончание работ — 22.02.1988 г., 18.5 ч. Интервал измерений 0.5 ч. Временная зависимость P_{mk} для станции № 1181 (кривая 1) имеет несколько характерных периодов ~24 ч, ~15 ч, ~7 ч и ~5 ч. Рассмотрим подробно характер изменчивости P_{mk} . С $T = 1.5$ ч до $T = 5.0$ ч наблюдается возрастание P_{mk} с малой величины 0.89×10^5 Па до 1.37×10^5 Па. Затем до $T = 11.5$ ч величина кавитационных порогов осциллирует около величины 1.2×10^5 Па. С $T = 12.0$ ч до $T = 18.5$ ч в среднем величина кавитационных порогов увеличивается, достигая максимального значения $P_{mk} = 1.35 \times 10^5$ Па в $T = 18.0$ ч. С $T = 18.5$ ч до $T = 22.0$ ч величина кавитационных порогов уменьшается с $P_{mk} = 1.32 \times 10^5$ Па до $P_{mk} = 1.10 \times 10^5$ Па. В $T = 23.0$ ч имеет место увеличение P_{mk} до 1.30×10^5 Па и затем идет некоторое плато со средней величиной $P_{mk} = 1.35 \times 10^5$ Па до момента времени $T = 1.0$ ч. Такая суточная изменчивость повторяется и для вторых суток измерений. Для массива измерений с $T = 1.5$ ч до $T = 18.5$ ч первых суток и для массива измерений вторых суток коэффициент корреляции равен 0.52.

Станция № 1183 (кривая 2) была проведена 12.03.1988 г. с $T = 12.5$ ч по $T = 14.0$ ч 13.03.1988 г. Интервал измерений 0.5 ч. Временная зависимость P_{mk} имеет характерные периоды ~24 ч, ~13 ч, ~8 ч и ~5 ч. В период времени с $T = 12.5$ ч до $T = 15.0$ ч величина кавитационных порогов плавно увеличивается с $P_{mk} = 1.21 \times 10^5$ Па до $P_{mk} = 1.76 \times 10^5$ Па. Затем величина кавитационного порога уменьшается до $P_{mk} = 1.6 \times 10^5$ Па и осциллирует от минимальных величин $P_{mk} = 1.6 \times 10^5$ Па и $P_{mk} = 1.57 \times 10^5$ Па до максимальных величин $P_{mk} = 1.68 \times 10^5$ Па и $P_{mk} = 1.71 \times 10^5$ Па до момента времени $T = 20.0$ ч. Затем, в течении двух с половиной часов величина кавитационной прочности спадает до величины $P_{mk} = 1.25 \times 10^5$ Па ($T = 22.5$ ч). Затем величина P_{mk} совершает две осцилляции и в момент времени $T = 04.0$ ч достигает величины $P_{mk} = 1.91 \times 10^5$ Па, после чего идет уменьшение ее величины и в момент времени $T = 07.0$ ч P_{mk} достигает минимального значения $P_{mk} = 1.14 \times 10^5$ Па за весь период измерения. Затем идет подъем до величины $P_{mk} = 1.58 \times 10^5$ Па ($T = 10.0$ ч) и некоторые колебания около величины $P_{mk} = 1.45 \times 10^5$ Па до момента времени $T = 3.5$ ч. Завершаются измерения в $T = 14.0$ ч величиной кавитационного порога $P_{mk} = 1.45 \times 10^5$ Па.

Станция № 1184 (кривая 3) была проведена 15.03.1988 г. с $T = 09.00$ ч по $T = 11-30$ ч 16.03.1988 г. с интервалом 0.5 ч. С 09-00 до 12-00 идет увеличение P_{mk} с 1.43×10^5 Па до 1.77×10^5 Па, после чего

начинается спад до 1.01×10^5 Па, который заканчивается в 15-00 ч. Затем идет несколько «осцилляций» P_{mk} небольшой «амплитуды» и с периодом около 7 ч. Начиная с 00-30 до 03-30, идет резкое возрастание P_{mk} с 1.30×10^5 Па до 2.56×10^5 Па. Затем спад до 1.45×10^5 Па ($T = 04-00$ ч) и подъем до 3.32×10^5 Па ($T = 04-30$ ч), снова спад ($P_{mk} = 1.58 \times 10^5$ Па) и подъем ($P_{mk} = 2.56 \times 10^5$ Па). С 05-30 до 07-30 ч начинается уменьшение с $P_{mk} = 2.56 \times 10^5$ Па до 1.65×10^5 Па. Затем в 08-00 ч выброс до $P_{mk} = 2.17 \times 10^5$ Па, и далее до 11-30 спад с небольшими осцилляциями до $P_{mk} = 1.62 \times 10^5$ Па. Для станции № 1184 можно выделить периоды ~24 ч, ~16 ч, ~7 ч.

