

ГЕНЕРАЦИЯ ПОДВОДНОГО ШУМА СУЛОЕМ ВНУТРЕННЕЙ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ В ОКЕАНЕ

© 2022 г. А. Н. Серебряный^{a, b, *}, А. В. Фурдуев^b, А. А. Аредов^b, Н. Н. Охрименко^b

^aИнститут океанологии имени П.П. Шириова РАН, Нахимовский пр. 36, Москва, 117997 Россия

^bАО “Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева”, ул. Шверника 4, Москва, 117036 Россия

*e-mail: serebryany@hotmail.com

Поступила в редакцию 19.01.2022 г.

После доработки 19.01.2022 г.

Принята к публикации 25.01.2022 г.

Обсуждаются результаты измерений подводного шума, генерируемого уединенной внутренней волной большой амплитуды по наблюдениям, проведенным вблизи Маскаренского хребта в Индийском океане. Измерения проведены с судна, находившегося в дрейфе над большими глубинами, оснащенного вертикальной гирляндой гидрофонов и средствами регистрации внутренних волн. Приводятся параметры зарегистрированной 50-метровой внутренней волны и характеристики излучаемого ею подводного шума. Мощные орбитальные течения, сопровождающие внутреннюю волну, приводят к образованию на поверхности океана сулоев – областей хаотичных, схлопывающихся волн, которые повышают концентрацию пузырьков воздуха в приповерхностном слое и излучают подводные шумы. Анализ данных показал, что прохождение вызванного внутренней волной сулоя над гидрофоном приводит к значительному (до 18 дБ) росту уровня подводного шума в частотном диапазоне 5–15 кГц.

Ключевые слова: подводный шум, внутренние волны, сулой, гирлянда гидрофонов, спектр шумов, Индийский океан

DOI: 10.31857/S0320791922030121

1. ВВЕДЕНИЕ

В декабре 1990 г. в Индийском океане около Маскаренского хребта с НИС “Академик Николай Андреев” проводились исследования внутренних волн. Это место принадлежит к особенным районам Мирового океана, так называемым “горячим точкам”, из-за необычайно больших амплитуд генерируемых здесь внутренних волн [1]. Проведенные измерения обнаружили здесь уединенные внутренние волны высотой до 90 м, а также пакеты солитоноподобных волн высотой в несколько десятков метров [2]. Также экспериментально были выявлены механизмы генерации этих гигантских волн [3]. Кроме того, были обнаружены внутренние волны 2-ой моды, что является интересной необычной чертой внутриволнового поля Мирового океана, где преобладают волны 1-ой моды. Впечатляющей особенностью всех наблюдавшихся здесь внутренних волн было их сопровождение проходящими по поверхности океана сулойными полосами. Поверхностные проявления внутренних волн в виде чередующихся сликовых (с выглаженной поверхностью моря) и сулойных полос (с интенсивными обрушивающимися поверхностными волнами) – широко из-

вестное явление [4]. Но в случае района у Маскаренского хребта сулой от внутренних волн были настолько интенсивны, что у некоторых участников экспедиции сложилось впечатление, что судно вынесло на мелководье, где появились прибойные обрушивающиеся волны, а у других, что полоса поверхностных волн в штилевую погоду вызвана внезапным порывом ветра. На самом деле появление сулоев было обусловлено сильными орбитальными течениями внутренних волн, которые образовывали поочередно зоны конвергенции и дивергенции в приповерхностном слое океана. Говоря о сулоях, мы должны упомянуть книгу [5], в которой говорится, что “сулой в отличие от обычных поверхностных волн производит загадочный акустический эффект”. Исследованию этого акустического эффекта и посвящена данная статья, которая представляет расширенный вариант сообщения, опубликованного авторами в журнале Доклады Академии наук [6].

По общепринятым представлениям влияние внутренних волн на шумовое поле океана в основном проявляется в модуляции подводного шума с амплитудой и периодами, определяемыми параметрами внутренних волн. Так, горизонталь-



Рис. 1. Снимок поверхности океана, сделанный при прохождении полосы сулоя, вызванной внутренней волной, в районе Маскаренского хребта [10].

но направленная акустическая антенна, помещенная в слой термоклина, может регистрировать прохождение внутренних волн по флуктуациям принимаемого шума поверхностных источников [7]. Рассеяние шума или обратное рассеяние локационного сигнала от поверхностных волн, модулированных орбитальными течениями, сопровождающими внутренние волны, также отражает характеристики внутренних волн [8, 9]. Однако, возможна и непосредственная генерация подводного шума внутренней волной, доказательства чего приводятся в этой статье. Внутренние волны больших амплитуд сопровождаются интенсивными сулоями на океанской поверхности и хорошо различимыми человеческим ухом шумами. Зона сулоя образуется в области конвергенции выходящих к поверхности орбитальных течений внутренней волны и представляет собой область хаотичного поверхностного волнения, обрушения поверхностных волн с образованием пены и захватом пузырьков воздуха, увлекаемых вниз на глубину, орбитальными движениями внутренней волны. Для наглядного представления о сулое, сопровождающем большие внутренние волны, мы приводим его фото (рис. 1), сделанное вблизи Маскаренского хребта [10]. Нелинейное взаимодействие поверхностных волн, которое происходит в зоне сулоя, как показывалось в теоретических работах [11–13], может приводить к излучению звука в воду, при этом захватываемые пузырьки воздуха увлекаются вглубь и также излучают шум. Возможные механизмы такого шумоизлучения были рассмотрены в ряде работ (см. например, [14, 15]). Несмотря на достаточно большой ряд выполненных наблюдений интенсивных внутренних волн в Мировом

