

МЕЗОМАСШТАБНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАВИТАЦИОННЫХ ПОРОГОВ МОРСКОЙ ВОДЫ

© 2017 г. Н. П. Мельников^{а,*}, В. П. Елистратов^б

^а Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
603950 Н. Новгород, ул. Большая Печерская 25/12а

^б Гидрофизический институт Академии наук
Республика Абхазия, г. Сухум

*e-mail: melnikov50@mail.ru

Поступила в редакцию 14.04.2016 г.

Приводится пространственная изменчивость кавитационных порогов и некоторых гидрологических и гидрохимических параметров морской воды в межфронтальной зоне субарктического фронта Тихого океана, в проливе Дрейка и в экваториальной части Тихого океана, измеренных в приповерхностном слое до глубины 70 м.

Ключевые слова: порог кавитации, кавитационная прочность морской воды

DOI: 10.7868/S0320791917010099

ВВЕДЕНИЕ

В современной литературе кавитацией принято называть сложный комплекс разнообразных физико-химических явлений, сопровождающих нелинейные пульсации пузырьков, возникающих в жидкости из микронеоднородностей, называемых “зародышами кавитации”, под действием переменных полей давления. По характеру действующих на жидкость сил кавитацию условно подразделяют на гидродинамическую и акустическую. Акустическая кавитация возникает при возбуждении в жидкости достаточно интенсивных акустических полей. Гидродинамическая кавитация возникает при уменьшении давления в жидкости в гидродинамических полях обтекаемых тел. Основное отличие акустической кавитации от гидродинамической состоит в том, что в первом случае объем жидкости подвергается периодическому воздействию переменного давления в течение длительного интервала времени. Однако процессы, протекающие при гидродинамической и акустической кавитации, обусловлены одними и теми же физическими законами. В связи с этим в некоторых случаях акустическая кавитация может служить для моделирования явлений гидродинамической кавитации.

Отсутствие обоснованной теории стабилизации кавитационных зародышей создает дополнительные трудности в теоретических и экспериментальных исследованиях процессов возникновения и развития кавитации. В связи с этим

получило распространение “феноменологическое” описание явления кавитации, не учитывающее механизмов образования и стабилизации зародышей. В рамках такого рассмотрения реальная жидкость представляется в виде гипотетической среды – жидкости и стабильно существующих или постоянно образующихся микронеоднородностей, для которых физическая природа, распределение по пространству и по размерам и концентрация постулируются в каждой конкретной ситуации или используются данные реальных измерений “зародышей кавитации” в виде пузырьков, твердых взвесей и т.д. [1, 2].

Согласно общепринятому представлению, кавитационная прочность является физической характеристикой жидкости и однозначно зависит от ее физико-химических свойств. Экспериментальные значения величины кавитационной прочности, полученные различными авторами [3–7], имеют значительные расхождения. По-видимому, это связано с тем, что сам процесс измерения и измерительная система неизбежно изменяют характеристики жидкости, в частности размеры кавитационных зародышей и их функции распределения по размерам и пространству. Поэтому в случае акустической кавитации, на наш взгляд, более точно говорить не о “кавитационной прочности”, а о “кавитационном пороге” (КП). Величина кавитационного порога зависит как от среды (жидкость с парогазовыми или другими зародышами кавитации), так и от измерительной системы (акустические концентраторы, гидрофоны и другие измеритель-

ные средства). Кроме того, она зависит как от методики измерения (в частности от критерия возникновения кавитации), так и от характера акустического воздействия (особенно от характера распределения амплитуд акустического поля и его частоты).

Известно также, что возникновение кавитации в жидкости связано с инициированием и развитием совершенно различных физических процессов. Соответственно этому следует разделять порог “выпрямленной” диффузии [8, 9], порог градиентной и бьеркнесовской коагуляции [10–13], порог динамической устойчивости и порог статической устойчивости [14–16]. Каждый из перечисленных выше процессов может быть экспериментально измерен и его возникновение зафиксировано. Очевидно, что величина кавитационной прочности жидкости является предельной для кавитационных порогов, и они могут оказаться приблизительно равными лишь при условии, что жидкость разрывается таким образом, что не происходит существенного изменения как размеров, так и распределения по размерам зародышей кавитации, и перечисленные выше процессы возникают в не измененной внешними воздействиями среде.

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 проведения экспериментальных исследований. Здесь важен критерий возникновения кавитации и необходима экспериментальная установка, позволяющая реализовать единую методику измерений. Критерии возникновения кавитации достаточно подробно обсуждены в работах [15, 16]. 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 ранее 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.

