Физические поля корабля, океана и атмосферы

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-10>
УДК 551.466.82, 550.34.016

А.В. Кошелева, И.О. Ярошук, А.Н. Швырев, А.Н. Самченко, А.А. Пивоваров,
О.Э. Гулин, Р.А. Коротченко, Е.И. Ярошук

КОШЕЛЕВА АЛЕКСАНДРА ВАСИЛЬЕВНА – научный сотрудник, SPIN: 1749-6479,
ResearcherID: L-1171-2018, ORCID: 0000-0001-6508-6325,
Scopus ID 6603109229, e-mail: kosheleva@poi.dvo.ru

ЯРОШУК ИГОРЬ ОЛЕГОВИЧ – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией,
e-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru

ШВЫРЕВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник,
e-mail: shvyrev@poi.dvo.ru

САМЧЕНКО АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ – к.г.н., старший научный сотрудник,
e-mail: samchenco@poi.dvo.ru

ПИВОВАРОВ АЛЕКСАНДР АНАТОЛЬЕВИЧ – научный сотрудник,
e-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

ГУЛИН ОЛЕГ ЭДУАРДОВИЧ – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник,
e-mail: gulinoe@poi.dvo.ru

КОРОТЧЕНКО РОМАН АНАТОЛЬЕВИЧ – к.т.н., старший научный сотрудник,
e-mail: romankor@mail.ru

ЯРОШУК ЕЛЕНА ИГОРЕВНА – научный сотрудник, e-mail: e.yaroshchuk@poi.dvo.ru
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, Россия

Особенности высокочастотной составляющей фоновых внутренних гравитационных волн на шельфе Японского моря

Аннотация: Для решения прямых и обратных задач практической гидроакустики необходимо иметь наборы статистических феноменологических моделей пространственно-временных вариаций скорости звука. Как правило, такие возмущения определяются внутренними гравитационными волнами (ВГВ), что делает актуальной проблему разработки их адекватных статистических моделей. В данной работе на основе результатов обработки экспериментальных данных проанализированы характеристики высокочастотной (превышающей 2,5 цикл/ч) составляющей фоновых ВГВ. Натурные наблюдения проводились авторами на шельфе в юго-западной части залива Петра Великого Японского моря в весенний, летний и осенний сезоны на протяжении последнего десятилетия. Проведенный анализ наиболее интенсивных изотерм демонстрирует, что с достаточной точностью флуктуации температуры можно считать гауссовыми. Это позволило авторам разработать и применить методику рандомизации спектрального представления случайного поля (ковариационной матрицы ВГВ) для построения статистической рандомизированной модели, из которой можно выбирать отдельные статистические реализации поля ВГВ для решения конкретных прикладных задач гидроакустики.

© Кошелева А.В., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Гулин О.Э., Коротченко Р.А., Ярошук Е.И., 2020
О статье: поступила: 21.02.2020; работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана» (№ гос. регистрации АААА-А20-120021990003-3).

связанных в том числе и с разработкой судовой аппаратуры для подводной связи, навигации и обнаружения подводных и надводных источников звука.

Ключевые слова: внутренние волны, гидрофизические поля, экспериментальные исследования, феноменологическая модель, шельфовая зона.

Введение

Принято считать, что основным источником генерации внутренних гравитационных волн (ВГВ) на шельфе является взаимодействие течений баротропного прилива с континентальным склоном и с подводными хребтами. Приливные течения,двигающиеся из глубокого океана к берегу, встречая на своем пути материковый склон, получают вертикальные составляющие, которые смещают изопикнические поверхности, что и вызывает ВГВ приливного периода [9].

По нашим наблюдениям [6], основным источником колебаний частичек воды с инерционной частотой является ветровое воздействие на шельф. Обычно во время и после сильных ветров на шельфе развиваются инерционные возмущения вдоль склоновых течений. Эти возмущения нестационарные по времени и неоднородные по пространству. При взаимодействии со склоном такие возмущения вызывают ВГВ на частотах, близких к инерционным. Периодичность их возникновения определяется периодичностью прохождения возмущений в атмосфере. Инерционные колебания крайне неустойчивы и, разрушаясь, они порождают цуги короткопериодных волн.