океане [16, 17], до сих пор мало опубликованных данных о проведенных измерениях характеристик шумов, сопровождающих большие внутренние волны.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Измерения проводились с НИС “Николай Андреев” 6 декабря 1990 г. в дрейфе при тихой погоде на удалении около 150 км восточнее Маскаренского хребта. Глубина океана под судном в это время составляла около 2800 м. Схема расположения средств измерений во время эксперимента показана на рис. 2. Регистрация сулойной полосы на поверхности океана и отслеживание ее перемещения осуществлялось по судовому радиолокатору с длиной волны излучения 3.2 см задолго до подхода внутренней волны к судну. Экран радиолокатора при подходе внутренней волны фотографировался с дискретностью 2 мин, что позволило впоследствии оценить скорость перемещения внутренней волны (рис. 3). Для регистрации внутренних волн использовался распределенный датчик температуры длиной 50 м, помещенный в верхний термоклин. Распределенный датчик температуры измеряет колебания средней температуры охватываемого им слоя и хорошо воспроизводит профили проходящих через него внутренних волн. Также во время прохождения уединенной внутренней волны STD-зондом проводилась серия частых непрерывных зондирования верхнего слоя океана до глубины 300 м.

Измерения подводных акустических шумов проводились с использованием приемной системы, состоящей из четырех вертикально разнесен-

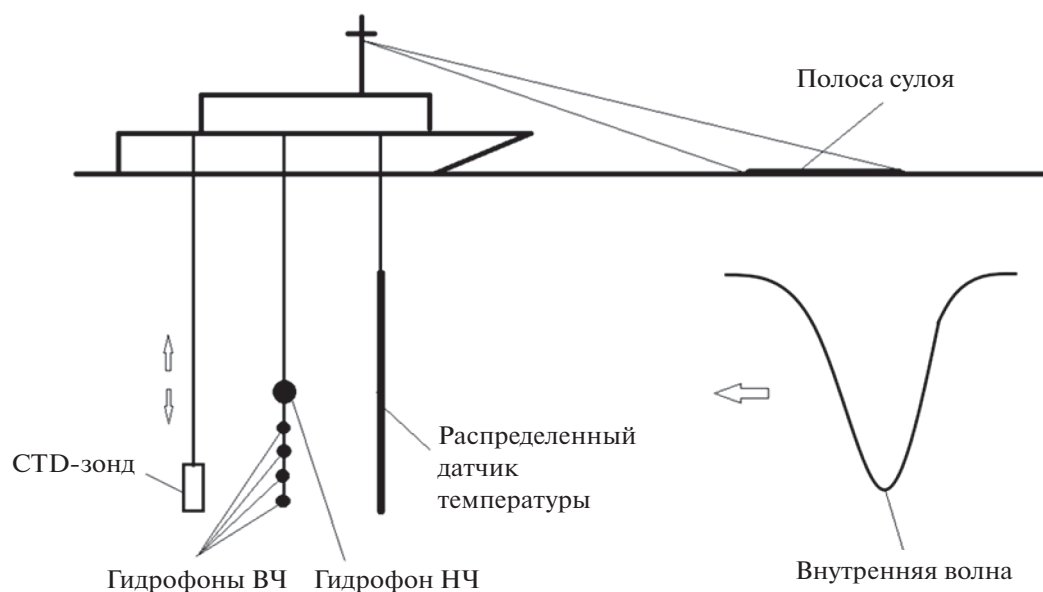


Рис. 2. Схема расположения средств измерений во время проведения эксперимента с дрейфующего судна.

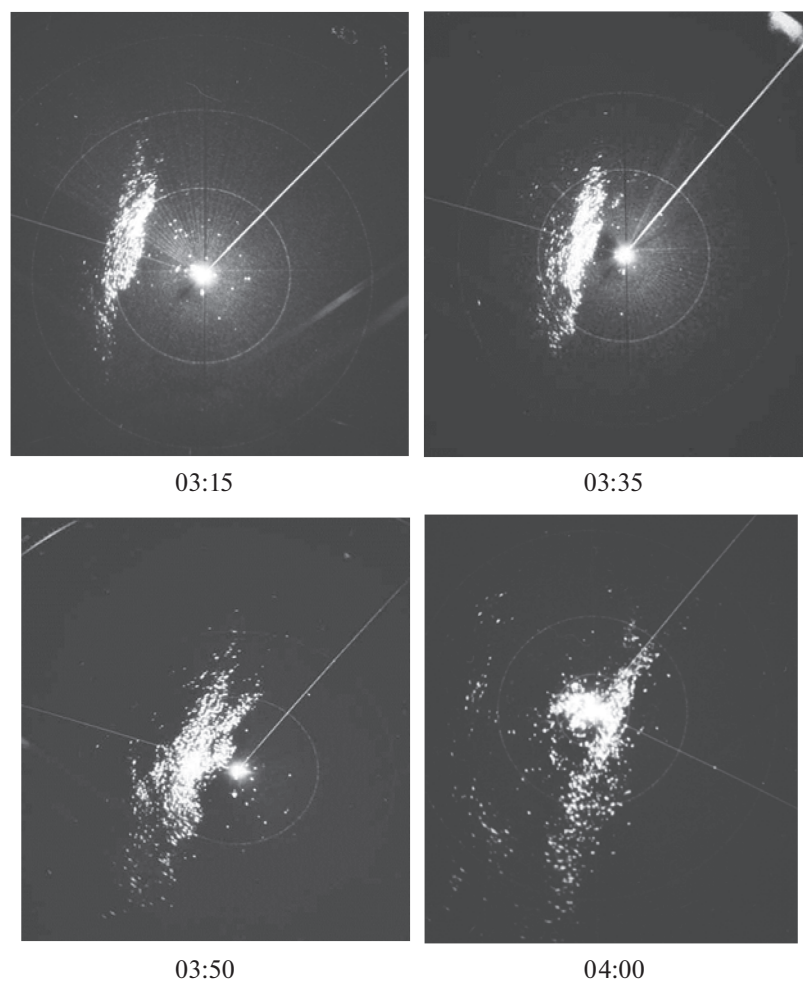


Рис. 3. Последовательные фотоизображения поверхности океана с полосой сулоя на экране судового радиолокатора в моменты подхода внутренней волны к судну и ее прохода под ним 6.12.1990 г. в 03:15, 03:35, 03:50 и 04:00.