3. При воздействии на пузырек акустического поля, частота которого ниже основной резонансной частоты пузырька, резонансного возбуждения пузырька не происходит; при достижении амплитудой 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 в этом случае ее бурный рост служит критерием возникновения кавитации.

При измерении величины кавитационных порогов морской воды в натуральных условиях за критерий возникновения кавитации взят динамический порог устойчивости, и порогом кавитации в этом случае является амплитуда возбуждающего акустического поля.

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 $T_c = 10 \dots 2000$ мс, $t_d = 3 \dots 10$ мин. Каждая серия ступенек на выходе канала состоит из 128 импульсов, причем амплитуда последнего и, следовательно, скорость нарастания амплитуды может меняться в широких пределах в зависимости от возможности усилителя мощности. С выхода мощного усилителя сигнал U_k поступает на цилиндрический фокусирующий преобразователь, возбуждающий кавитацию

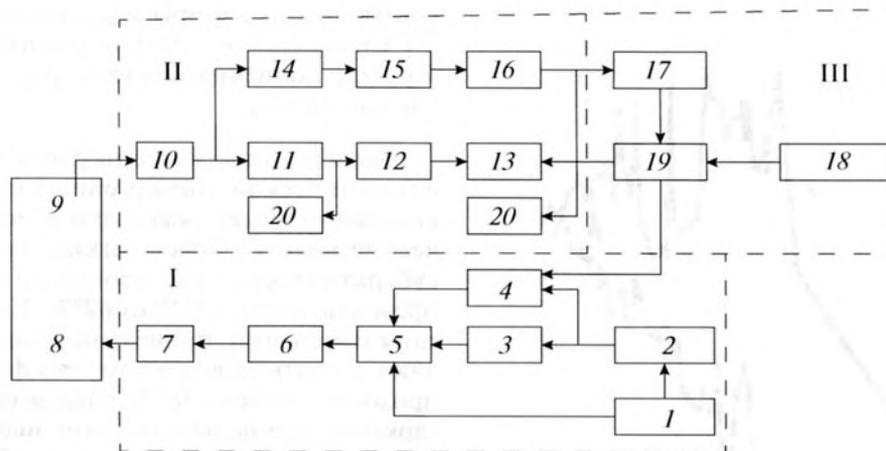


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения кавитационных порогов.

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

На блок-схеме канала излучения обозначены: 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 появление сплошной части спектра в случае потери статической устойчивости пузырьков [17]. Эти критерии иллюстрируются на рис. 3.

На этом рисунке приведена зависимость суммарного сигнала, принимаемого гидрофоном (сумма сигнала на основной частоте и кавитационного шума) от напряжения, подаваемого на концентратор: кривая 1 – суммарный сигнал, принимаемый гидрофоном; 2 – 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. Эти моменты легко фиксируются в эксперименте. На блок-схеме канала приема и измерения на рис. 1 цифрами обозначены: 9 – гидрофон, 10 – форусилитель, 11 – усилитель с автоматическим делителем, 12 – вольтметр, 13 – регистрирующее устройство, 14 – усилитель с дискретным АРУ, 15 – режекторный фильтр, 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;

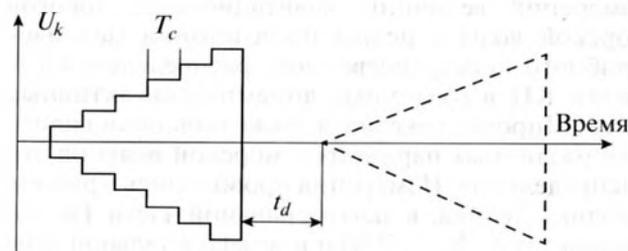


Рис. 2. Форма сигнала на выходе канала излучения.