По причине конечности своей амплитуды при накате на шельф приливные и квазиинерционные ВГВ укручаются, порождая солитоноподобные волны депрессии или заглубления пикноклина. Распространяясь в прибрежные воды, волны заглубления, проходя области изменения глубины, трансформируются в цуги интенсивных короткопериодных волн [4, 11].

Как и в глубоком океане, на шельфе всегда присутствуют фоновые (линейные) ВГВ. В отличие от солитоноподобных нелинейных волн они представляют собой поле, которое в каком-то смысле (далее мы обсудим этот вопрос) можно полагать случайным. Для глубокого океана такое поле вполне удовлетворительно описывается моделью Гаррета–Манка [7], но по приведенным выше причинам для шельфовых зон океана такая модель неприемлема.

В рамках данной работы мы предполагаем сформировать феноменологические статистические модели ВГВ на основе экспериментальных океанологических данных.

Современные вычислительные средства позволяют, в принципе, справиться с самыми различными гидродинамическими моделями для любой морской акватории. Однако все эти модели для адекватного прогноза гидродинамической изменчивости требуют знания огромных объемов изменяющихся во времени данных об источниках возмущений, о краевых, граничных и начальных условиях. Все это нереально измерить, что, в конечном счете, превращает все такие вычисления в некоторую «игру». Использование же теоретических моделей для ВГВ типа моделей мелкой воды или уравнений Кортевега–де Вриза, изначально ограничено изучением динамики только одиночных солитоноподобных образований и боров [4]. Многие статистические задачи океанологии можно решить с помощью феноменологических теорий, описывающих явления в общем виде, как это делается, например, в термодинамике и статистической физике.

Феноменологические модели связывают только непосредственно наблюдаемые и измеряемые опытным путем величины, никакие модельные представления о динамике жидкости при этом не используются. Преимуществом таких моделей является их общность, универсальность и простота. Довольно часто они позволяют полнее изучить и понять описываемые ими причинно-следственные связи. Самое ценное, что такие модели могут далее использоваться для практического применения, например для решения задач о распространении звука во флуктуирующем поле ВГВ [5].

Статистические модели фоновых внутренних гравитационных волн

Основная специфика фоновых волн на шельфе состоит в том, что в фоновое поле могут вносить существенный вклад не свободные волны, а остаточные возмущения малых амплитуд цугов нелинейных волн. Такие «хвосты» бывают как достаточно длинными во времени, так и протяженными по пространству.

Как правило, фоновые внутренние волны полагаются случайными, и для их описания привлекают аппарат теории случайных процессов и полей [12]. Если рассматривать какую-либо океанологическую характеристику морской среды (плотность, температуру, соленость или скорость звука), возмущаемую ВГВ, то формально ее можно представить как сумму среднего значения и флуктуаций. Например, температуру T можно записать в виде $T(t, x, y, z) = \langle T(t, x, y, z) \rangle + \delta T(t, x, y, z)$ (здесь и далее угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций), где δT описывает случайную часть, которая получается вычитанием из наблюдаемого поля температуры некоторой средней части. Отметим, что такое представление требует предварительного выбора характерных пространственных и временных масштабов поля температуры, по которым проводится усреднение. Таким образом, флуктуации температуры определяются максимальными масштабами для неоднородностей, которые мы решили отнести к флуктуациям. Естественно, что такой выбор неоднозначный, он является условным и определяется физическим смыслом конкретной поставленной задачи (например, задача о рассеянии звука ВГВ в течение определенного интервала времени), в которой поле температуры – один из океанологических параметров.

Экспериментальные работы

Экспериментальные данные о полях ВГВ были получены авторами в заливе Петра Великого в течение последнего десятилетия на основе Conductivity-Temperature-Depth (CTD) зондирований, измерений течений, а также длительных постановок автономных цифровых комплексов (в дальнейшем – термогирлянд), размещенных на заякоренных автономных буйковых станциях [3]. Отметим, что данные с термисторов термогирлянд с высокой точностью могут быть пересчитаны в плотность воды и скорость звука в ней [1]. Спектральный анализ колебаний изотерм, расположенных в термоклине, для различных лет и сезонов указывает на то, что для линейных частот колебаний изотерм $f < (2 \div 2,5 \text{ ч})^{-1}$ в спектре существенны проявления инерционных колебаний, а также колебания различных гармоник приливного периода и их нелинейных взаимодействий с инерционными колебаниями. Подобные ситуации наблюдаются и на других шельфах Мирового океана [8].

