# Особенности воздействия подводных течений на низкочастотные гидроакустические стационарные вертикально распределенные приемные системы

В. А. Гордиенко  $^{1}$ , В. Н. Некрасов $^{2,a}$ , Н. В. Краснописцев $^{2,b}$ 

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
<sup>2</sup> ФГУП ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений. Россия, 141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, п/о Менделеево. E-mail: <sup>a</sup> nvn@vniiftri.ru, <sup>b</sup> lab21@vniiftri.ru

Статья поступила 05.09.2013, подписана в печать 19.04.2014.

Рассматриваются особенности поведения протяженных вертикально распределенных приемных систем (ВРПС) применительно к использованию их для целей низкочастотной томографии океана, которые в наиболее распространенном варианте исполнения представляют собой конструкции, состоящие из кабель-троса длиной до нескольких сотен метров с размещенными на нем приемными модулями, буя и якоря, обеспечивающих заданное пространственное положение системы. Обсуждаются результаты экспериментов, поставленных с ВРПС длиной 32 и 128 м на акватории Белого моря. Воздействие подводных течений на такую ВРПС приводит к возникновению вибраций на элементах системы, особенно на кабель-тросе, передающихся на гидрофоны и приводящих к образованию псевдозвукового сигнала на частотах ниже 10–12 Гц, который при определенных условиях может значительно превышать уровень фонового шума акватории. Данные факты существенно снижают эффективность применения ВРПС и ограничивают частотный диапазон измерений снизу. Сходство результатов разных экспериментов говорит о существовании общего механизма образования вибраций и наведения псевдозвука. Определение такого механизма может указать путь к устранению этих нежелательных явлений и расширению частотного диапазона ВРПС в инфразвуковую область.

*Ключевые слова*: томография океана, акустические антенны, вертикально распределенные приемные системы, протяженные гидроакустические приемные системы, гидроакустика, векторно-фазовые методы, комбинированный приемный модуль, векторный приемник, вибрационные помехи, гидродинамический шум, псевдозвук обтекания.

УДК: 534.86: 534.322.3: 534.83: 534.23. PACS: 43.30.Wi, 43.28.Te, 43.58.Fm.

#### Введение

Вертикально распределенные гидроакустические стационарные приемные системы (ВРПС) находят в настоящее время достаточно широкое применение в акустической томографии океана [1]. Однако и сама акустическая томография претерпевает определенную модернизацию. Прежде всего это использование современной компьютерной базы, позволяющей существенно расширить возможности получения информации о характеристиках исследуемой акватории. Кроме того, акустическая томография океана в настоящее время стала рассматриваться как один из основных методов получения информации о структуре, временной и пространственной изменчивости больших (порядка сотен и тысяч километров) акваторий мирового океана, а сама проблема мониторинга больших регионов мирового океана является по-прежнему крайне актуальной. Это в свою очередь потребовало снизить рабочие частоты, в результате чего появилось новое направление — низкочастотная томография океана. Как известно, в воде только низкочастотные сигналы в состоянии распространяться без существенного затухания на большие расстояния. Но в этом случае приходится использовать достаточно протяженные антенные решетки, в результате чего возникают проблемы, связанные с наличием течений и других природных явлений в толще океана,

включая их пространственную неустойчивость во времени. Все это привело к необходимости использования различных технических решений по защите ВРПС от всевозможных вибраций, изменения конфигурации самих антенн, их пространственной ориентации и т.п. [2].

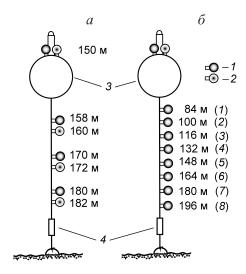
В литературных источниках, описаниях конструкций протяженных антенн обычно упоминаются используемые технические решения, основанные, по-видимому, на анализе экспериментальных данных. Однако сами эти исходные данные в технической литературе практически не приводятся.

Исходя из этого в настоящей работе излагаются экспериментальные результаты по изучению низкочастотных вибраций ВРПС, полученные нами в Кандалакшском заливе Белого моря, отличающегося наличием достаточно изменчивых течений. По данным многолетних наблюдений [3], скорость постоянных течений в Кандалакшском заливе относительно невелика и колеблется в среднем от 0.2 до 0.6 узла. Приливные течения также слабые — в среднем около 0.3 узла. Кандалакшский залив (Кандалакшская губа) самый глубоководный район Белого моря. Вблизи одной из впадин с глубиной до 330 м и были установлены описываемые в работе антенны на глубине 260 м. Для эксперимента использовались две вертикально распределенные вертикальные антенны длиной 32 и 128 м.

Длительность записи акустических сигналов, регистрируемых звукоприемниками антенн, как правило, определялась промежутком времени, в течение которого приливные и прочие течения изменялись от максимальных до минимальных значений скорости.