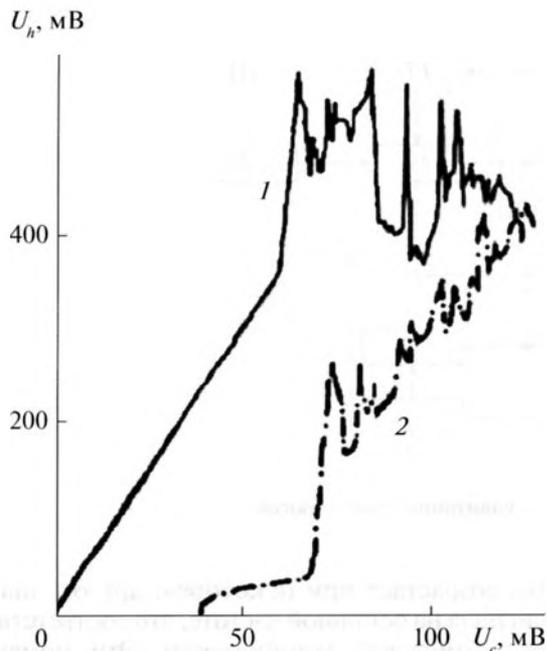


Рис. 3. Зависимость величины сигнала, принимаемого гидрофоном, от напряжения на концентраторе. 1 — суммарный сигнал, принимаемый гидрофоном, 2 — кавитационный шум.

— 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 глубинах от 10 до 100 м делалось 10 измерений КП, эти измерения усреднялись, и полученное значение принималось за кавитационный порог. Частота возбуждения акустического концентратора равнялась для пролива Дрейка и экваториальной части Тихого океана 5 кГц, для межфронтальной зоны Западной части Субарктического фронта Тихого океана 15 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В настоящей работе представлены результаты измерений величины кавитационных порогов морской воды с целью исследования мезомасштабного пространственного распределения величин КП в различных динамически активных зонах Мирового океана, а также выяснения влияния различных параметров морской воды на это распределение. Измерения проводились в районе пролива Дрейка, в экваториальной части Тихого океана (от 5° N до 5° S) и в межфронтальной зоне течений Оясио и Куроиси. Одновременно с измерением КП (в относительных величинах) измерялись

следующие параметры морской воды: температура T [°C], соленость S [‰], объемное газосодержание V [мл/л], концентрация кислорода O_2 [мл/л] и другие параметры.

Исследование КП поверхностных вод в зоне антарктической конвергенции (пролив Дрейка), которая отделяет тяжелые и холодные антарктические воды от более легких, но более соленых субарктических вод, проведено в летний сезон (февраль) вдоль 62° W от 62°30' S до 49° S. Результаты измерений, приведенные на рис. 4А, позволяют сделать вывод о том, что фронтальная зона проходит в районе 58° S. Южнее расположены антарктические воды с малыми значениями КП по сравнению с более прочными субантарктическими водами. Основной причиной понижения прочности антарктических вод является их повышенное газосодержание, а также повышенная биологическая продуктивность этих вод, приводящая к увеличению концентрации зародышей кавитации и, следовательно, к уменьшению величины кавитационных порогов. Сравнение изменчивости величины кавитационных порогов с изменчивостью гидрологических характеристик морской воды позволяет сделать вывод о том, что разделение поверхностных вод по традиционным характеристикам совпадает с разделением этих вод по изменению кавитационной прочности.

Особый интерес представляет экваториальный район Тихого океана, в котором наблюдается динамическая сложная картина поверхностных течений и противотечений с зонами подъема и опускания вод. В этом районе выполнено два разреза с интервалом в трое суток. Измерения проводились на первом проходе от 5° S до 5° N через 0.5°, на втором от 5° N до 0° через 0.5°, а от 0° до 5° S через 1°. Результаты измерений, представленные на рис. 4б и 4в, показывают сложную структуру поверхностных вод, имеющих не только пространственную, но и временную изменчивость. Как видно из этих рисунков, сложная гидрологическая структура исследованного района приводит к заметной пространственно-временной изменчивости кавитационной прочности на относительно небольших расстояниях. Наблюдаются чередующиеся по широте системы зон с малой и большой прочностью, что можно объяснить наличием зон подъема и опускания вод. Качественно аналогичная изменчивость наблюдается и в общей картине гидрологического строения в этом районе. Можно отметить, что в слое 0–50 м в течение четырех суток произошло смещение минимума величины кавитационных порогов, находившегося ранее на широте 2°30' N, на широту 3°30' N. По всей вероятности, наблюдаемое смещение вод с малой прочностью связано с меандрированием течения.