В рамках данной статьи рассмотрим и проанализируем результаты экспериментов за три сезона (весна, лето и осень) 2017 г. На рис. 1 приведена схема исследовательского полигона, расположенного в шельфовой зоне Японского моря, он охватывает залив Посыета и прилегающую акваторию юго-западной части залива Петра Великого. Район характеризуется наличием узкого шельфа, расстояние от береговой черты до свала глубин составляет около 20 км [2].

Термогирлянды были расположены вдоль нормали к изобатам на расстоянии от 2 до 4 км друг от друга (S03, S07, S09 и S02, см. рис. 1). Кроме того, системы S03, S04 и S05 были установлены таким образом, что образовывали треугольник со сторонами около 110 м. Время непрерывной работы систем в разные сезоны составляло от 6 до 12 сут, частота опроса каждого датчика 0,1 Гц. Глубина мест постановки составляла от 54,5 до 40 м. Каждая система была оборудована датчиками давления. Количество термисторов – 35, 39 и 36 для термогирлянд с расстоянием по вертикали между датчиками 1–1,5 м (S02, S03 и S04 соответственно) и по 12 термисторов, расположенных на расстоянии 3 м друг от друга, для термогирлянд S05, S07 и S09. В местах постановки термогирлянд, а также между системами S02 и S09 с борта маломерного научно-исследовательского судна «Импульс» проводились однократные верти-

кальные зондирования водной толщи от поверхности до дна. Такие гидрологические разрезы выполнялись 2–3 раза в каждый из сезонов при помощи CTD зонда RBRconcerto с частотой дискретизации 6 Гц.

Рис. 1. Схема постановки автономных буйковых станций (красными треугольниками отмечены системы с расстоянием по вертикали между датчиками 1–1,5 м, синими – с расстоянием 3 м) и CTD-зондирований (отмечены зелеными кругами) в 2017 г.

В дальнейшем совокупность данных зондирований и длительных серий данных, полученных с термогирлянд, используется для получения вертикальных распределений плотности воды и скорости звука по методике, описанной в [10].

Материалы и методы исследования

Разработка феноменологических моделей по экспериментальным данным проводится методом рандомизации спектрального представления случайного поля или его корреляционных функций. С помощью линейного фильтра разделим ряды температуры, полученные с термисторов заякоренных термогирлянд, на высокочастотную (частоты выше 2,5 цикл/ч) и на низкочастотную части [12]. Соответствующие им внутренние волны обозначим сокращениями ВЧ и НЧ соответственно. На рис. 2 представлены колебания изотермы 15 °С в НЧ и ВЧ диапазонах на протяжении 5 сут. Данная изотерма выбрана в термоклине на станции S03 в летний период, она является наиболее динамично изменяющейся во времени по сравнению с другими изотермами.

Рис. 2. Изотерма 15 °С, термогирлянда S03 8–13 августа 2017 г. Вариации: НЧ – красная линия, ВЧ – зеленая.

Как демонстрирует рис. 2, ВЧ часть изотермы имеет достаточно малые амплитуды, в основном не превышающие 2 м, визуально она напоминает стационарный случайный процесс. Низкочастотная часть изменяется по глубине более чем на 10 м.

На рис. 3 представлена спектральная мощность ВЧ части ВГВ, рассчитанная по изотермам для мая, августа и октября. Преобразование Фурье выполнено по участкам 6 ч. Спектры усреднены за 5 сут с 50% перекрытием участков.

Рис. 3. Спектры мощности, рассчитанные для изотерм: 6,5 °С (зеленая линия – май), 15 °С (красная линия – август), 15 °С (синяя линия – октябрь), термогирлянда S03.