ных высокочастотных гидрофонов (5–100 кГц) и одного низкочастотного (0.1–20 кГц). Приемная система опускалась с борта судна на глубину 100 м. Регистрация осуществлялась с высокочастотных гидрофонов на магнитофоне V&K 7005 на частотах до 60 кГц, а с низкочастотного гидрофона на магнитофоне TEAC SR-71 на частотах до 5 кГц. В период измерений на акватории стоял штиль, лишь на расстоянии более 7 миль наблюдались дождевые облака. Штиль, а, следовательно, низкий уровень ветровых шумов, позволил контрастно наблюдать шумоизлучение внутренней волны.

3. ФОНОВЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДАЕМОЙ ВНУТРЕННЕЙ ВОЛНЫ

Гидрологические условия в районе характеризовались однородным приповерхностным слоем до глубины 50 м (скорость звука 1540 м/с), зона с наибольшим градиентом скорости звука находилась в районе глубин 60–200 м, а ось подводного звукового канала располагалась на глубине 1500 м ($c = 1493$ м/с). Скорость звука у дна (глубина 2.8 км) была равна 1504 м/с.

Между 2 и 5 часами местного времени, 6 декабря уединенная внутренняя волна высотой около 50 м прошла под дрейфующим судном со стороны подводного хребта (рис. 4). Профиль этой волны с крутым передним фронтом, зарегистрированный распределенным датчиком температуры, свидетельствует о ее сильной нелинейности. На записи распределенного датчика до подхода 50-метровой волны и после ее прохода также видны 5-метровые короткопериодные внутренние волны с периодом 15–20 мин. Уход термоклина на 50 м вниз, вызванный внутренней волной, подтверждается при сопоставлении двух вертикальных профилей температуры верхнего слоя океана, сделанных в моменты, близкие к прохождению вершины и подошвы волны. Уединенная внутренняя волна сопровождалась четко различимой на экране судового локатора широкой (около 1.5 км) сулойной полосой, движущейся на юго-восток со скоростью 2.5 м/с. Поперечный размер сулойной полосы можно оценить в несколько десятков км. Прохождение зоны сулоя по времени соответствовало резкому уходу термоклина вниз, т.е. области конвергенции орбитальных течений волны.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

По техническим причинам, во время измерений на судне не был установлен режим тишины. В результате этого спектральные уровни шума, измеренные на частотах ниже 0.3 кГц (низкочастотный гидрофон), были существенно засорены

помехами от судовых механизмов и при обработке были отсечены с помощью высокочастотного фильтра. Записи были начаты при подходе сулоя к судну на расстояние около 1300 м (3 ч 29 мин по местному времени) и завершены в 4 ч 16 мин, т.е. после его удаления на расстояние нескольких кабельтовых. С высокочастотных звукоприемников делались записи в различные фазы прохождения сулоя длительностью от 2 до 9 мин. С низкочастотного гидрофона велась непрерывная регистрация в течение 47 мин.

Была проведена обработка записей, в результате которой получены спектры подводных шумов и функции их когерентности при разнесении звукоприемников по вертикали в различные моменты прохождения сулоя, а также временные изменения уровней шума в третьоктавных полосах. На рис. 5 показано, как отражается перемещение полосы сулоя по поверхности океана на спектральных характеристиках собственных шумов океана. В частности, здесь приведены записи изменения во времени уровня шума, принятого низкочастотным гидрофоном в широкой полосе частот (рис. 5а), а также спектральные уровни (рис. 5б) и функции когерентности (рис. 5в) в диапазоне частот 1–50 кГц, измеренные с помощью высокочастотного гидрофона в моменты времени, отмеченные на рис. 5а жирными точками и цифрами 1–4. Нижние кривые на рис. 5б и 5в (с.ш.) соответствуют уровню шумов регистрирующей системы. Время начала роста шума на приемной системе хорошо коррелирует со временем приближения передней границы сулоя к точке на поверхности, под которой была расположена система. Анализ полученных результатов показал, что перемещение сулоя по поверхности океана приводит к значительному (до 18 дБ на частотах в диапазоне 5–15 кГц) возрастанию уровня подводного шума, при этом функция когерентности (рис. 2в), полученная для соседних гидрофонов, разнесенных по вертикали на расстояние 4 см, стремится к единице. Это указывает на то, что наиболее мощные источники шума расположены у поверхности океана и генерируются зоной сулоя. К такому же выводу приводит анализ изменения частотной зависимости фазы шумов (рис. 6), принимаемых этими же гидрофонами в моменты времени, соответствующие точкам 1 и 3 на рис. 5а. Хорошо видно, что в отсутствие сулоя (точка 1) сдвиг фаз между шумом, принятым гидрофонами, близок к 0 на частотах до 5–7 кГц и становится хаотичным на более высоких частотах, когда шумоизлучение, возможно, обусловлено массой пузырьков воздуха, затянутой в толщу вод. При этом очевидно отсутствие преимущественного направления прихода энергии шума. В случае, когда влияние сулоя становится максимальным (точка 3), фазочастотная характеристика указывает на расположение источника шума