Для выявления мелкомасштабной временной изменчивости были проведены измерения с интервалом 10 минут на станции № 1185 на горизонте 25 м. Результаты измерения приведены на рис. 3. Измерения начались с 08-55 ч и продолжались по 17-45 ч. Отметим достаточно большой разброс значений P_{mk} на всем временном интервале измерений. Дисперсия каждого значения P_{mk} изменяется в пределах от 0.85×10^5 до 3.33×10^5 . В начале измерений наблюдаются три осцилляции с периодом около одного часа. Весь процесс продолжается с 09-05 до 11-35. В 11-45 наблюдается максимальное значение $P_{mk} = 9.94 \times 10^5$ Па, затем в 11-55 уменьшение $P_{mk} = 3.00 \times 10^5$ Па. Далее идет монотонное увеличение P_{mk} в течении 40 минут от $P_{mk} = 3.00 \times 10^5$ Па до $P_{mk} = 6.84 \times 10^5$ Па. После чего в течении трех часов с 12-35 по 15-45 с интервалом 10 минут идут колебания порогов от величины

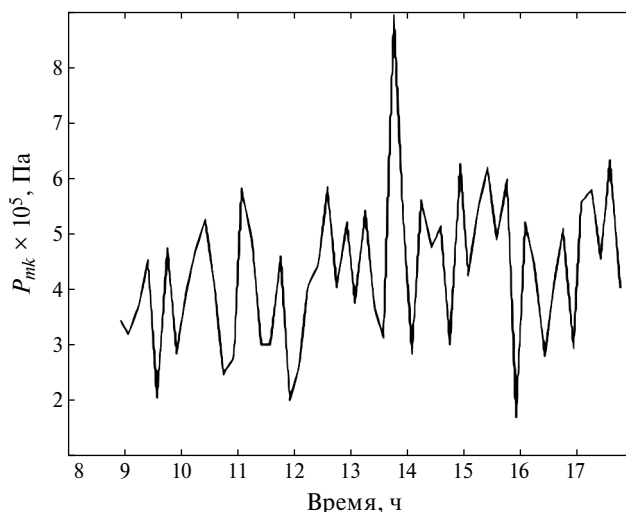


Рис. 3. Зависимость величины КП, $P_{mk} \times 10^5$ Па от времени в часах. Станция № 1185. Глубина 25 м.

$P_{mk} = 6.84 \times 10^5$ Па до $P_{mk} = 3.83 \times 10^5$ Па. Затем в 15–55 величина кавитационного порога достигает минимального значения $P_{mk} = 2.70 \times 10^5$ Па и делает три осцилляции с периодом около 30 минут со значительным колебаниями величины от $P_{mk} = 2.70 \times 10^5$ Па до $P_{mk} = 7.31 \times 10^5$ Па.

В 14 рейсе НИС «Академик Александр Виноградов» с целью изучения временной зависимости величины кавитационных порогов были проведены четыре суточных станции: станция № 1430, начало 07.04.1989 г., 14-00; окончание 10.04.1989 г., 20-45, координаты 42°N, 152.2°E; станция № 1457, начало 20.04.1989 г., 03-55, окончание 21.04.1989 г., 08-00, координаты 15,0°N, 140°E; станция № 1469, начало 27.04.1989 г., 22-00, окончание 28.04.1989 г., 19-20, координаты 19.17°N, 129°E; станция № 1472, начало 30.04.1989 г., 18-00, окончание 01.05.1989 г., координаты 20.27°N, 127.3°E.