### 1. Методика эксперимента и основные исходные данные

При проведении экспериментальных исследований использовались вертикально распределенные приемные системы, изготовленные в наиболее распространенном для таких целей варианте исполнения. Конструктивно они представляли собой кабель-трос диаметром 17 мм, на котором с некоторым фиксированным шагом были расположены посадочные места под первичные преобразователи. Гидрофоны (или акселерометры) размещались в посадочных местах, расположенных перпендикулярно оси кабель-троса. Верхним концом антенна крепилась к бую, на нижнем устанавливался автономный размыкатель, к которому на стальной проволоке длиной 80 м был привязан груз. В неэквидистантную антенну длиной 32 м устанавливались гидрофоны и однокомпонентные акселерометры так, что расстояние между акселерометром и ближайшим гидрофоном составляло 2 м (рис. 1, a). Вертикальное положение системы обеспечивалось буем сферической формы с положительной плавучестью около 60 кг. На крышке сферы была установлена еще одна пара гидрофон-акселерометр для сравнения регистрируемых ими сигналов со звукоприемниками, находящимися в антенне.



Puc. 1. Геометрия размещения звукоприемников на ВРПС 32 м (a) и 128 м (б): 1 — гидрофон; 2 — акселерометр; 3 — корпус буя с размещенной в нем аппаратурой записи сигналов; 4 — автономный акустический размыкатель с грузом на дне. Указано примерное расстояние от поверхности до соответствующих звукоприемников

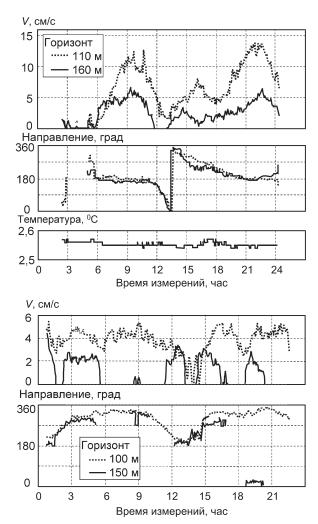
Антенна длиной 128 м конструктивно ничем не отличалась от антенны длиной 32 м, кроме количества приемных элементов, длины и шага между элементами (рис.  $1, \delta$ ). Гидрофон 1 в этой антенне размещался на глубине примерно 84 м, далее с шагом 16 м шли гидрофоны 2-8, так что последний — восьмой находился на глубине около 196 м.

Приемная система обеспечивала регистрацию сигнала в диапазоне частот 1–2500 Гц с большим динамическим диапазоном. Усиленные сигналы записывались цифровой многоканальной системой сбора и регистрации данных и параллельно на магнитный регистратор. Для последующего анализа полученные данные были отфильтрованы цифровым способом и прореживались до частоты дискретизации 25 Гц с использованием алгоритмов, описанных нами ранее [4, 5].

Одновременно с измерениями уровней шума производилась регистрация вектора скорости течений и температуры среды при помощи векторно-интегрирующих измерителей течений «Поток-2М» разработки ОКБ океанологической техники РАН.

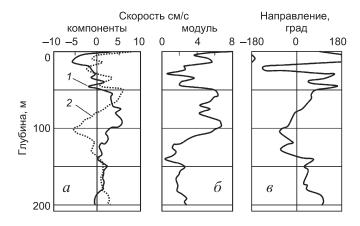
Во время экспериментов на море стоял штиль.

На рис. 2 приведены примеры записей модуля вектора скорости течений, его направления и температуры, характерные для измерений, выполненных с антенной длиной 32 и 128 м.



Puc. 2. Пример записей модуля вектора скорости течений, его направления и температуры, характерные для измерений, выполненных с антенной длиной 32 м (слева) и 128 м (справа)

Основным результатом измерений следует считать установление того факта, что глубинные течения в точках измерений не являются чисто приливно-отливными. Во всех случаях на приливно-отливные течения



Puc. 3. Пример одного из вертикальных профилей горизонтальных взаимно ортогональных зональной и меридиональной компонент U и V (1, 2) вектора скорости течения (a), модуля вектора скорости (b) и его направления относительно направления на север в горизонтальной плоскости (b)

накладываются постоянные (сдвиговые) течения и переменные течения, имеющие различную природу. Так, в частности, дополнительно проведенные нами измерения вертикальных профилей течений обнаружили су-

ществование мощного подводного течения на горизонте, примерно равном половине глубины места (пример одного из таких измерений приведен на рис. 3).