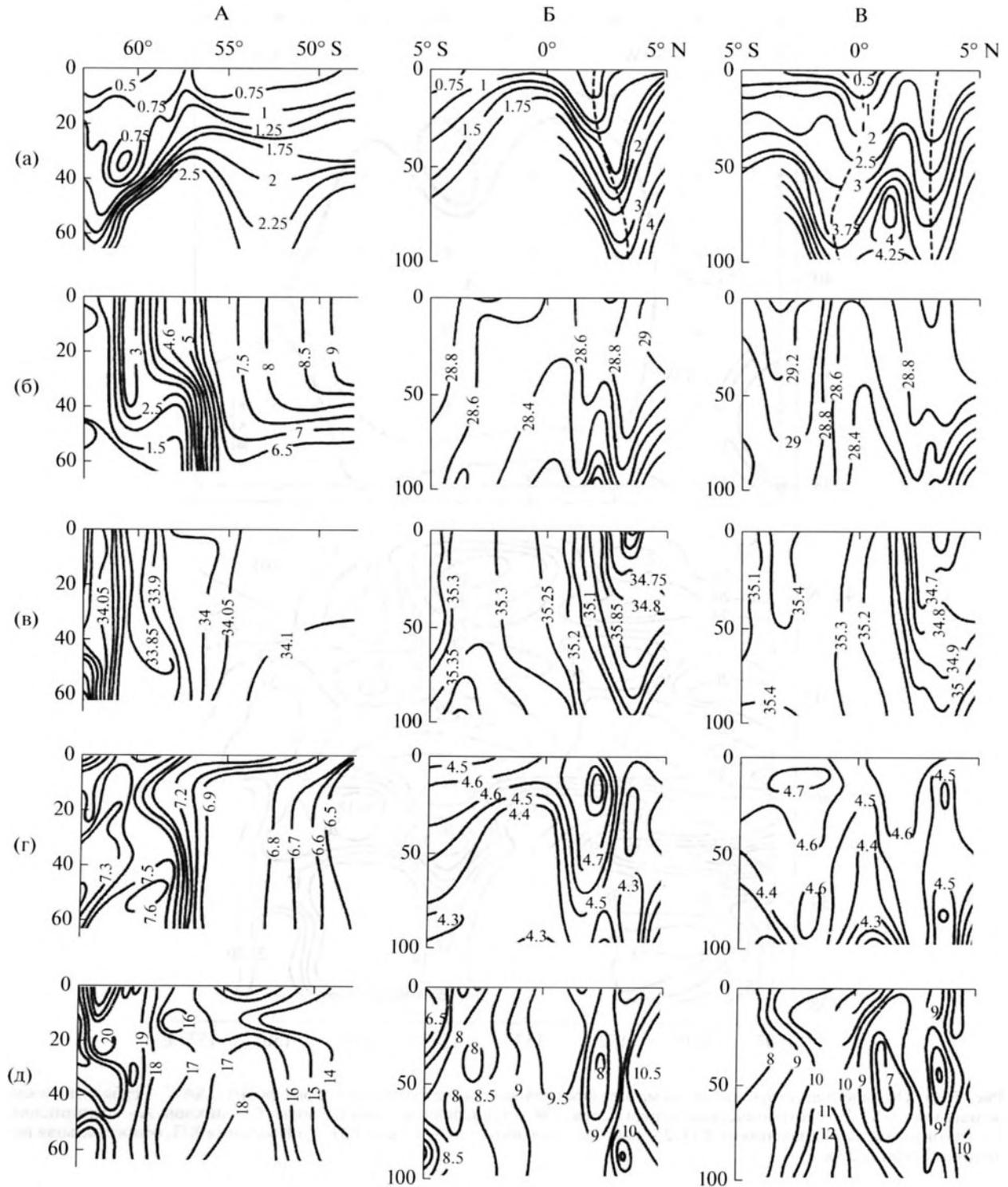


Рис. 4. Пролив Дрейка (А); экваториальный район Тихого океана (Б – проход с юга на север, В – проход с севера на юг). Изолинии: (а) К_р, относительная величина; (б) температура T , °С; (в) соленость S , ‰; (г) концентрация кислорода O_2 , мл/л; (д) общее газосодержание V , мл/л. По оси абсцисс отложены координаты точки измерения, по оси ординат отложена глубина в метрах.