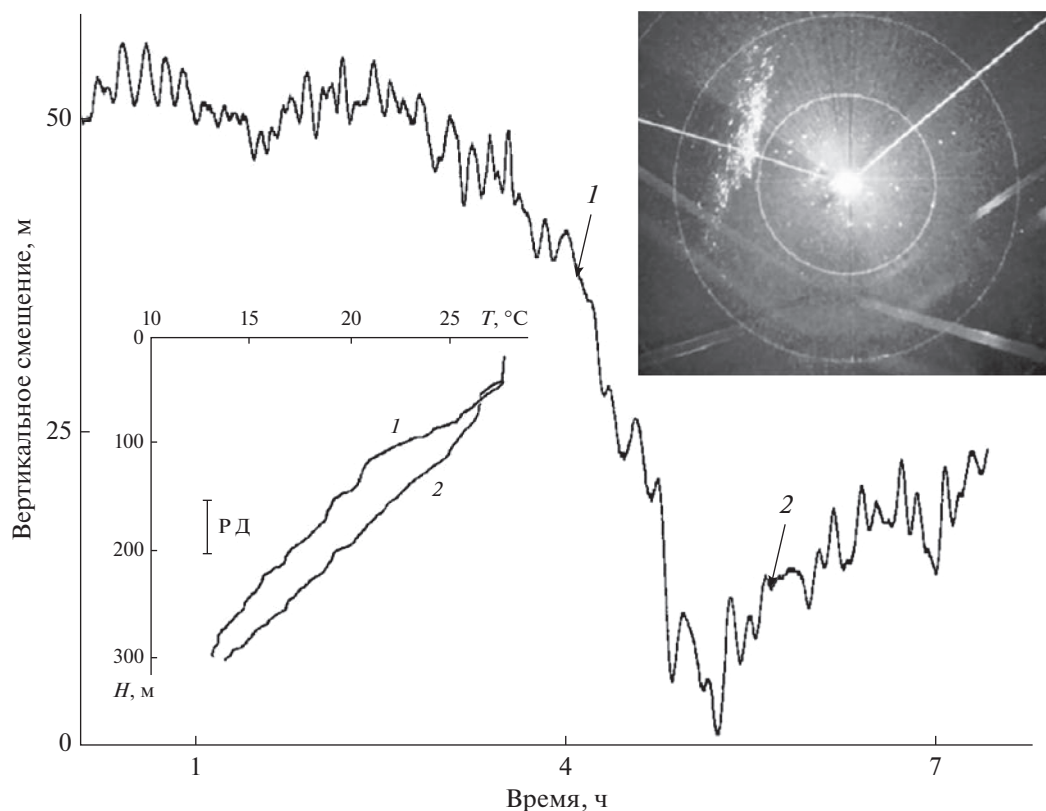


Рис. 4. Запись 50-метровой внутренней волны, сделанная распределенным датчиком температуры (измерения 6.12.1990 г. у Маскаренского хребта), и фотоизображение полосы сулоя на экране судового радара в 3.00 6.12.1990 г. Сулой приближается к лежащему в дрейфе судну с северо-запада. Радиусы малого и большого круга 3.7 и 7.4 км соответственно. Прохождение зоны сулоя по времени соответствовало резкому уходу термоклина вниз. Во врезке показаны вертикальные профили температуры для моментов времени 4 ч 11 мин и 5 ч 38 мин и положение распределенного датчика температуры.

над вертикально расположенными друг под другом гидрофонами. Наличие в спектре шумов и в функции когерентности на рис. 5б и 5в провала на частотах вблизи 5 кГц связано, по-видимому, с конструктивной особенностью приемной системы, приводящей к резонансному поглощению звука. Это же является причиной резкого изменения фазы на рис. 6 для точки 3.

Анализ изменения уровня шума во времени при прохождении сулоя над приемным гидрофоном в 1/3 октавных полосах для центральных частот 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 кГц и в широкой полосе (рис. 7) для низкочастотного гидрофона выявил, что на высоких частотах происходит более резкий рост уровня шума при приближении сулоя к гидрофону, в то время как спад шума при его удалении примерно одинаков на всех частотах. Одним из возможных объяснений этого эффекта может быть, по-видимому, переизлучение звука корпусом судна, с которого была опущена приемная система, при его контакте с фронтом полосы сулоя. Перепад уровней принимаемого шума в отсутствие сулоя и при его максимальном влиянии с понижением частоты уменьшается, составляя

для частоты 0.5 кГц только 5–6 дБ. Этот эффект может быть интерпретирован с помощью моделирования условий формирования шумового поля полосой активного взаимодействия внутренней волны с поверхностью океана.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ШУМООБРАЗОВАНИЯ

Для моделирования процесса шумообразования при прохождении над приёмным гидрофоном полосы сулоя была доработана компьютерная программа по расчету характеристик шумового поля в слоисто-однородном океане [16]. Данная программа позволяет, в лучевом приближении, моделировать эффекты, возникающие при распространении в водной толще внутренней волны, не выходящей к поверхности. Эти эффекты проявляются в изменении угловой ширины зоны рефракционного минимума в вертикальной характеристике анизотропии шумового поля и связаны с изменением скорости звука на горизонте приема, вызванным влиянием внутренней волны. При этом плотность мощности поверх-