Наличие сдвиговых течений доказывает отличие от нуля выборочных средних по зональной и меридиональной компонентам векторов средней скорости течения, зарегистрированных на всех горизонтах и во всех точках измерений. Измерения в разных точках проводились в различное время, но во всех случаях можно считать, что это время приблизительно кратно приливному циклу. Поэтому полагалось, что выборочные средние значения зональной и меридиональной компонент U и V являются компонентами средних, сдвиговых течений. По ним рассчитывались модули и направления векторов средней скорости течения.

## 2. Псевдозвуковые шумы, обусловленные вибрациями элементов конструкции

Воздействие подводных течений на ВРПС использованной конструкции приводит к возникновению вибраций на элементах системы, особенно на кабель-тросе [6]. Эти вибрации передаются на гидрофоны и приводят к образованию псевдозвукового сигнала, который при определенных условиях может значительно превышать уровень фонового шума акватории [7].

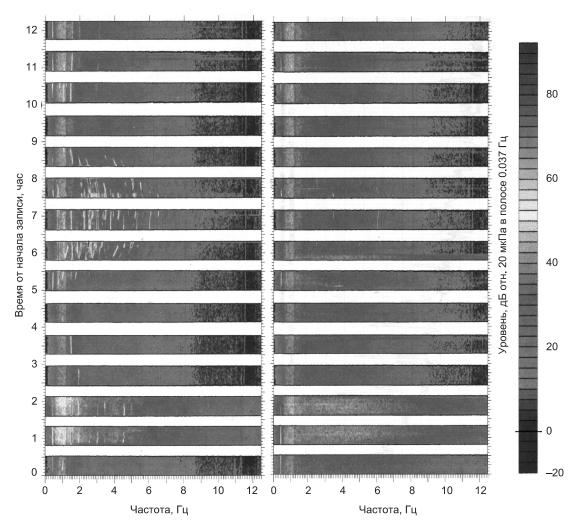


Рис. 4. Пример сонограммы узкополосного спектра (полоса частотного анализа 0.037 Гц) в диапазоне частот от 0 до 12.5 Гц для среднего гидрофона антенны (слева) и гидрофона на корпусе буя (справа)

Эксперимент с вертикально распределенной приемной системой длиной 32 м выявил источники появления псевдозвука, регистрируемого гидрофоном, их частотный состав и временную изменчивость.

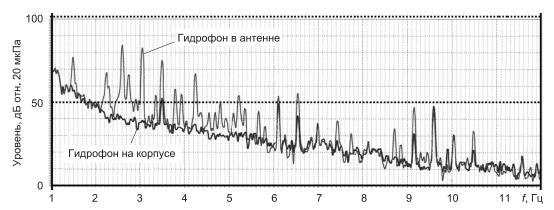
Для сигналов регистрируемых каждым гидрофоном и акселерометром были построены сонограммы узкополосного спектра с частотным разрешением 0.037 Гц в диапазоне частот от 0 до 12.5 Гц по всем записям с учетом времени начала каждой записи и измеренных для этого времени скоростей течений. Общий уровень оказался практически одинаков на всех сонограммах и обусловлен фоновыми шумами акватории. На рис. 4 в качестве иллюстрации приведены сонограммы, зарегистрированные средним гидрофоном антенны (левый) и гидрофоном, расположенным на корпусе буя (справа).

Нетрудно заметить, что на участках сонограммы, соответствующих относительно большим скоростям зарегистрированных течений (рис. 4, время 1–3 ч и 5–8 ч от начала записи), в антенне присутствуют тональные составляющие, особенно выраженные в период, когда скорость течения на горизонтах расположения звукоприемников была близка к максимальной.

На рис. 5 приведен один из таких спектров. Частоты этих составляющих оказываются, как правило, кратными, причем наблюдается незначительное изменение частот по мере изменения скорости течения. Изменение частот тональных составляющих сопровождается

изменением их уровня, при этом максимальные уровни наблюдаются также приблизительно в моменты времени, соответствующие максимальным наблюдаемым скоростям течений. Кроме того, присутствует перераспределение энергии между отдельными дискретами, выражающееся в постепенном возрастании одних и затухании других по мере изменения скорости течения.

На сонограммах сигналов, регистрируемых акселерометрами, установленными в антенне, присутствуют те же тональные составляющие, что и в сигналах гидрофонов в антенне, что свидетельствует о возникновении достаточно сильных вибраций кабель-троса в поперечном направлении. Последнее утверждение иллюстрируют данные рис. 6, на котором представлено одно из выполненных сравнений уровней сигналов гидрофона в антенне и ближайшего к нему акселерометра. Спектры сигналов выражены в одних и тех же единицах измерений ( $\Pi a \cdot c^2/M$ ) и приведены ко входу соответствующих датчиков с учетом их калибровки. На фоне акустического сигнала гидрофона хорошо выражен наведенный вибрациями сигнал от вибраций самого гидрофона. Как видно, в обоих спектрах преобладают одни и те же дискретные составляющие. Различие по уровню между двумя сигналами на этих дискретах в среднем не превышает 6 дБ. Полученное соответствие следует считать весьма хорошим, поскольку гидрофон и акселерометр отстояли друг от друга