Рассмотрим суточную изменчивость P_{mk} и других параметров морской воды: общее содержание неорганического углерода ΣCO_2 , ммоль/л, общую щелочность A_{lk} , мг-экв/л, концентрацию биогенных элементов — нитриты NO_2 , мкг/л; фосфаты PO_4 , мкг/л; кремний Si, мкг/л, а также температуру T , °C, соленость S , ‰ и общее газосодержание V , мл/л на станции № 1430. Это район субарктической водной массы находится в субарктической фронтальной зоне Тихого океана [7]. На рис. 4 приведены изолинии этих параметров на глубинных разрезах от 5 м до 70 м. Изменчивость величины P_{mk} (рис. 4а) имеет несколько особенностей. В интервале 00-00...05-00 наблюдается инверсия величины P_{mk} с глубиной. Величина P_{mk} с глубиной практически не меняется и остается низкой, около 1.25×10^5 Па вплоть до глубины 55 м. Затем, с 08-35 и до 14-30 происходит резкое увеличение величины P_{mk} до 5×10^5 Па на глубине 10–20 м. А на больших глубинах величина P_{mk} увеличивается до величин около 4×10^5 Па. Таким образом, инверсия P_{mk} с глубиной продолжается, на небольших глубинах (около 10 м) величина P_{mk} значительна и уменьшается с глубиной. В интервале с 15-00 до 01-00 величина P_{mk} практически не меняется на всех глубинах и остается равной около 2.5×10^5 Па. В интервале с 01-00 до 05-00 величина P_{mk} на глубинах около 10 м остается небольшой (около 2×10^5 Па) и растет с увеличением глубины до 40 м до величин около 4.5×10^5 Па. А на больших глубинах опять уменьшается до 3.5×10^5 Па. И только в небольшом временном интервале с 7-00 до 10-00 следующих суток инверсия исчезает, и величина кавитационной прочности меняется с глубиной классическим

образом. Таким образом, в течение всего периода измерений происходит четыре значительных изменения величины кавитационных порогов, при этом наблюдается её инверсия с глубиной. Сравнение изменчивости кавитационной прочности с другими параметрами морской воды показало, что схожий характер имеет только временная изменчивость общего содержания неорганического углерода ΣCO_2 , ммоль/л, общей щелочности A_{lk} , мг-экв/л и концентрации кремния Si, мкг/л.

На рис. 5 приведены изолинии величин кавитационных порогов P_{mk} (рис. 5а, 5г, 5ж), изолинии общего содержания неорганического углерода ΣCO_2 , ммоль/л, (рис. 5б, 5д, 5з) и изолинии общей щелочности A_{lk} , мг-экв/л, (рис. 5в, 5е, 5и) для суточных станций № 1457 (рис. 5а–5в), № 1469 (рис. 5г–5е), № 1472 (рис. 5з–5и). Эти измерения проходили при выполнении НИС «Академик Александр Виноградов» меридионального разреза в Филиппинском море приблизительно от 15°N до 21°N и от 140°E до 126°E. Это район Северного пассатного течения. На трех станциях наблюдается инверсия величины кавитационных порогов с глубиной. Высокие величины P_{mk} перемежаются низкими значениями, причем низкие значения, как правило, наблюдаются в темное время суток, а высокие значения — в светлое время суток. Величина суммы неорганического значения углерода ΣCO_2 на станции № 1457 (рис. 5в) в светлое время суток (07-00...19-00 ч) имеет низкое значение, а в темное время суток (20-00...06-00 ч) высокое значение. На станции № 1469 имеем другой ход зависимости величины ΣCO_2 от времени. В светлое время суток с 09-00 до 16-00 ч величина ΣCO_2 превышает значения ΣCO_2 в темное время суток (2-00...08-00 ч) в 1.4 раза и достигает величины 2.3 ммоль/л. На станции № 1472 величины ΣCO_2 перемежаются с течением суток от значений 1.7 ммоль/л до 2.2 ммоль/л. Изменчивость во времени щелочности на станциях различна. На станции № 1457 от 04-00 до 01-00 ч следующих суток значения A_{lk} , мг-экв/л, минимальны и меняются слабо, с 02-00 до 07-00 ч значения A_{lk} , мг-экв/л вырастают на 4%. На станциях 1469 и станции 1472 изменчивость значения щелочности не превышает 4%.