Как показывают графики (рис. 3), высокочастотные «хвосты» спадают в августе и октябре примерно как ω^{-3} , а весной, в мае, не быстрее, чем $\omega^{-3/2}$. В областях же частот более чем 5–10 цикл/ч спектры мощности вообще могут быть немонотонными. Напомним, что в модели Гаррета–Манка для глубокого океана спектры в этой области монотонные и спадают как ω^{-2} [7].

Проверка на гауссовость

Важный этап анализа ВЧ поля ВГВ состоит в его проверке на гауссовость (т.е. на соответствие нормальному распределению). Для этого к реализациям ВЧ поля были применены критерий хи-квадрат и критерий Колмогорова–Смирнова. Напомним, что статистические критерии, как правило, предполагают статистическую независимость значений исследуемой последовательности случайных чисел. Поэтому до проведения тестов на гауссовость необходимо определить масштаб корреляции случайной последовательности по времени, а затем уже выбирать интервалы между значениями последовательности много больше, чем радиус корреляции.

Математическая обработка случайных реализаций позволила установить, что за все три сезона временной масштаб корреляции находится в интервале 10–20 мин. Исходя из этих величин, для различных горизонтов на разных термогирляндах и в различные сезоны формировались реализации с интервалами $\Delta t = \{30, 60, 90\}$ мин между временами измерений. При этом тестированию подвергались все возможные реализации случайного процесса, в которых начальное значение сдвигалось на один отсчет. Таким образом, вместо исходной реализации

$T(t_m)$, ($t_m = m \delta t$, $\delta t = 10$ с, $m = 1, 2, \dots$) на фиксированном горизонте z рассматривался целый набор сформированных реализаций. Например, для выбранного $\Delta t = 30 \times 60$ с и фиксированного значения $n = (0, 1, 2, \dots)$ тестировалась реализация со статистически независимыми значениями $T(n \delta t + k \Delta t)$ (здесь $k = (0, 1, 2, \dots)$), т.е. полагаем, что для центрированной величины $T(t)$ приближенно выполняется равенство $\langle T(n \delta t + k \Delta t) T(n \delta t + j \Delta t) \rangle \approx 0$. Таким образом, за период 5 сут на одном горизонте на гауссовость протестировано $5 \times 24 \times 60 / 30 = 240$ реализаций.

На рис. 4 показаны результаты теста Колмогорова–Смирнова на гауссовость ВЧ колебаний температуры на нескольких станциях через 1 м по глубине.

Рис. 4. Результаты теста Колмогорова–Смирнова реализаций ВЧ составляющей температуры на горизонтах через 1 м по глубине в августе 2017 г. за 5 сут. По оси абсцисс – процент количества реализаций, прошедших тест, по оси ординат – глубина в метрах. Синие кривые – $\Delta t = 30$ мин, зеленые – $\Delta t = 60$ мин, красные – $\Delta t = 90$ мин.

Прежде всего отметим, что увеличение параметра Δt с 30 до 90 мин значительно увеличивает количество реализаций, прошедших тест на гауссовость. Это естественно, так как по мере увеличения параметра Δt уменьшается и корреляция между отсчетами. Рисунок 4 показывает, что кривые для $\Delta t = 90$ мин качественно соответствуют средней за 5 сут частоте плавучести $N(z)$. Отсюда следует очевидный вывод, что на некоторых горизонтах в отдельные моменты времени за 5 сут бывают ситуации, когда $N(z) < 2,5$ цикл/ч. В этих случаях в реализациях отсутствуют какие-либо колебания, что и приводит к нарушению свойства их гауссовости за 5 сут наблюдения. Особенно хорошо это видно на станции S02. Здесь в интервале глубин 12–16 м заметную часть времени эксперимента частота плавучести была менее чем 2,5 цикл/ч. Соответственно, ни одна реализация на этих горизонтах не прошла тест на гауссовость. Однако на горизонтах, где колебания имели место практически все время эксперимента, количество реализаций, прошедших тест, близко к 100%. Таким образом, на физическом уровне строгости можем полагать, что при условии $N(z) \geq 2,5$ цикл/ч ВЧ поле колебаний температуры можно считать гауссовым. Учитывая, что для данного региона плотность и скорость звука с хорошей точностью являются линейными функциями температуры [11], то ВЧ вариации этих параметров тоже можно считать гауссовыми.