Puc.~5. Сравнение уровней сигнала, зарегистрированного различными гидрофонами ВРПС: a- гидрофон 1 в антенне и гидрофон на корпусе буя при узкополосном анализе сигнала (0.037  $\Gamma$ ц); b- сигналы, регистрируемые в 1/3-октавных полосах гидрофонами различным образом закрепленные на ВРПС

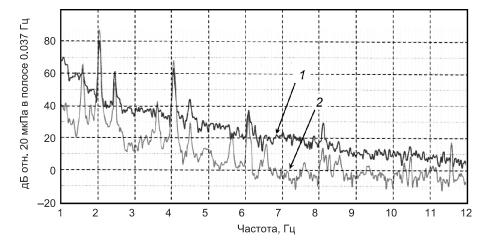


Рис. 6. Сравнение уровней сигнала, зарегистрированного гидрофоном (1) и акселерометром (2)

на расстоянии 2 м, поэтому уровни вибраций могли незначительно отличаться. К примеру, разница уровней сигналов, регистрируемых тремя ближайшими гидрофонами в антенне на этих же дискретах, достигает 10 дБ.

Показательно, что сигнал с гидрофона на корпусе буя почти не содержит указанных тональных составляющих, за исключением нескольких дискрет, совпадающих по частоте с дискретами в спектре сигнала гидрофона в антенне (рис. 5). Характерно также, что на двух записях, начало которых приходится примерно на 4.5 и 9.5 ч от начала записи (рис. 4, левый), проявления псевдозвукового сигнала полностью отсутствуют на всех трех гидрофонах в антенне. В это время уровни вибраций, регистрируемые акселерометрами в антенне также минимальны и в большей части диапазона обусловлены собственными шумами измерительной системы.

Наблюдаемые закономерности проявления псевдозвуковых шумов, а также совпадение как частоты отдельных дискрет, так и характера их временной изменчивости для гидрофонов и акселерометров, установленных в антенне, свидетельствуют о том, что источником псевдозвука, регистрируемого гидрофонами антенны, являются поперечные вибрации, возбуждаемые на кабель-тросе.

Очевидно, что механизм возникновения механических колебаний элементов ВРПС под действием подводных течений тесно связан с псевдозвуком, возникающим при помещении предмета в поток жидкости или газа: за обтекаемым телом образуются вихри, периодический срыв которых сопровождается резким изменением давления, которое и может возбуждать механические колебания тела, помещенного в поток [8, 9]. Проявления этого процесса для ВРПС весьма разнообразны, общим же фактом является то, что колебания происходят, как правило, на собственных частотах механической системы в направлении, перпендикулярном направлению потока.

Ёсть основания полагать, что механическая система ВРПС является автоколебательной и, следовательно, нелинейной [8, 9]. Структура системы действительно соответствует общей структуре автоколебательных систем: имеется постоянный источник энергии (кинетическая энергия потока жидкости), связанный с регулятором (срыв вихрей), который в свою очередь воздействует на колебательную систему (тело в потоке). Между колебательной системой и регулятором существует обратная связь, управляющая моментами передачи энергии от источника. Энергия расходуется в колебательной системе на преодоление сил сопротивления среды, поэтому может быть достигнут баланс между потребляемой и расходуемой энергией, и в системе возникнут устойчивые колебания [10, 11].

Регулятор является наиболее сложным звеном любой автоколебательной системы и, как правило, определяет ее поведение. К сожалению, математической модели, описывающей явление для трехмерного случая, до сих пор не предложено. Двумерная задача была решена Карманом, а Струхалем опытным путем была получена зависимость частоты вихревого звука от скорости потока, формы и размеров тела: частота прямо пропорциональна скорости, обратно пропорциональна

характерному размеру тела (диаметр для цилиндра, ширина для пластинки). Коэффициент пропорциональности зависит от формы тела и равен 0.2 для цилиндра и 0.14 для пластинки [7, 9]. О влиянии движения обтекаемого тела на процессы вихреобразования известно еще меньше.

Таким образом, на данный момент не удается построить удовлетворительную математическую модель даже для идеализированной системы. В реальной же системе необходимо учитывать, что, во-первых, скорость потока значительно изменяется с глубиной и по модулю, и по направлению, а также переменна во времени, во-вторых, кабель-трос не является однородной колебательной системой (сила натяжения и плотность непостоянны по длине), его форма под действием сложного поля скоростей отклоняется от прямолинейной и описывается трехмерной кривой, в-третьих, поперечные колебания кабель-троса — не единственный возможный тип колебаний. Кроме него могут возникать продольные колебания кабель-троса, крутильные колебания гидрофонов относительно точки закрепления в горизонтальной и вертикальной плоскостях и теоретически возможна передача энергии от одного типа колебаний другому.