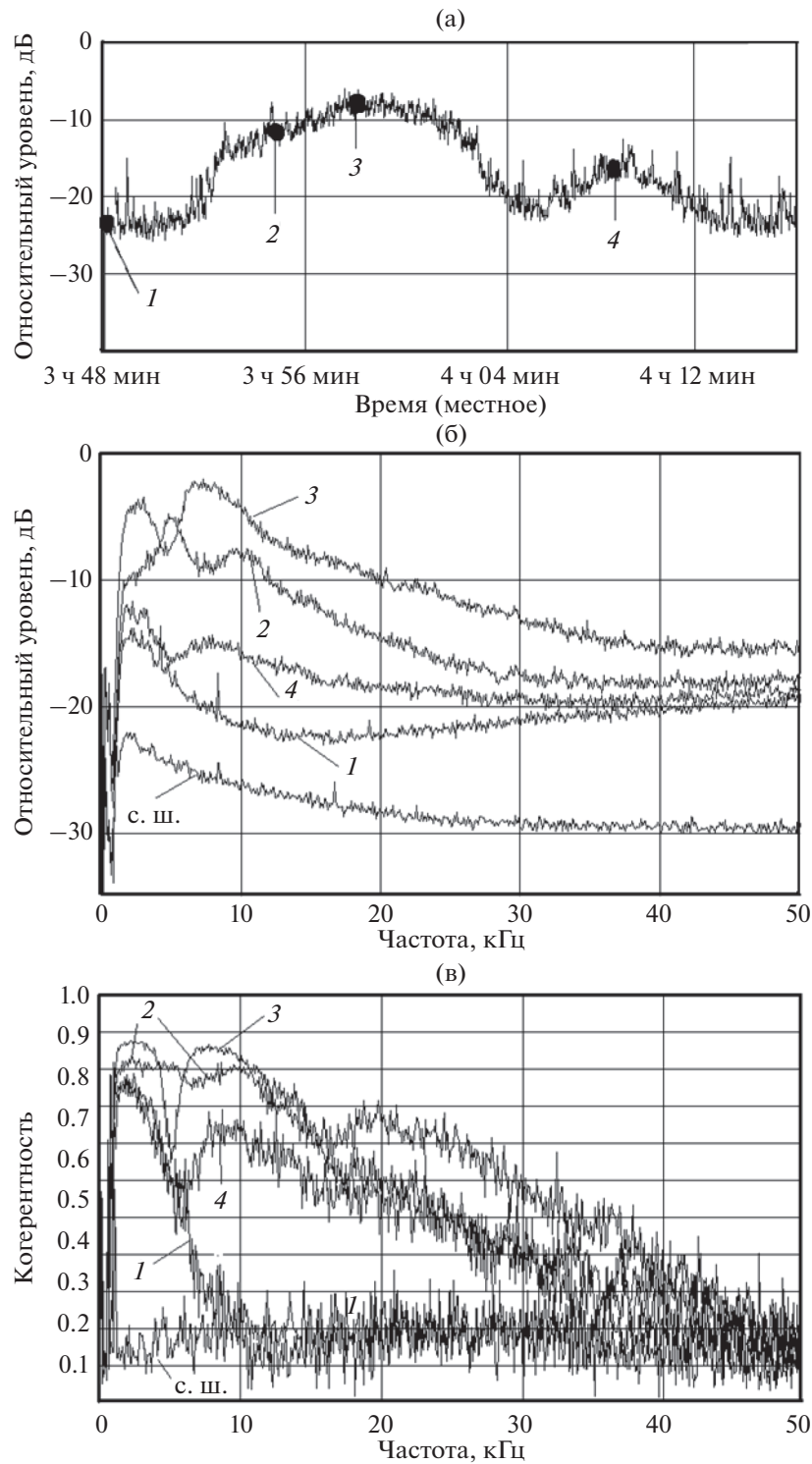


Рис. 5. Влияние суоя на спектральные характеристики шумов океана. (а) — Изменение во времени уровня шума, принятого ненаправленным гидрофоном в широкой полосе частот (низкочастотный гидрофон); (б) — спектральные уровни шума в моменты времени, отмеченные на рис. 5а цифрами 1–4 (высокочастотный гидрофон); (в) — функции когерентности шумов в моменты времени, отмеченные на рис. 5а цифрами 1–4 (высокочастотные гидрофоны).

ностных источников считается неизменной на всей шумообразующей акватории [8]. В доработанном варианте программа позволяет моделиро-

вать перемещающуюся по поверхности океана полосу суоя в виде области заданной ширины и бесконечной длины, характеристики источников

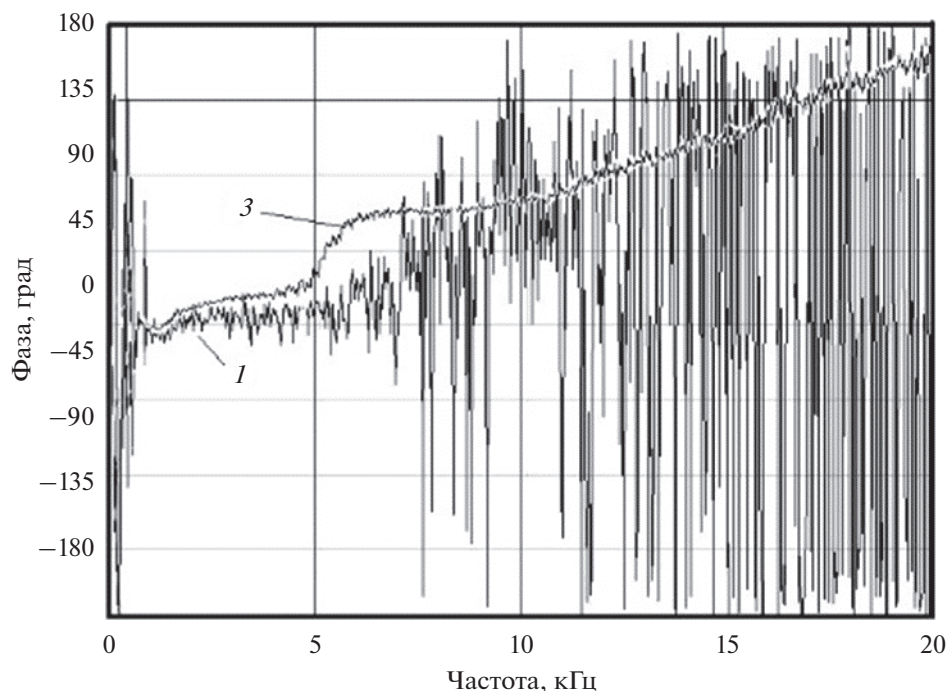


Рис. 6. Фазочастотные характеристики шума, принимаемого двумя вертикально расположенными гидрофонами в отсутствие (1) и при наличии (3) (см. рис. 5а) на поверхности океана полосы сулоя.