Статистическое моделирование

Рассмотрим теперь вопрос о статистическом моделировании высокочастотного поля температуры. Как известно, для гауссового случайного процесса $T(z)$ достаточно знать его ковариационную матрицу $\mathbf{B} = \langle T(z_m) T(z_n) \rangle$. На рис. 5 слева приведена ковариационная матрица ВЧ составляющей вариаций температуры на термогирлянде S03 8–13 августа 2017 г. Матрица рассчитана для диапазона глубин от 3,5 до 39 м с шагом по глубине 0,5 м. Элементы ее главной диагонали, представляющие собой дисперсии этих вариаций, приведены на

средней части рис. 5 в виде зависимости дисперсии от глубины. Очевидно, что максимальные отклонения происходили на глубине около 23 м, а это соответствует расположению термоклина: правая часть рис. 5 демонстрирует граничные значения распределения $T(z)$ за 5 сут, а также средний профиль температуры за это время.

Рис. 5. Слева – ковариационная матрица ВЧ вариаций температуры $\mathbf{B}(z_m, z_n)$, вычисленная за 5 сут августа на станции S03. Посередине – дисперсия ВЧ вариаций (главная диагональ матрицы $\mathbf{B}$). Справа – среднее значение (зеленая линия), минимальное (синяя линия) и максимальное (красная линия) значения температуры за 5 сут.

Стандартным образом рандомизируем теперь ковариационную матрицу [5]. Для этого сначала вычислим ее собственные векторы $\mathbf{B} \mathbf{h}_m = \lambda_m \mathbf{h}_m$ ($m = 1 \div M$). Матрица $\mathbf{B}$ симметричная и положительно определенная, поэтому ее собственные значения λ_m будут положительными. Пусть теперь у нас есть M статистически независимых нормально распределенных случайных чисел $\{\eta_m\}$, таких, что выполняется условие: $\langle \eta_m \rangle = 0$, $\langle \eta_m \eta_j \rangle = 0$, $\langle \eta_m^2 \rangle = \lambda_m$. Легко проверить, что гауссово случайное поле $\mathbf{T} = \sum_m \eta_m \mathbf{h}_m$ описывается ковариационной матрицей $\mathbf{B}(z_m, z_n)$, а значит, оно статистически эквивалентно в широком смысле исходному полю температуры, зарегистрированному на выбранной термогирлянде [5].

Таким образом, по измерениям флуктуаций температуры на каждой термогирлянде, по вычисленным ковариационным матрицам $\mathbf{B}(z_m, z_n)$, мы можем получать любой статистический ансамбль случайных реализаций температуры $T(z)$ (в данном случае это и есть рандомизация). Дополнительный корреляционный анализ статистической связи температуры на различных термогирляндах позволяет точно также разыгрывать одновременно статистические реализации $T(z)$ вдоль всей трассы измерений. В данном случае ансамбль таких реализаций и является феноменологической статической моделью поля флуктуаций температуры вдоль исследуемой трассы (рис. 1).

Закключение

Итак, авторами проведены экспериментальные и теоретические исследования высокочастотной составляющей фоновых (линейных) ВГВ. Было установлено, что с достаточной точностью флуктуации температуры можно считать гауссовыми. Для проведения статистического моделирования предложен алгоритм рандомизации ковариационной матрицы ВГВ. Разработаны статистические феноменологические модели поля внутренних гравитационных волн.

Следуя предложенной методике, по экспериментальным данным можно построить не просто некоторую теоретическую, но статистическую рандомизированную модель флуктуаций. Впоследствии из нее можно выбирать отдельные статистические реализации поля ВГВ. В этом заключается новизна решенной задачи. Выбор таких реализаций представляет как научную ценность в области статического моделирования звуковых волн, так и практическую ценность при решении прикладных задач гидроакустики, делая возможным проводить расчеты для реальных параметров среды.