С 28 мая по 7 апреля 1989 г. в Северо-западной части Тихого океана, в районе Субарктической фронтальной зоны в 14-м рейсе НИС «Академик Александр Виноградов» были проведены измерения кавитационных порогов, а также комплексные измерения различных параметров морской воды. В этом районе течение Кюросио и течение Оясио

движутся на восток параллельно друг другу. Границы между течениями подвижны и между течениями расположены субарктические и субтропические воды, которые в свою очередь разделяются вторичными фронтами. Таким образом, этот район имеет двухфронтальную структуру.

На рис. 6а, 6в, 6д, 6ж, 6и приведены изолинии величины кавитационной прочности на различных горизонтах. На этих рисунках проявляется двухфронтальная структура величины

кавитационной прочности. Необходимо отметить, что величина кавитационной прочности существенно меняется даже на близких горизонтах. Так, на горизонтах 70 и 50 м в северном участке района измерений имеется значительное различие. На горизонте 70 м имеют место повышенные значения кавитационной прочности. На горизонте 50 м область повышенных значений кавитационной прочности разделена узкой зоной пониженных значений кавитационной прочности. Глубины 10 м и

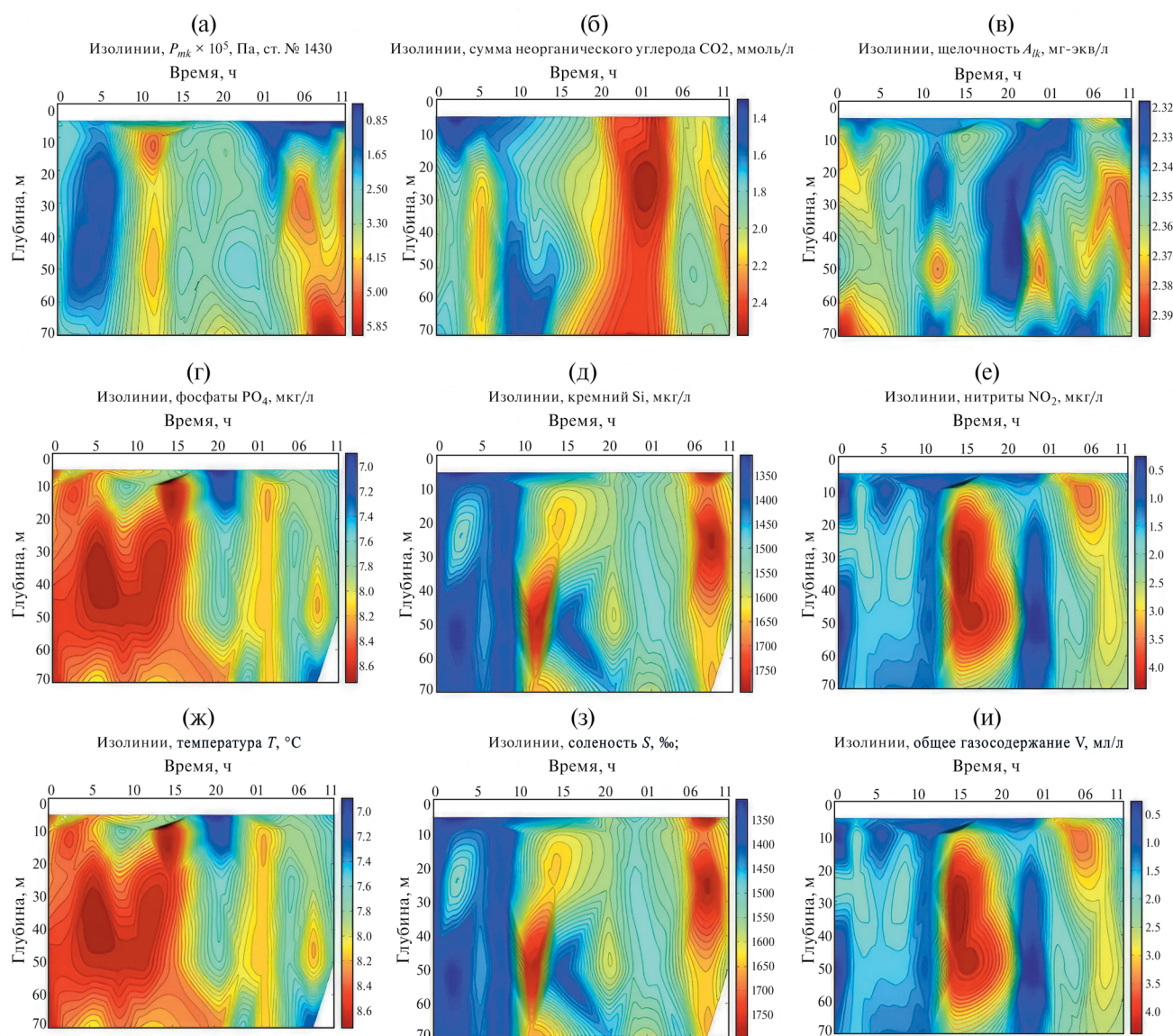


Рис. 4. Временная изменчивость. Станция № 1430. (а) — изолинии $P_{mk} \times 10^5$ Па; (б) — изолинии ΣCO_2 , ммоль/л; (в) — изолинии щелочности A_{alk} , мг-экв/л; (г) — изолинии фосфаты PO_4 , мкг/л; (д) — изолинии концентрации кремния Si , мкг/л, (е) — изолинии концентрации нитритов NO_2 , мкг/л; (ж) — изолинии температуры T , °C; (з) — изолинии солёности S , ‰; (и) — изолинии общего газосодержания V , мл/л. По оси абсцисс отложено время в часах. По оси ординат отложена глубина в м.