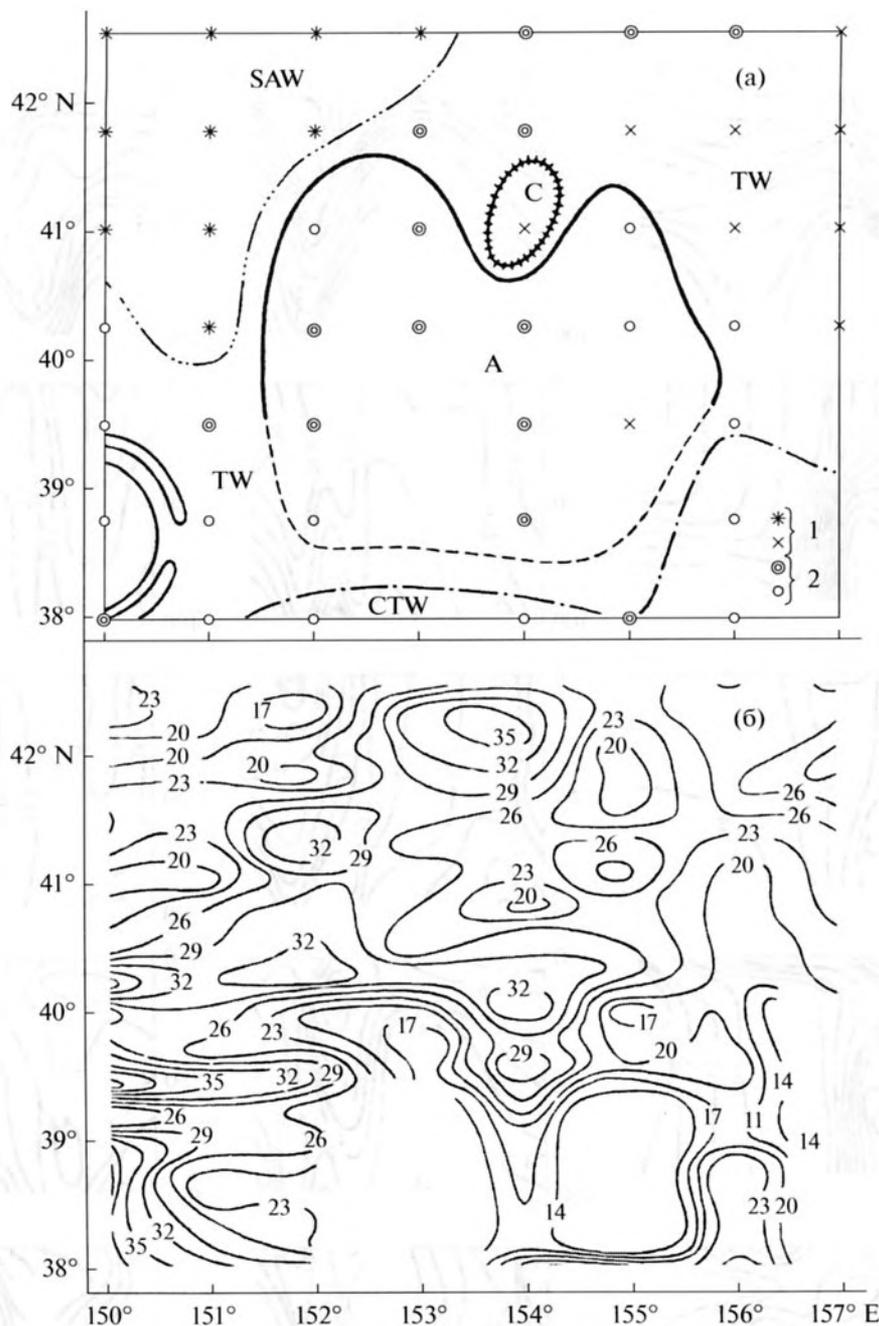


Рис. 5. (а) Обобщенная структурная схема межфронтальной зоны субарктического фронта. SAW – субарктическая водная масса, STW – субтропическая водная масса, TW – трансформированные воды, С – циклон, А – антициклон; 1 – районы с малыми значениями КП, 2 – районы с большими значениями КП. (б) Изолинии КП, относительная величина. Глубина 25 м.

Субарктическая фронтальная зона Тихого океана примерно располагается между 38° и 45° N и пересекает весь Тихий океан в зональном направлении, будучи в своей западной части неразрывно связана с мощными бароклинными течениями Куроисио и Ойясио [18]. По данным эксперимента “Мегаполигон”, западная часть Субарктической фронтальной зоны характеризуется сложной

структурой при наличии трех фронтов – Полярного, Субарктического и Фронта Продолжения Куроисио, причем два первых западнее 153°30' E существовали слитно, а восточнее происходило их разветвление. Столь сложное термохалинное и динамическое строение западной части Субарктической фронтальной зоны обуславливает сильную пространственную изменчивость гидрологи-