шума в которой (поверхностная плотность мощности и диаграмма направленности) отличаются от соответствующих характеристик на остальной акватории. В качестве примера на рис. 8а приведён расчет изменения уровня шума, принимаемого ненаправленным гидрофоном, при перемещении по акватории полосы сулоя шириной 1500 м для различных глубин приема от 100 до 1000 м. Точка с координатой 0 м по оси абсцисс соответствует положению передней границы сулоя над приемным гидрофоном, точка 4500 м — расстояние до дальней границы сулоя при его удалении. Частота 1 кГц. Вертикальный профиль скорости звука соответствует гидрологическим условиям района Маскаренского хребта в Индийском океане, для которого выше были приведены экспериментальные данные. Уровень шума, излучаемый поверхностными ветровыми источниками вне сулоя, задавался соответствующим скорости ветра над акваторией 5 м/с, диаграмма направленности источников шума $\sim \cos^n \alpha_n$ (α_n — угол падения луча на поверхность, $n = 2$ — показатель степени, характеризующий направленность источников шума). Ввиду отсутствия в настоящее время каких-либо достоверных данных о мощности и направленности источников шума в сулое, при расчетах их плотность мощности задавалась на 12 дБ больше, чем плотность мощности ветровых источников на акватории, а диаграмма направленности считалась такой же, как на остальной акватории. Из рис. 8а видно, что при увеличении глубины

приема влияние сулоя уменьшается, при этом при удалении ближней границы сулоя от точки приема на расстояние порядка его ширины уровень шума спадает до уровня, создаваемого ветровыми источниками на акватории. Следует отметить, что в зависимости от вида вертикального профиля скорости звука и глубины приема влияние сулоя на уровень принимаемого шума может спадать как быстрее, так и медленнее, чем в рассмотренном случае. На рис. 8б приведен пример расчета изменения уровня ненаправленного приема на глубине 100 м при перемещении по акватории полосы сулоя, аналогичного предыдущему, но при различной направленности источников шума в нем. Видно, что обострение диаграммы направленности источников шума приводит к увеличению перепада между уровнями шума, принимаемыми гидрофоном, расположенным под сулоем и на некотором расстоянии от него.

Дальнейшие экспериментальные и модельные исследования эффектов, возникающих при перемещении полосы сулоя по поверхности океана, позволят решить обратную задачу по определению поверхностной плотности мощности и направленности источников шума в сулое в зависимости от частоты приема и характеристик внутренней волны, а также оценить влияние перемещения полосы сулоя по поверхности океана на уровень принимаемого шума для различных глубин, частот и гидролого-метеорологических условий на шумообразующей акватории.

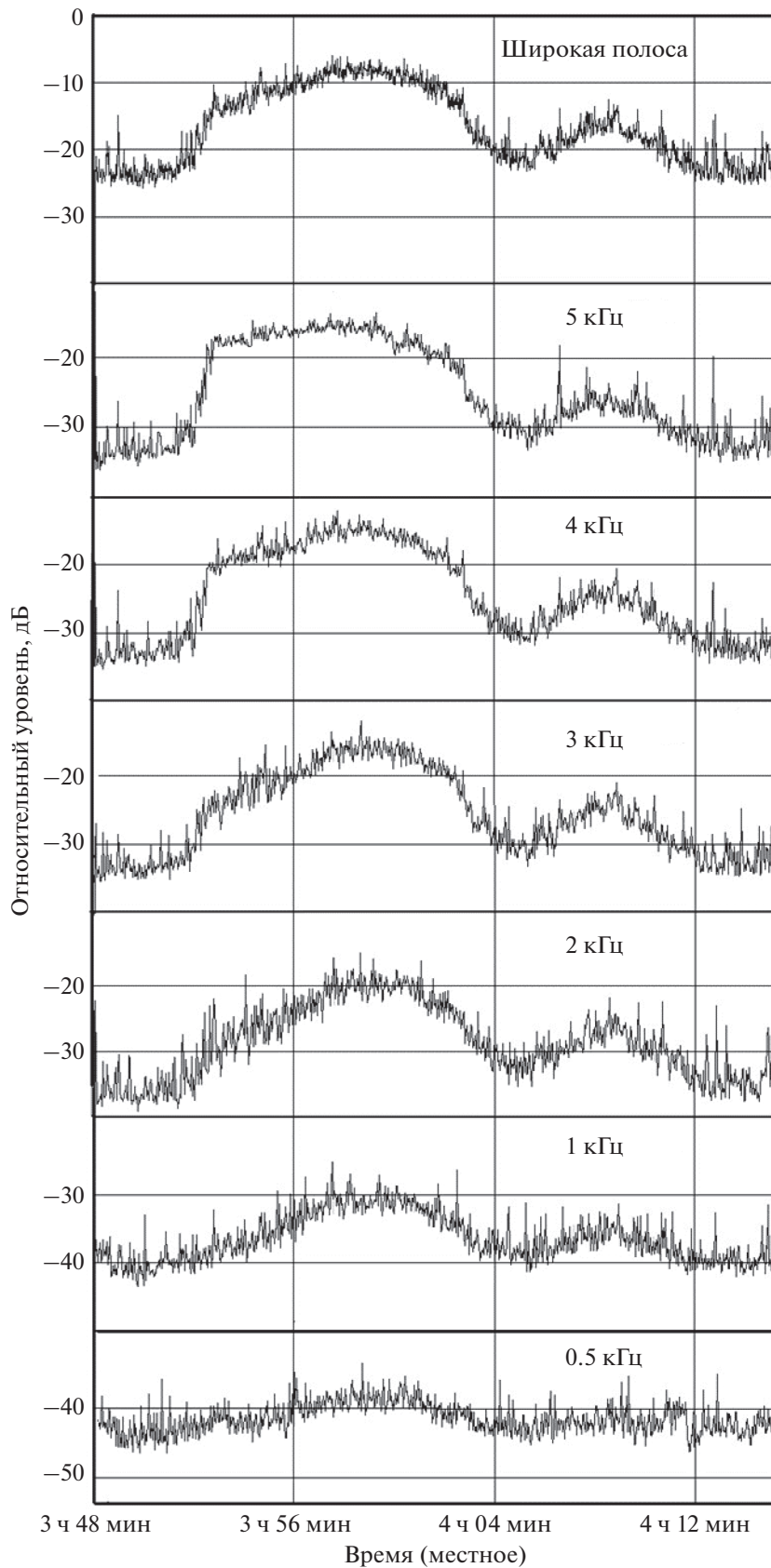


Рис. 7. Изменение уровня шума во времени при прохождении сулоя над приемным гидрофоном в 1/3 октавных полосах для центральных частот 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 кГц и в широкой полосе.