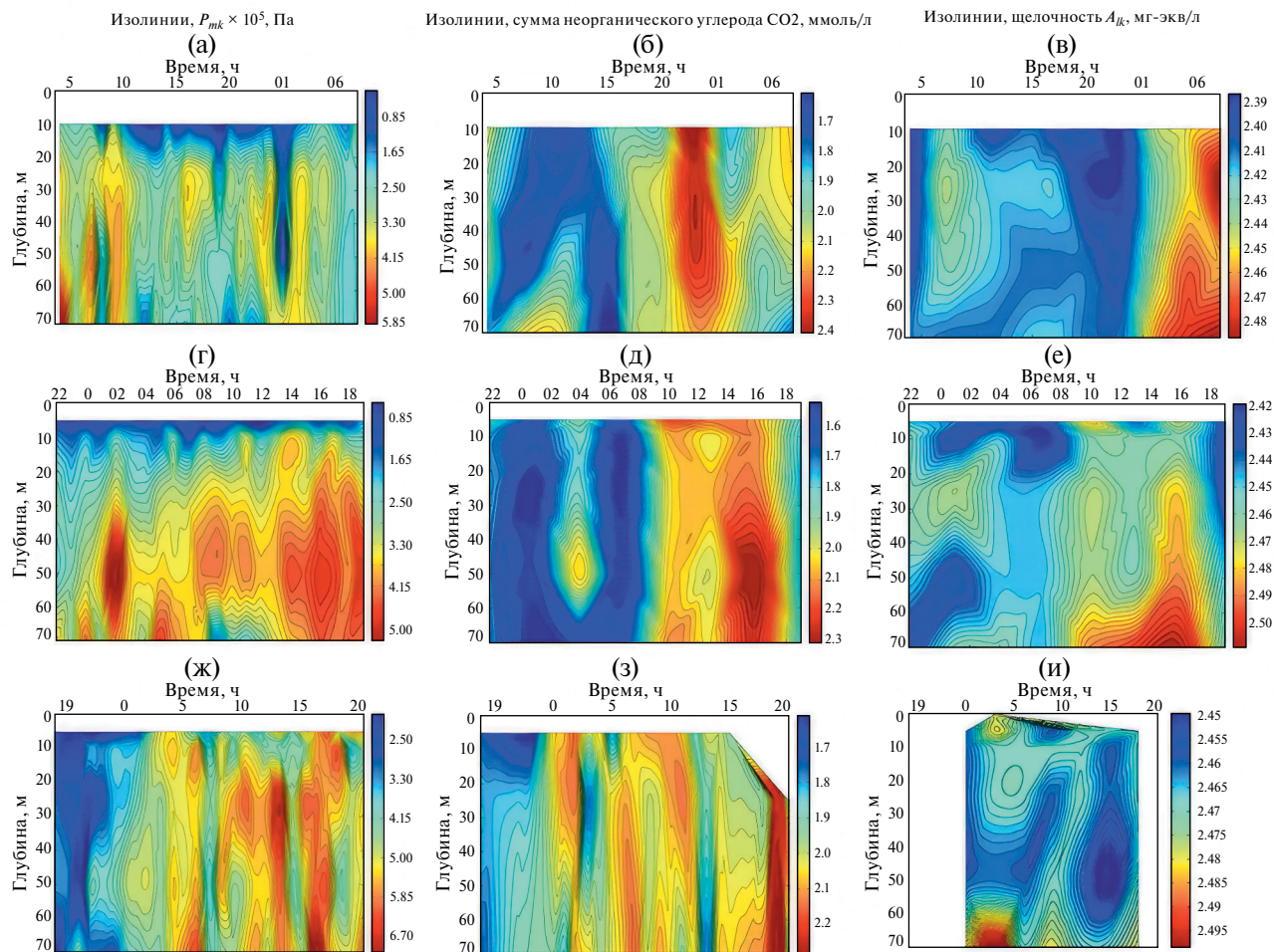


Рис. 5. Временная изменчивость. (а), (г), (ж) — изолинии $P_{mk} \times 10^5$ Па; (б), (д), (з) — изолинии ΣCO_2 , ммоль/л; (в), (е), (и) — изолинии щелочности A_k , мг-экв/л. (а), (б), (в) — Станция № 1457; (г), (д), (е) — станция № 1469; (ж), (з), (и) — станция № 1472. По оси абсцисс отложено время в часах. По оси ординат отложена глубина в м.

25 м в этой части района измерений представляют собой область повышенных значений кавитационной прочности. Северная и южная часть полигона имеют высокие значения кавитационной прочности. Между ними находится широкая полоса малых значений кавитационной прочности. Ширина полосы составляет от 37°N до 39°N. Представляется, что эта часть района измерений состоит из трансформированных вод субтропической и субарктической структур.

Концентрация зародышей кавитации в морской воде имеет суточную изменчивость и связана с суточной миграцией зоопланктона с глубины на поверхность и обратно. Этот процесс неизбежно приводит к временной изменчивости величины кавитационной прочности. Таким образом, и пространственная и временная изменчивость

величины кавитационной прочности накладываются друг на друга и образуют сложный суммарный характер ее изменчивости.

С целью выявления изменчивости кавитационной прочности во времени все полученные значения ее величины были распределены последовательно во времени от нуля до двадцати четырех часов. На рис. 6б, 6г, 6е, 6з, 6к приведены изолинии величин кавитационных порогов на глубинах: (г) — 10 м, (е) — 25 м, (з) — 50 м, (к) — 70 м. На этих рисунках можно отметить, что в некотором временном интервале от 10-00 до 16-00 ч на всех глубинах величины кавитационных порогов увеличиваются приблизительно в 3.5 раза. Изменчивость кавитационной прочности на всех глубинах носит крайне неоднородный характер. На глубине 70 м на широте от 37°N до 41°N тонкая полоса малых

значений прорезает область высоких значений кавитационной прочности. На глубине 50 м такие ярко выраженные неоднородности отсутствуют. На глубинах 25, 10 и 5 м область малых значений кавитационной прочности имеет больший временной интервал.