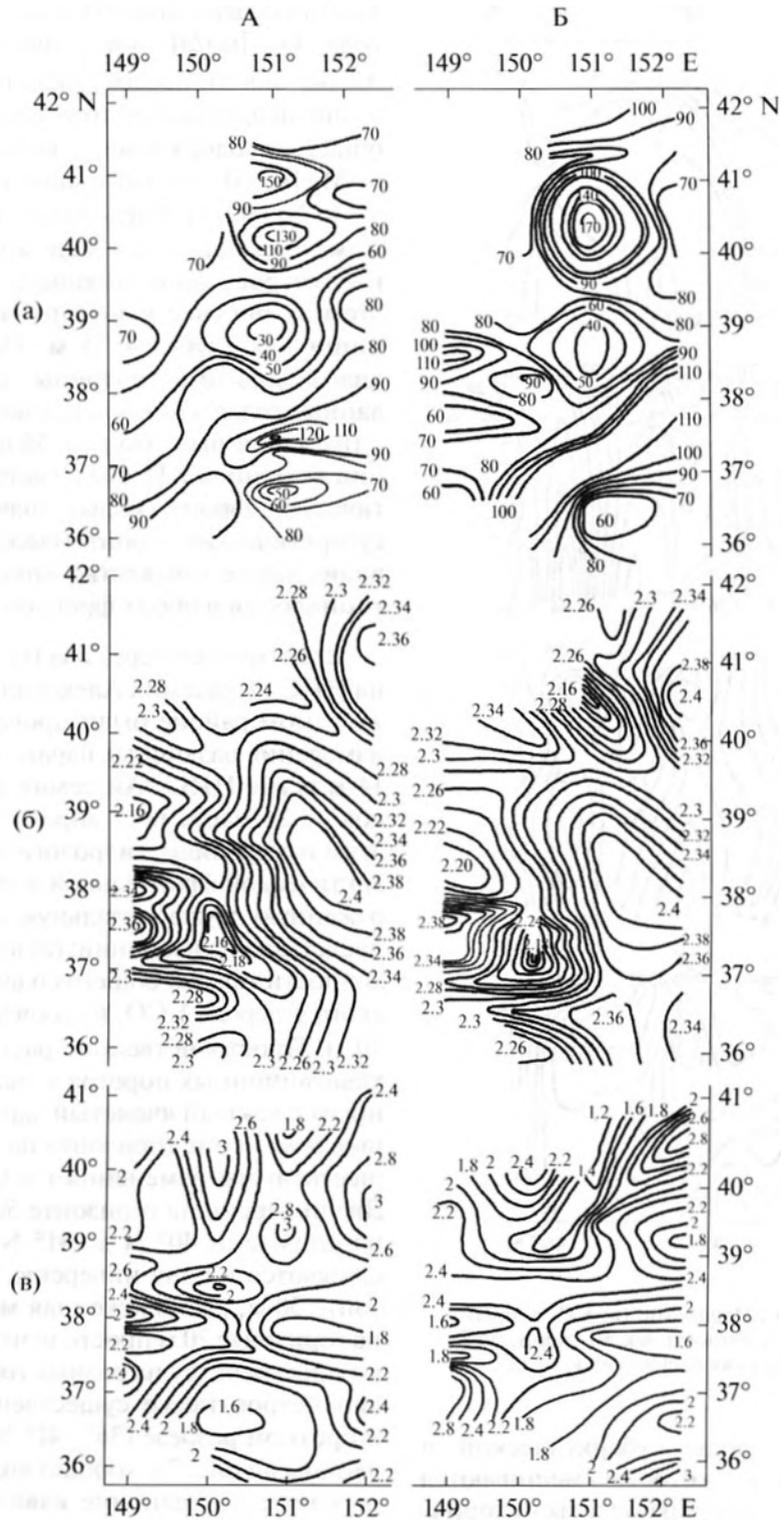


Рис. 6. Пространственное распределение: (а) КП, относительная величина; (б) щелочность Alk, мг-экв/л; (в) ΣCO_2 , ммоль/л на горизонтах: А – 50 м, Б – 70 м.