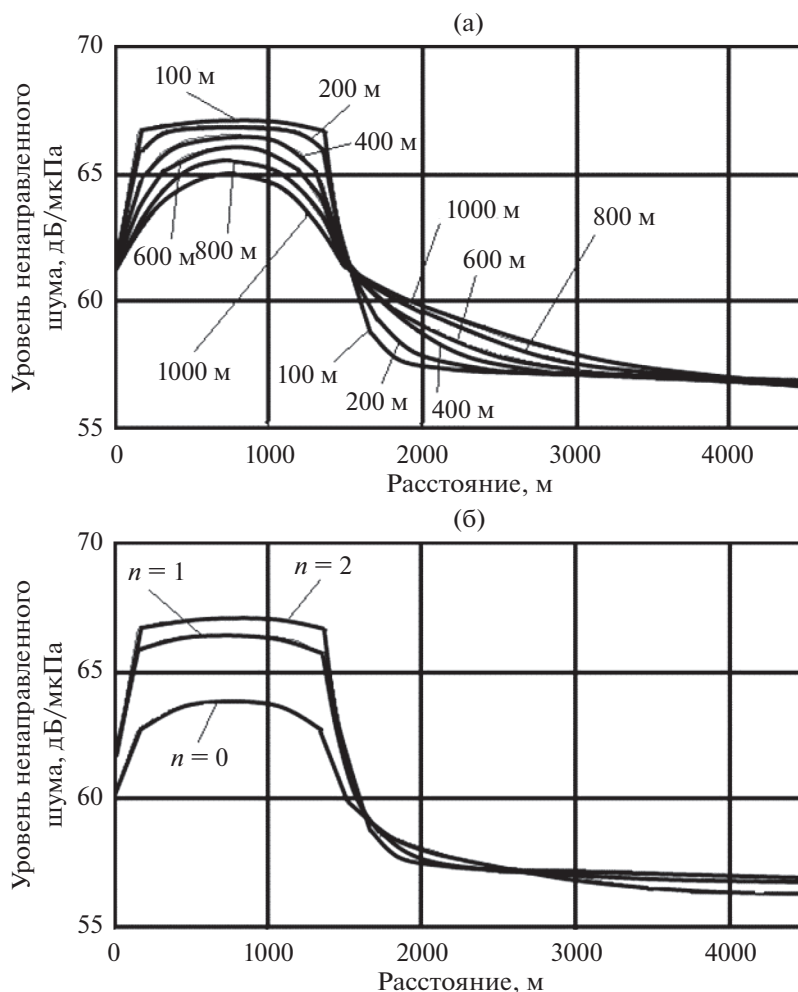


Рис. 8. Расчет изменения уровня шума, принимаемого ненаправленным гидрофоном, при перемещении по поверхности акватории полосы сулоя шириной 1500 м, частота – 1 кГц: (а) – для глубин приема 100–1000 м, показатель степени в диаграмме направленности источников шума в сулое $n = 2$; (б) – глубина приема 100 м, показатель степени в диаграмме направленности источников шума в сулое $n = 0, 1, 2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тематика, связанная с рассмотрением внутренних волн как источников подводного шума, получает свое развитие, о чем свидетельствуют публикации последних лет. Измерения в Южно-Китайском море выявили увеличение спектра подводного шума на 5–8 дБ в диапазоне частот 1–2 кГц при прохождении сулоя, сопровождающего единичную внутреннюю волну 50-метровой амплитуды [17]. Интересен факт, что эта волна была 2-ой модой в отличие от волны 1-ой моды на Маскаренском хребте.

Поскольку интенсивные внутренние волны типичны не только для глубокого моря, но и для шельфовой зоны, то можно ожидать проявление обсуждаемого нами акустического эффекта и для внутренних волн мелководья. В данных эксперимента Shallow Water 2006 (SW06), проведенного на атлантическом шельфе США, были отмечены

признаки усиления подводного шума при прохождении переднего фронта 20-метровой внутренней волны типа углубления [18, 19]. Эффект не такой сильный, как в упомянутых выше случаях, но следует заметить, что сулойные полосы, сопровождавшие внутренние волны на шельфе, были существенно менее интенсивны. Были проведены исследования подводных шумов, связанных с внутренними волнами на шельфе Южно-Китайского моря, при этом были использованы данные эксперимента ASIAEX 2001 SCS [20]. В этом случае внутренние волны распространялись по термоклину, прижатому ко дну, вследствие чего они имели форму волн возвышения. У таких волн область конвергенции орбитальных течений смещена на задний склон, в отличие от волн углубления, которые наблюдаются на глубокой воде. Соответственно, сулойная полоса размещается не над передним склоном внутренней волны, а над

задним. В работе [20] по данным заякоренной вертикальной антенны гидрофонов было выявлено усиление подводного шума на 3 дБ на частоте 1 кГц при прохождении заднего склона внутренней волны возвышения. Все вышеупомянутые случаи имеют экспериментальные подтверждения распространения подводного шума от морской поверхности вглубь, но внутренние волны способны генерировать также придонный шум.