Флуктуации звука, вызванные ВГВ, могут существенно исказить регистрируемые акустические сигналы. Такие искажения должны учитываться проектировщиками судовой аппаратуры путем имитационного моделирования процесса приема флуктуирующих сигналов на основе феноменологических моделей. Планируемые работы, включающие как дальнейшее накопление экспериментальных данных, так и теоретические исследования полей ВГВ, позволят уточнить особенности влияния высокочастотной составляющей этих полей на прохождение подводных гидроакустических сигналов.

Вклад авторов в статью: А.В. Кошелева – обработка экспериментальных данных, написание и редактирование статьи; И.О. Ярошук – общее руководство, написание текста, разработка методики моделирования; А.Н. Швырев – работа с данными, моделирование; А.Н. Самченко – получение экспериментальных данных, работа с текстом статьи; А.А. Пивоваров – получение экспериментальных данных, работа с текстом статьи; О.Э. Гулин – разработка методики моделирования; Р.А. Коротченко – работа с текстом статьи, Е.И. Ярошук – оформление статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротченко К.А. Регрессионный метод оценки солёности в океане // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 4. С. 501–512.
2. Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярошук И.О. Пространственно-временной анализ геоморфологии дна залива Петра Великого (Японское море) // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 4. С. 538–545.
3. Леонтьев А.П., Ярошук И.О., Смирнов С.В., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н. Пространственно-распределенный измерительный комплекс для мониторинга гидрофизических процессов на океаническом шельфе // *ПТЭ*. 2017. № 1. С. 128–135.
4. Талипова Т.Г., Пелиновский Е.Н., Куркин А.А., Куркина О.Е. Моделирование динамики интенсивных внутренних волн на шельфе // *Изв. РАН. ФАО*. 2014. Т. 50, № 6. С. 714–722. DOI: 10.1134/S0001433814060164
5. Ярошук И.О., Гулин О.Э. Метод статистического моделирования в задачах гидроакустики. Владивосток: Дальнаука, 2002. 352 с.
6. Ярошук И.О., Леонтьев А.П., Кошелева А.В., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Степанов Д.В., Швырев А.Н. Об интенсивных внутренних волнах в прибрежной зоне залива Петра Великого (Японское море) // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 9. С. 55–62.
7. Garrett C., Munk W. Space-time scales of internal waves: a progress report. *J. Geoph. Res.* 1975;80:3:291–297.
8. Haren H., Mass L., Aken H. On the nature of internal wave spectra near a continental shope. *Geoph. Res. Letters*. 2002;29(12):57-1–57-3. DOI: 10.1029/2001GL014341.
9. Helfrich K.R., Melville W.K. Long nonlinear internal waves. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2006;38:395–425. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092129
10. Kosheleva A.V., Lazaryuk A.Yu., Yaroshchuk I.O. Estimation of acoustic and oceanological sea-water characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone. *Proc. of Meetings on Acoustics*. 2015;24, 005001. DOI: 10.1121/2.0000109.
11. Lien R.-Ch., Henyey F., Ma B., Yang Y.J. Large-amplitude internal solitary waves observed in the northern South China sea: properties and energetic. *J. Phys. Oceanography*. 2014;44(4):1095–1115. DOI: 10.1175/JPO-D-13-088.1
12. Thomson R.E., Emery W.J. *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier, 2014. DOI: 10.1016/B978-0-444-50756-3.X5000-X

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-10>

Kosheleva A., Yaroshchuk I., Shvyrev A., Samchenko A., Pivovarov A., Gulin O., Korotchenko R., Yaroshchuk E.

ALEXANDRA KOSHELEVA, ResearcherID: L-1171-2018, ORCID: 0000-0001-6508-6325,

Scopus ID: 6603109229, e-mail: kosheleva@poi.dvo.ru

IGOR YAROSHCHUK, Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Head of Laboratory,

e-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru

ALEKSEY SHVYREV, Candidate of Physics and Mathematical Sciences, Senior Researcher,

e-mail: shvyrev@poi.dvo.ru

ALEXANDER SAMCHENKO, Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher,

e-mail: samchenko@poi.dvo.ru

ALEXANDER PIVOVAROV, Researcher, e-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