ческих и других параметров морской воды. Границами межфронтальной зоны субарктического фронта Тихого океана считается северный и юж-

ный субарктические фронты, вытянутые в широтном направлении, границы которых динамически подвижны. Внутри самой зоны находятся

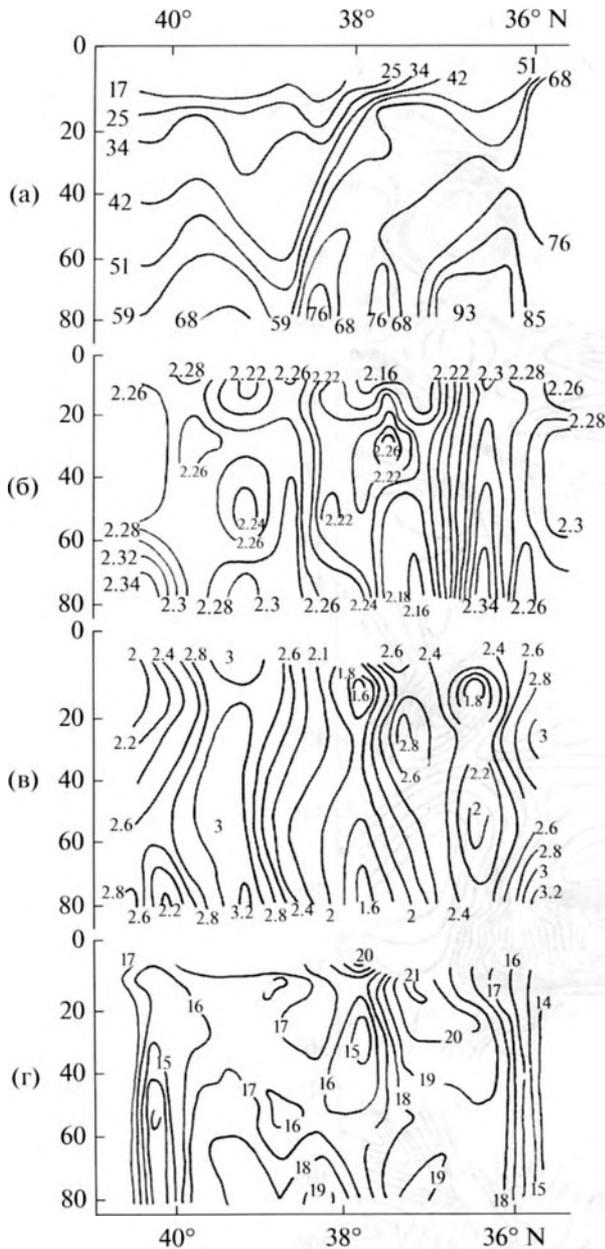


Рис. 7. Разрез по 150° Е. Изолинии: (а) КП, относительная величина, (б) щелочность Alk, мг-экв/л, (в) Σ CO₂, ммоль/л, (г) общее газосодержание V , мл/л.

трансформированные воды субарктической и субтропической структур, которые смешиваются в разных пропорциях и могут разделяться вторичными фронтами. Обобщенная структурная схема межфронтальной зоны субарктического фронта по данным гидрологической съемки, проведенной с 14 июня по 1 июля 1987 года на НИС “Академик Александр Несмеянов”, показана на рис. 5а. Измерения проводились через 0.5° на всех разрезах от 36° N до 42° N. В этой экспедиции кроме стандартных гидрологических параметров измерялись: об-

щее газосодержание V [мл/л], концентрация кислорода O₂ [мл/л], кислотность pH, щелочность Alk [мг-экв/л], прозрачность α [м⁻¹], общее содержание неорганического углерода Σ CO₂ [ммоль/л], общее содержание кальция и магния CaMg [мг/л], концентрация фосфатов P [мг/л] и азота N₂ [мл/л]. Следовательно, каждую станцию можно представить в виде многомерного вектора параметров, описывающего морскую воду. На этом же рисунке нанесены результаты кластеризации для глубины 25 м. Полученное методом диагонализации матрицы связи исследуемых данных разделение водных масс хорошо совпадает с традиционным. На рис. 5б представлены изолинии величины КП. Выделяется северный субарктический фронт (малые значения КП), южный субарктический фронт (высокие значения КП), видно также множество инверсий в районах антициклонов и обоих фронтов.