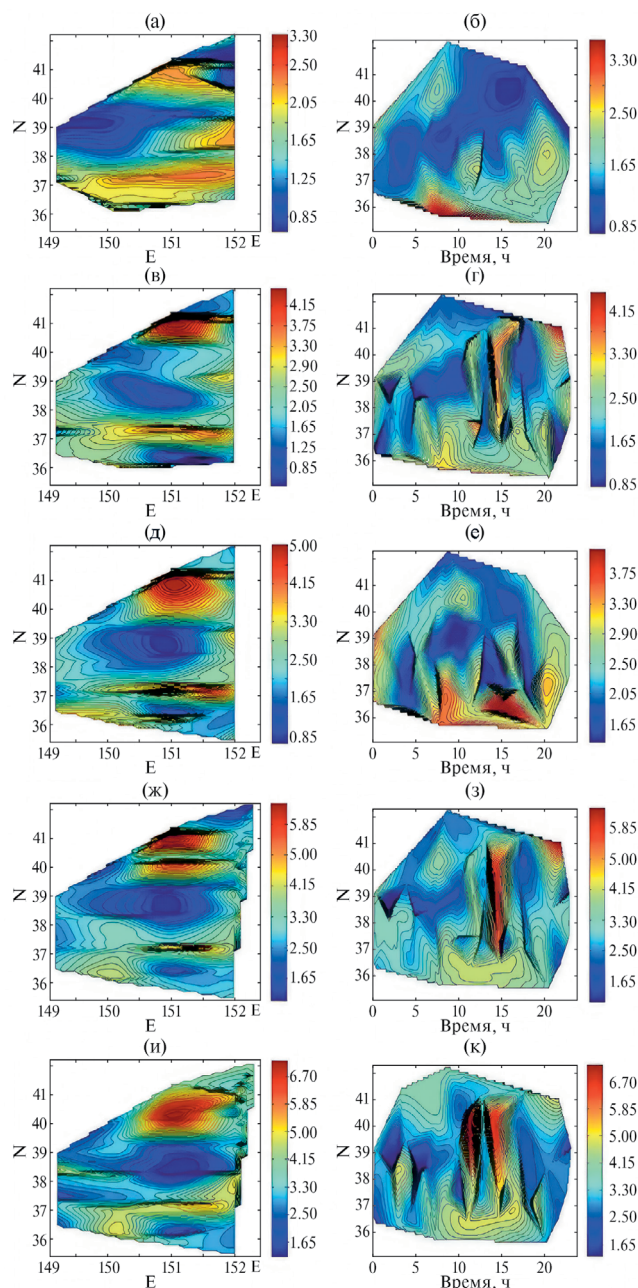


Рис. 6. (а), (в), (д), (ж), (и) — Пространственная изменчивость, изолинии $P_{mk} \times 10^5$ Па. (б), (г), (е), (з), (к) — Временная изменчивость, изолинии $P_{mk} \times 10^5$ Па. (а), (б) — Глубина 5 м; (в), (г) — глубина 10 м; (д), (е) — глубина 25 м; (ж), (з) — глубина 50 м; (и), (к) — глубина 70 м. По оси абсцисс отложено время в часах.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так как величины кавитационных порогов обусловлены наличием зародышей кавитации, то значительная временная изменчивость этих величин может быть связана с вертикальной суточной миграцией зоопланктона. Кушинг [19] показал, что поведение мигрирующего зоопланктона сложно и многообразно. Это поведение в процессе миграции может быть разделено на пять стадий.

Первая стадия — это подъем зоопланктона с глубины на поверхность приблизительно за два часа до захода солнца, а иногда, и за десять часов. Вторая стадия — уход зоопланктона с поверхности на глубину в полночь, характерное для сумеречных мигрантов. Третья стадия — возвращение зоопланктона к поверхности перед восходом солнца после полуночного опускания. Четвертая стадия — с рассветом быстрый уход зоопланктона на глубину. Пятая стадия — дневной уровень нахождения зоопланктона постоянно изменяется, иногда даже в течении одного дня.

Поведение зоопланктона обладает чрезвычайным разнообразием и в разные сезоны, и для разного возраста. Даже суточный цикл обладает различными видами отклонений от общей схемы поведения. А иногда присутствуют аномалии в поведении суточного цикла. Следовательно, изменчивость концентрации и распределения по размерам зародышей кавитации обеспечивается поведением зоопланктона со всеми его аномалиями.