Тем не менее можно утверждать, что количество влияющих на антенну факторов и параметров самой системы невелико. В соответствии с общей структурой автоколебательных систем эти параметры можно разделить на три категории: 1) связанные с источником энергии — это поле скоростей потока; 2) связанные с регулятором — диаметр кабель-троса, влияющий на частоту вихреобразования; 3) параметры колебательной системы — сила натяжения, плотность и длина кабель-троса, задающие собственные частоты поперечных колебаний, опять же длина и диаметр, сказывающиеся на силе сопротивления среды.

Для практической задачи подавления псевдозвукового сигнала, обусловленного вибрациями кабель-троса, передающимися на гидрофон, можно ограничиться экспериментальным изучением влияния указанных параметров с целью оптимизации конструкции вертикально распределенных систем. На решение этой важной проблемы и были направлены рассматриваемые в настоящей работе эксперименты.

Следует отметить, что тональные составляющие в спектрах сигналов гидрофонов и акселерометров обладают большой добротностью (см. рис. 5 и 6). Последнее, вероятнее всего, связано с тем, что вибрации возбуждаются на собственных частотах поперечных колебаний кабель-троса. Этот факт подтверждается также тем, что за все время проведения эксперимента в пределах большинства получасовых записей спектры сигналов гидрофонов и акселерометров, размещенных в антенне, обладают поразительной стабильностью. Сложная временная изменчивость спектра вибраций, выражающаяся в перераспределении энергии по собственным частотам, появлении и исчезновении кратных гармоник, должна быть обусловлена изменениями воздействующего на систему потока [11].

Для определения долговременной изменчивости регистрируемого ВРПС инфразвукового сигнала был поставлен эксперимент с приемной системой длиной

128 м. Станция с двумя измерителями течений «Поток-2М», размещенными на двух горизонтах, стояла на расстоянии около 300 м от станции с ВРПС. Измерения течений велись непрерывно в течение всего времени проведения эксперимента. Эксперимент продолжался почти четверо суток. В результате было получено 86 записей длиной 10 мин каждая и более 98 ч измерений течений на двух горизонтах.

Полученные сонограммы сигналов всех восьми гидрофонов, размещенных в антенне, в диапазоне частот 0–12.5 Гц оказались схожими как по уровню, так и по характеру временной изменчивости спектров сигналов. Характерный вид одной из таких сонограмм представлен на рис. 7.

Как и в эксперименте с антенной длиной 32 м,

на всех сонограммах наблюдаются большие вариации спектрального состава сигнала на частотах ниже 8–10 Гц. Четко выражены псевдозвуковые тональные составляющие, проявляющиеся в виде ряда дискретных составляющих с кратными частотами. Общим для двух экспериментов результатом является наличие записей, на которых нет никаких проявлений псевдозвуковых помех (как правило, соответствующие моментам времени, когда измерители течений регистрировали минимальные скорости). Максимальная разница уровней между отдельными записями составляет 60 дБ. Это несколько больше соответствующей разницы, полученной в первом эксперименте (примерно 50 дБ), что, однако, связано скорее с различием внешних условий проведения двух экспериментов и меньшим общим вре-

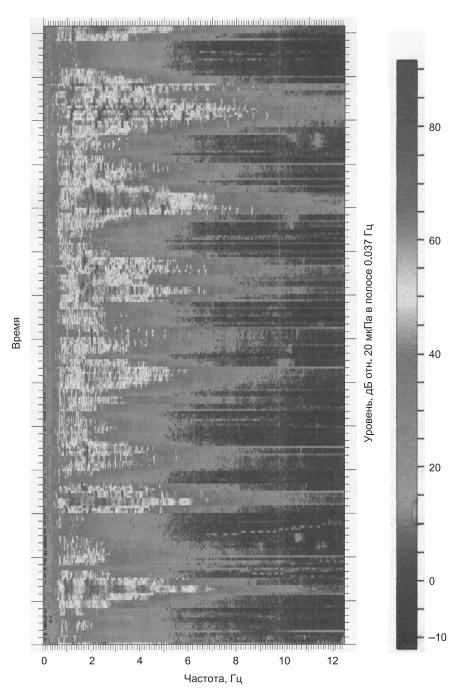


Рис. 7. Характерный вид сонограммы с одного из гидрофонов, установленного в антенне 128 м

менем первой постановки, а не с конструкцией ВРПС и, в частности, с ее длиной.