Практически через два года после экспедиции на НИС “Академик Александр Несмеянов” в том же самом районе были проведены комплексные измерения различных параметров морской воды в 14-м рейсе НИС “Академик Александр Виноградов” с 28 марта по 7 апреля 1989 года. Согласно этим измерениям, гидрологическая структура субарктической фронтальной зоны имеет хорошо выраженную двухфронтальную структуру. На рис. 6 представлены изолинии: (а) величины КП, (б) щелочности Alk, (в) общего содержания неорганического углерода Σ CO₂ на горизонтах А – 50 м и Б – 70 м. Пространственное распределение величин кавитационных порогов в межфронтальной зоне носит сложный ячеистый характер. Даже небольшое изменение горизонта на 20 м приводит к существенным изменениям в характере инверсий. Две инверсии на горизонте 50 м, расположенные на широте от 40° N до 41° N, на горизонте 70 м сливаются в одну инверсию. Инверсия на горизонте 50 м, расположенная между 37° N и 38° N, на горизонте 70 м просто исчезает. Распределение по пространству на разных горизонтах для других параметров также существенно изменяется. На широтном разрезе (36°–41° N, 150° E), представленном на рис. 7а, хорошо видно разделение водных масс по величине кавитационных порогов. Граница разделения находится между 38° и 39° N и занимает достаточно малый, около 0.5°, промежуток. На столь малом расстоянии происходит значительное изменение величины кавитационных порогов, от 51 до 34 у.е. на горизонте около 50 м. На этой широте происходит значительное изменение и других параметров морской воды (рис. 7б–7г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что мезомасштабная изменчивость величины кавитационных порогов в динамически активных районах Мирового океана имеет весьма сложный характер и обусловлена сложным пространственным распределением гидрологических, химических и биологических параметров морской воды. По сути, различные водные массы обладают различной кавитационной прочностью. И там, где существует резкая граница между водными массами, мы имеем существенное изменение величины кавитационных порогов на незначительном пространственном масштабе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Akulichev V.A., Bulanov V.A.* Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 130 (5). Pt. 2. P. 3438–3449.
2. *Буланов В.А.* Введение в акустическую спектроскопию микронеоднородных жидкостей. Владивосток: Дальнаука, 2001. 278 с.
3. *Рой Н.А.* Обзор. Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации // *Акуст. журн.* 1957. Т. 3. № 1. С. 3–18.
4. *Сиротюк М.Г.* Обзор. Ультразвуковая кавитация // *Акуст. журн.* 1962. Т. 8. № 3. С. 255–272.
5. *Перник А.Д.* Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1966. 439 с.
6. *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.
7. *Ильичев В.И., Елистратов В.П., Корец В.Л., Мельников Н.П.* Широкая изменчивость кавитационной прочности морской воды // *Докл. АН СССР.* 1992. Т. 324. № 5. С. 1108–1110.
8. *Eller A., Flinn H.G.* Rectified diffusion during nonlinear pulsating of cavitation bubbles // *J. Acoust. Soc. Am.* 1965. V. 37. № 3. P. 493–497.
9. *Капустина О.А.* Дегазация жидкостей / В кн.: Физические основы ультразвуковой технологии. Под ред. Розенберга Л.Д. Ч. IV. М.: Наука, 1970.
10. *Агрест Э.М., Кузнецов Г.Н.* Дрейф газовых каверн в неоднородном звуковом поле // *Акуст. журн.* 1972. Т. 18. № 2. С. 168–172.
11. *Кузнецов Г.Н., Шекин И.Е.* Влияние коагуляции и диффузии газа на кавитационную прочность жидкости // *Акуст. журн.* 1975. Т. 21. № 5. С. 751–759.
12. *Агрест Э.М., Кузнецов Г.Н.* Динамика распределения пузырьков по размерам в акустических полях // *Акуст. журн.* 1974. Т. 20. № 3. С. 345–351.
13. *Агрест Э.М., Корец В.Л.* Крупномасштабные пространственные осцилляции кавитационной полости в звуковом поле // *Акуст. журн.* 1978. Т. 24. № 1. С. 1–9.
14. *Blake F.G.* The onset of cavitation in liquids // *Acoust. Res. Lab., Harvard University Tech. Rep.* 1949. № 12.
15. *Ильичев В.И., Корец В.Л., Мельников Н.П.* Акустическое излучение одиночного неподвижного пузырька при периодических пульсациях // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39. № 1. С. 101–107.
16. *Puychev V.I., Koretz V.L., Melnikov N.P.* Spectral characteristics of acoustic cavitation // *Ultrasonics.* 1989. V. 27. P. 357–361.
17. *Елистратов В.П., Корец В.Л.* Исследование кавитационных характеристик океана акустическим методом / Труды IX Всесоюзной акустической конференции (секция Д). Москва, Акустический институт. 1977. С. 77–79.
18. *Грузинов В.М.* Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 272 с.
19. *Парзен Э.В.* Подводная акустика и обработка сигналов. М.: Мир, 1985. С. 390–414.