Временная изменчивость кавитационной прочности морской воды в различных водных массах, как показывают многочисленные экспериментальные данные, носит схожий характер. Величина кавитационных порогов значительно меняется за очень короткий временной интервал. Поскольку величина кавитационных порогов определяется концентрацией и распределением по размерам зародышей кавитации, то ее изменчивость должна быть обусловлена вертикальной миграцией этих зародышей. Таким механизмом перемещения зародышей кавитации может быть миграция зоопланктона. А свойство зоопланктона превращаться из аэрофобной взвеси в аэрофильную взвесь также способствует появлению в некоторой момент времени на некотором горизонте зародышей кавитации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акуличев В. А.* Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М.: Наука, 1978. 279 с.
2. *Briggs L. V.* Limiting Negative Pressure of Water // *J. Appl. Phys.* 1950. V. 21. P. 721–722.
3. *Yilmaz E., Hammit F. G., Keller A.* Cavitation inception thresholds in water and nuclei spectra by light-scattering technique // *J. Acoust. Soc. Am.* 1976. V. 59. № 2. P. 329–338.
4. *Рой Н. А.* Обзор. Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации // *Акуст. журн.* 1957. Т. 3. № 1. С. 3–18.
5. *Сиротюк М. Г.* Обзор. Ультразвуковая кавитация // *Акуст. журн.* 1962. Т. 8. № 3. С. 255–272.
6. *Перник А. Д.* Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1966. 439 с.
7. *Мельников Н. П., Елистратов В. П.* Мезомасштабная пространственная изменчивость кавитационных порогов морской воды // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 2. С. 187–195.
8. *Гуленко И. И., Корец В. Л., Мальков В. В.* Некоторые вопросы методики измерения кавитационных порогов // *Симпозиум по физике акусто-гидродинамических явлений. Сухуми*, 1975. С. 35–39.
9. *Ilyichev V. I., Koretz V. L. and Melnikov N. P.* Spectral characteristics of acoustic cavitation // *Ultrasonics*. 1989. V. 27. P. 357–361.
10. *Акуличев В. А., Ильичев В. И.* Пороги акустической кавитации в морской воде в различных районах Мирового океана // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 2. С. 167–179.
11. *Akulichev V. A., Penkin S. I., Shekhovtsev D. N.* Acoustic Cavitation in Tubes and Resonators // *Proc. of the 10th Int. Symp. on Nonlinear Acoustics (Edit. Akira Nakamara)*, Osaka: TeikohsaPress. 1984. P. 185–188.
12. *Rusby J. S. M.* The onset of sound wave distortion and cavitation in water and sea water // *J. Sound Vib.* 1970. V. 13. № 3. P. 257–267.
13. *Akulichev V. A., Ilyichev V. I.* Acoustic cavitation in sea water // *Proc. of the Int. Symp. of Propeller and Cavitation*, Shanghai: Editorial Office of Shipbuilding of China. 1986. P. 201–205.
14. *Корец В. Л., Мельников Н. П.* Зависимость кавитационного порога от статического давления // *Акуст. журн.* 1983. Т. 29. № 2. С. 199–203.
15. *Ильичев В. И., Елистратов В. П., Корец В. Л., Кузнецов Г. Н., Мельников Н. П.* Пространственная изменчивость кавитационных порогов в некоторых динамически активных зонах Мирового океана // *ДАН СССР*. 1990. Т. 312. № 4. С. 974–977.
16. *Ильичев В. И., Корец В. Л., Мельников Н. П.* Временная изменчивость кавитационной прочности морской воды // *ДАН СССР*. 1991. Т. 317. № 2. С. 458–461.
17. *Ильичев В. И., Елистратов В. П., Корец В. Л., Мельников Н. П.* Широкая изменчивость кавитационной прочности морской воды // *ДАН*. 1992. Т. 324. № 5. С. 1108–1110.
18. *Ильичев В. И., Корец В. Л., Мельников Н. П., Поздняков Н. В.* Кавитационная прочность воды в зоне смешения речных и морских вод // *Докл. Акад. наук*. 1994. Т. 335. № 2. С. 243–245.
19. *Cushing B. H.* The vertical migration of planktonic crustacea // *Biological Reviews-Cambridge Philosophical Society*. 1951. V. 26. № 2. P. 158–192.

VARIABILITY OF THE CAVITATION THRESHOLD OF SEA WATER UNDER NATURAL CONDITIONS

N. P. Melnikov

Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, Russia

**e-mail: melnikov50@mail.ru*

The results of measurements of cavitation thresholds and some hydrological and hydrochemical parameters of seawater in various areas of the World Ocean are presented and discussed. The stable temporal variability of the cavitation thresholds on the time scales of several days is shown. The daily, semi-daily and other periodicities of changes in the magnitude of cavitation thresholds were revealed.

Keywords: Cavitation threshold Cavitation strength of seawater.