Следует отметить и большое разнообразие частот, на которых возбуждаются колебания кабель-троса. Судя по сонограммам, частотный состав вибраций сильно зависит от величины воздействия подводных течений. При незначительном воздействии, когда общий уровень вибраций невелик, они происходят на более низких частотах и возбуждается большее количество мод. С увеличением воздействия номер возбуждаемой моды возрастает и помимо этой моды появляется несколько кратных ей. Если принять тот факт, что колебания происходят на собственных частотах системы, то основная мода должна иметь частоту не более 0.1 Гц.

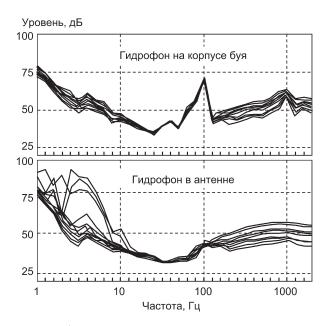


Рис. 8. 1/3-октавные спектры сигналов гидрофона на корпусе буя ВРПС и верхнего гидрофона в антенне, построенные по 11 записям

На рис. 8 показаны 1/3-октавные спектры сигналов гидрофона на корпусе буя ВРПС длиной 128 м и верхнего гидрофона (гидрофона 1) в антенне в частотном диапазоне от 1 до 2500 Гц, построенные по 11 записям, выполненным последовательно в течение примерно 21 ч. Большой разброс регистрируемых уровней сигнала в инфразвуковом диапазоне частот между различными записями, присутствующий на нижнем графике, обусловлен наличием псевдозвукового сигнала, наводимого на гидрофон вибрациями. Наибольшее превышение наблюдается в частотном интервале 2.5-4 Гц и составляет 40 дБ, в то время как разность уровней в инфразвуковом диапазоне, приведенная на верхнем графике, не превышает 10 дБ. Следует также отметить, что на тех записях, где проявления псевдозвука в сигнале с гидрофона в антенне отсутствуют, гидрофон, размещенный на корпусе станции, регистрирует несколько завышенные (на 6-8 дБ) уровни в частотном интервале 2-6 Гц, что, на наш взгляд, связано с шумом обтекания корпуса буя, из-за того что этот гидрофон расположен в непосредственной близости от него. В большей же части диапазона 1/3-октавные спектры обоих сигналов хорошо совпадают, за исключением нескольких полос,

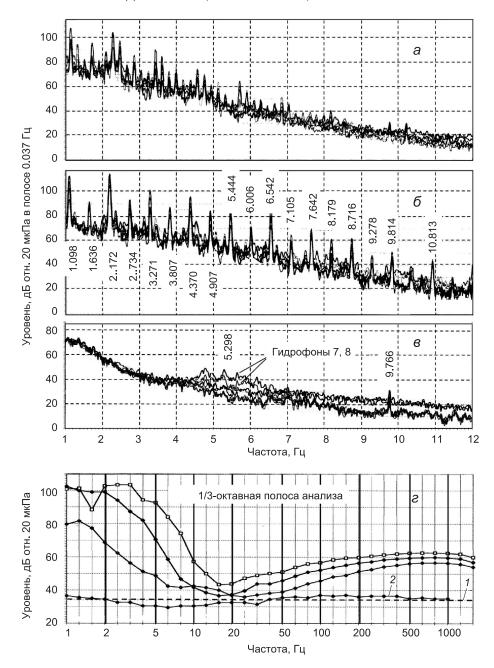
где в сигнале гидрофона на станции присутствуют паразитные шумы и электромагнитные наводки, связанные с работой некоторых устройств, расположенных в корпусе станции. На гидрофонах, установленных в антенне, эти паразитные шумы проявляются не так сильно ввиду удаленности от источника помехи.

На рис. 9 представлены в качестве иллюстрации спектры сигналов всех восьми гидрофонов в частотном диапазоне 1-12 Гц, построенные для трех наиболее характерных моментов времени. Эти графики иллюстрируют рассмотренные выше закономерности в изменении частотного состава вибраций. Спектры с минимальным по всем записям уровнем представлены на рис. 9, в. Наблюдается совпадение спектров всех каналов на частотах 1-4.5 Гц, где источником сигнала преимущественно является фоновый шум акватории. В интервале частот 4.5-7 Гц спектры отдельных каналов расходятся, и максимальная разность между ними достигает 20 дБ. Судя по форме спектров каналов 7 и 8 (отмеченных на рис.  $9, \varepsilon$ ), можно предположить, что это превышение вызвано вибрациями, воспринимаемыми в основном двумя нижними гидрофонами ВРПС. Спектры, изображенные на рис. 9, 6, близки к максимальным по уровню тональных составляющих, и соответствуют максимальным зарегистрированным нами скоростям течений. Здесь присутствует более 20 гармоник частоты 0.55 Гц, причем уровни гармоник с четными номерами оказываются больше. Частота первой дискретной составляющей в спектрах сигналов на рис. 9, 6 оказывается приблизительно в три раза меньше частоты первой дискретной составляющей на рис. 9, a, но эти частоты не кратны. Одновременно наблюдается снижение уровня гармоник и увеличение их числа. Заметно также уменьшение среднего уровня спектров на частотах выше 2 Гц по сравнению со спектрами рис. 9, б.