В эксперименте SW06 были выявлены механизмы генерации подводного шума, причиной которого служат интенсивные внутренние волны, взаимодействующие с дном. Было обнаружено, что при прохождении цугов интенсивных солитоноподобных внутренних волн на спектрограммах сигналов гидрофонов донной горизонтальной антенны появляются мощные всплески в широкой полосе частот [19]. В дальнейшем было выяснено, что эти всплески появляются в моменты прохождения подошв внутренних волн. Измеренные орбитальные течения головных 20-метровых волн цугов в придонном слое достигают 0.5 м/с и более, причем их величины достигают максимума в фазе прохождения подошв волн. Регистрируемый при этом грохот происходил из-за способности течений в эти моменты смещать горизонтальную антенну по дну. Таким образом, причиной зарегистрированных всплесков было перемещение и трение гидрофонов о дно. Авторы работы [21], также проводившие анализ шумов, связанных с прохождением внутренних волн в SW06, выделили дополнительно еще два типа шума. Все они связаны с сильным течением, сопровождающим наблюдаемые нелинейные внутренние волны. Это шумы обтекания или псевдозвук, а также шумы от взвешенного вещества, переносимого течением в придонной области. Был проведен подробный анализ механизмов, вызывающих эти шумы.

В целом, принимая во внимание повсеместное распространение в океане интенсивных внутренних волн, создающих сулойные полосы, можно с большой долей доказательности говорить о широкой распространенности механизма генерации шума на океанских акваториях внутренними волнами больших амплитуд. В заключение заметим, что внутренние волны, сопровождаемые суоями, хорошо видны на снимках поверхности океана из космоса. Это обстоятельство позволяет говорить о перспективе мониторинга рассмотренного типа подводных шумов на больших акваториях с помощью дистанционного космического зондирования.

Обработка части результатов эксперимента выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки РФ № 0149-2019-0011 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-55-S52005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* “Горячие точки” в поле внутренних волн в океане // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53. № 3. С. 410–436.
2. *Konyaev K.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Large-amplitude internal waves at the Mascarene Ridge in the Indian Ocean // *Deep Sea Research I.* 1995. V. 42. № 11/12. P. 2075–2091.
3. *Коняев К.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Два пути возникновения интенсивных внутренних волн вблизи подводного хребта // *Докл. Акад. наук.* 1994. Т. 338. № 4. С. 537–540.
4. *Серебряный А.Н.* Сливо- и сулообразующие явления в море. Внутренние волны // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2012. Т. 9. № 2. С. 275–286.
5. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 376 с.
6. *Серебряный А.Н., Фурдуев А.В., Аредов А.А., Охрименко Н.Н.* Шум внутренней волны большой амплитуды в океане // *Докл. Акад. наук.* 2005. Т. 402. № 4. С. 543–547.
7. *Аредов А.А., Дронов Г.М., Фурдуев А.В.* Влияние ветра и внутренних волн на параметры шума океана // *Акуст. журн.* 1990. Т. 36. № 4. С. 581–585.
8. *Аредов А.А., Галыбин Н.Н., Фурдуев А.В.* Акустико-океанологический эксперимент по регистрации внутренних волн // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39. № 4. С. 584–591.
9. *Галыбин Н.Н., Серебряный А.Н.* Обратное поверхностное рассеяние звука как инструмент исследования внутренних волн в океане // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43. № 3. С. 333–337.
10. *Веселов В.М.* Отчет отряда радиометрических измерений // *Отчет о работах в 26-ом рейсе НИС “Дмитрий Менделеев”.* Т. 1. Отчеты. Ч. 2. М.: ИОАН, 1981. С. 138–183.
11. *Бреховских Л.М.* Звуковые волны под водой, обусловленные поверхностными волнами в океане // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1966. Т. 2. № 9. С. 970–980.
12. *Cato D.H.* Theoretical and measured underwater noise from surface wave orbital motion // *J. Acoust. Soc. Am.* 1991. V. 89. № 3. P. 1096–1112.
13. *Наугольных К.А., Рыбак С.А.* О генерации звука при взаимодействии поверхностных волн // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 1. С. 100–103.
14. *Акустика океана.* Под ред. Бреховских Л.М. М.: Наука, 1974. С. 681–687.
15. *Natural Physical Sources of Underwater Sound: Sea Surface Sound (2)* / Ed. Kerman B.R. Dordrecht: Kluwer, 1993.
16. *Аредов А.А., Охрименко Н.Н., Фурдуев А.В.* Анизотропия шумового поля в океане (эксперимент и расчет) // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. № 2. С. 215–221.
17. *Серебряный А.Н., Liu С-Т., Аредов А.А.* Генерация подводного шума внутренней волной 2-ой моды в Южно-Китайском море // *Акустика океана. Доклады 17-ой школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских.* М.: ИОРАН, 2020. С. 174–179.

18. *Serebryany A.N., Newhall A., Lynch J.F.* Observations of noise generated by nonlinear internal waves on the continental shelf during the SW06 experiment // *J. Acoust. Soc. Am.* 2008. V. 123. № 5. P. 3589–3589.
19. *Серебряный А.Н., Lynch J., Newhall A.* Генерация подводного шума нелинейными внутренними волнами на атлантическом шельфе США во время эксперимента “Shallow Water 2006” // *Ежегодник РАО.* 2008. Вып. 9. Акустика неоднородных сред. С. 217–227.
20. *Hsiang-Chih Chan, Chi-Fang Chen, Andrey Serebryany, Ruey-Chang Wei, Yiing-Jang Yang.* Noises from elevation internal waves on the South China Sea continental shelf // *Proc. of 10 European Conference on Underwater Acoustics.* Istanbul, Turkey, 2010. P. 695–700.
21. *Katsnelson B.G., Zhang Q., Godin O.A.* Observations of acoustic noise bursts accompanying nonlinear internal gravity waves on the continental shelf off New Jersey // *J. Acoust. Soc. Am.* 2021. V. 149. № 3. P. 1609–1622.