OLEG GULIN, Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Leading Researcher,

e-mail: gulinoe@poi.dvo.ru

ROMAN KOROTCHENKO, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,

e-mail: romankor@mail.ru

ELENA YAROSHCHUK, Researcher, e-mail: e.yaroshchuk@poi.dvo.ru

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS

Vladivostok, Russia

Specific features of high-frequency component of background internal gravity waves on the shelf of the Sea of Japan

Abstract: To solve both direct and inverse problems of practical hydroacoustics, one needs a set of statistical phenomenological models of spatiotemporal variations of sound speed. As a rule, such variations are determined by internal gravity waves (IGW), which makes the problem of developing adequate statistical models of IGW a pending issue. In this paper, based on results of the experimental data processing, the characteristics of high-frequency (exceeding 2.5 cycles/h) component of the background IGW are analyzed. Field observations were carried out by the authors on the shelf in the southwestern part of Peter the Great Bay of the Sea of Japan in spring, summer, and autumn seasons over the past ten years. Analysis of the most intense isotherms demonstrates that the temperature variations can be considered Gaussian with sufficient accuracy. This fact allowed the authors to develop and apply a randomization technique for the spectral representation of a random field (the IGW covariance matrix) to construct a randomized statistical model from which it is possible to select some statistical implementations of the IGW field for solving specific applied problems of hydroacoustics.

Keywords: internal waves, hydro-physical fields, experimental studies, phenomenological model, shelf zone.

REFERENCES

1. Korotchenko K.A. A regression method for estimating salinity in the ocean. *Oceanology*. 2007; 47(4):464–475. DOI: 10.1134/S0001437007040030
2. Korotchenko R.A., Samchenko A.N., Yaroshchuk I.O. The spatiotemporal analysis of the bottom geomorphology in Peter the Great Bay of the Sea of Japan. *Oceanology*. 2014;54(4):497–504. DOI: 10.1134/S0001437014030047.
3. Leontyev A.P., Yaroshchuk I.O., Smirnov S.V., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N.,

- Shvyrev A.N. A spatially distributed measuring complex for monitoring hydrophysical processes on the ocean shelf. *Instruments and Experimental Techniques*. 2017(60);1:130–136. DOI: 10.1134/S0020441216060191
4. Talipova T.G., Pelinovsky E.N., Kurkin A.A., Kurkina O.E. Modeling the dynamics of intense internal waves on the shelf. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014;50(6):630–637. DOI:10.1134/S0001433814060164
5. Yaroshchuk I.O., Gulín O.E. Statistical modeling method in hydroacoustics problems. Vladivostok. Dalnauka, 2002, 352 p.
6. Yaroshchuk I.O., Leont'ev A.P., Kosheleva A.V., Pivovarov A.A., Samchenko A.N., Stepanov D.V., Shvyryov A.N. On intense internal waves in the coastal zone of the Peter the Great Bay (the Sea of Japan). *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2016(9):629–634. DOI: 10.3103/S1068373916090053.
7. Garrett C., Munk W. Space-time scales of internal waves: a progress report. *J. Geoph. Res.* 1975;80:3:291–297.
8. Haren H., Mass L., Aken H. On the nature of internal wave spectra near a continental shope. *Geoph. Res. Letters*. 2002;29(12):57-1–57-3. DOI: 10.1029/2001GL014341
9. Helfrich K.R., Melville W.K. Long nonlinear internal waves. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2006;38:395–425. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092129
10. Kosheleva A.V., Lazaryuk A.Yu., Yaroshchuk I.O. Estimation of acoustic and oceanological seawater characteristics by temperature measurements in the Sea of Japan shelf zone. *Proc. of Meetings on Acoustics*. 2015;24, 005001. DOI: 10.1121/2.0000109
11. Lien R.-Ch., Henyey F., Ma B., Yang Y.J. Large-amplitude internal solitary waves observed in the northern South China sea: properties and energetic. *J. Phys. Oceanography*. 2014;44(4):1095–1115. DOI: 10.1175/JPO-D-13-088.1
12. Thomson R.E., Emery W.J. Data analysis methods in physical oceanography. Elsevier, 2014. DOI: 10.1016/B978-0-444-50756-3.X5000-X