Чтобы сравнение результатов двух экспериментов было полным, на этом же рис. 9,  $\varepsilon$  представлены 1/3-октавные спектры одного из каналов, построенные в те же моменты времени, что и спектры на рис. 9,  $\alpha$ – $\epsilon$ . Проявления псевдозвукового сигнала, вызываемого вибрациями гидрофонов, содержатся в инфразвуковом диапазоне частот, и практически уже с 10–12  $\Gamma$ ц можно производить измерения данной конструкции с помощью ВРПС.

Как и в предыдущем эксперименте, отмечается высокая добротность колебаний кабель-троса и их временная стабильность. Обнаружена устойчивая корреляция между сигналами всех гидрофонов ВРПС в диапазоне частот 1-12 Гц как на минимальных по уровню сигнала записях, так и на записях, где присутствуют мощные псевдозвуковые проявления. В первом случае вид корреляционной функции однозначно свидетельствует об акустической природе принимаемого сигнала (рис. 10, a), равно как о наличии псевдозвука во втором (рис. 10, 6). Как видно из рис. 10, 6, между вибрациями, воздействующими на разные гидрофоны системы, существует устойчивая разность фаз, заметна и стабильность вибраций по уровню и частоте.

Далее было произведено сравнение временной изменчивости сигнала гидрофонов ВРПС в инфразвуковом диапазоне и скорости течения на двух горизонтах.

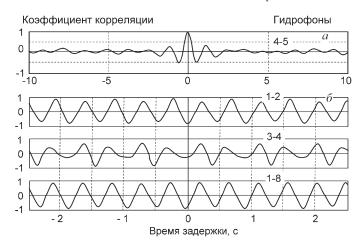


 $Puc. \ 9.$  Спектры сигналов восьми гидрофонов в частотном диапазоне  $1-12\ \Gamma$ ц, построенные для трех наиболее характерных моментов времени

С этой целью были построены огибающие среднеквадратичного значения сигналов гидрофонов в диапазоне частот от 1 до 12.5 Гц, осредненные в пределах каждой записи. Как уже замечалось, уровни сигналов, регистрируемые восемью гидрофонами, различаются незначительно, поэтому осредненные огибающие сигналов всех каналов в указанной полосе совпали с точностью до нескольких децибел. По этой причине дальнейшее сравнение производилось с огибающей гидрофона 4. Из непрерывной записи скоростей течения на двух горизонтах выбирались десятиминутные интервалы, соответствующие временам записи сигнала гидрофонами. Скорость течения также усреднялась по одной записи.

Как уже отмечалось, измерение скоростей течения на данной акватории показало наличие существенной

составляющей, связанной с приливно-отливными явлениями. Вместе с тем простой и однозначной взаимосвязи между тремя процессами (уровень огибающей среднеквадратичного значения сигнала гидрофона, модуль скорости течения и уровень моря) установить не удалось. Не наблюдается соответствия даже между минимумами огибающей и скоростей течения, существование которого казалось очевидным. Последнее, на наш взгляд, связано с тем, что подводные течения имеют сложную пространственную и временную структуру, так что измерения скорости течений только на двух горизонтах не дают полного представления о процессах, происходящих на всей длине приемной системы. Это утверждение хорошо согласуется с измеренными нами вертикальными разрезами скорости течений, один из примеров которого был приведен выше на рис. 3.

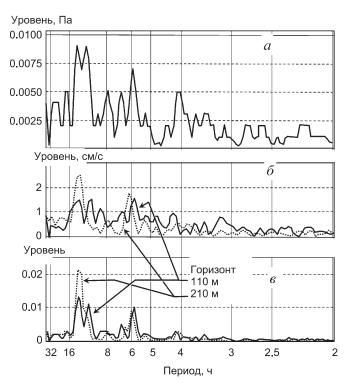


Puc. 10. Коэффициент взаимной корреляции между парами гидрофонов: a — минимальные зарегистрированные скорости течения;  $\delta$  — значительные уровни течений

По виду огибающей сигналов, снимаемых с гидрофонов и временной изменчивости скоростей течения, можно предположить наличие нескольких периодических составляющих в этих процессах, для определения которых были построены спектры трех зависимостей, а также взаимные спектры огибающей и вариаций скоростей течения (рис. 11). В спектре огибающей действительно четко заметны несколько периодических составляющих, которые существуют и на взаимных спектрах. Наличие одинаковой периодичности подтверждает существование тесной взаимосвязи между вибрациями приемной системы и скоростью потока. Однако возможно, что измеренные в ходе эксперимента скорости не являются максимальными и на каком-либо горизонте существует более сильное течение, которое и оказывает наибольшее воздействие на систему.

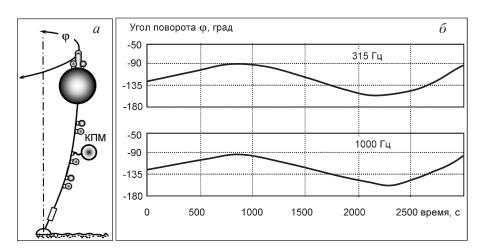
#### 3. Пространственная устойчивость ВРПС

Для выявления изменения пространственного положения элементов на одном из этапов работы в антенну длиной 32 м был включен комбинированный приемный модуль (КПМ, рис. 12, a), регистрирующий наряду с давлением три взаимно ортогональные про-



 $Puc.\ 11.\$ Спектры: a — огибающей среднеквадратичного значения сигнала гидрофона 4 в полосе 0– $12.5\$ Гц; 6 — скоростей течения на двух горизонтах; e — взаимный спектр огибающей среднеквадратичного значения сигнала гидрофона e и скорости течения на двух горизонтах

екции вектора градиента звукового давления. Определялся пеленг в горизонтальной плоскости [4, 7] для выборочных узких частотных полос в диапазоне от 63 до 1000 Гц на удаленный широкополосный источник сигнала, имеющий фиксированные координаты в пространстве. Пространственная изменчивость положения системы определяется долговременным изменением угла  $\varphi$  (рис. 12, a). Пеленги, определенные для различных частот, оказались в пределах погрешности измерений совпадающими, что позволило сделать вывод о том, что действительно регистрировалось изменение угла  $\varphi$ . На рис. 12,  $\delta$  в качестве иллюстрации приведены значе-



*Рис.* 12. Конфигурация ВРПС (*a*) и определенная экспериментально пространственная изменчивость положения системы (*б*), определяемая изменением угла  $\varphi$  относительно направления на север

ния пеленгов, определенных в одном из экспериментов для двух частот — 315 и 1000 Гц.

Из приведенных на рис. 12 данных видно, что угловое смещение ВРПС вокруг вертикальной оси, проходящей через груз, лежащий на дне, достигает значительной величины  $-60-70^{\circ}$  с периодом около 50-60 мин, что в целом приводит к достаточно большому смещению в пространстве звукоприемников в процессе работы ВРПС, особенно для верхних гидрофонов. Наиболее сложный характер колебаний наблюдается в периоды смены направления течений, когда на описываемые длиннопериодные колебания накладывается дополнительный поворот ВРПС примерно на 180°. Судя по всему, устранить эти колебания в условиях реальных акваторий практически невозможно [12].

#### Заключение

В результате проведенных исследований в реальных условиях мелкого моря можно считать установленным факт, что эффективность работы вертикально распределенных систем в области инфразвуковых частот снижается из-за наличия псевдозвука, проявляющегося в спектре сигнала в виде ряда тональных составляющих с кратными частотами. Наибольшее превышение над фоновым псевдозвукового сигнала, обусловленного вибрациями, передающимися на гидрофоны, закрепленные на кабель-тросе, наблюдается в диапазоне 2-6 Гц и может достигать значительной величины -40-60 дБ.

Анализ совместных данных, регистрируемых гидрофонами и акселерометрами, позволяет сделать вывод, что основным источником псевдозвука являются поперечные вибрации кабель-троса, возникающие под действием подводных течений. Эти колебания имеют сложные спектральный состав и временную зависимость, а также высокую добротность и, вероятнее всего, происходят на собственных частотах системы. Наблюдается большая изменчивость спектрального состава вибраций, выражающаяся в изменении в несколько раз частот тональных составляющих в зависимости от скорости течения. При этом характер спектра существенно не меняется, т.е. в нем присутствует большое число кратных дискретных составляющих. В некоторые моменты времени (обычно, когда скорости течения минимальны) они практически исчезают. Частотный состав вибраций сильно зависит от величины воздействия подводных течений. При незначительном воздействии,

когда общий уровень вибраций невелик, они возникают на более низких частотах и возбуждается большее количество мод. Спектры вибраций обладают высокой стабильностью, что может быть объяснено возбуждением в системе автоколебаний.

Спектр вибраций ограничен инфразвуковым диапазоном частот (в среднем не более 10-12 Гц). Никаких проявлений псевдозвука, обусловленного вибрациями, на более высоких частотах обнаружено не было.

Кроме того, воздействие подводных течений на ВРПС приводит к значительной по величине временной изменчивости пространственного ее положения относительно вертикали, проходящей через якорную систему.

Данные факты существенно снижают эффективность применения ВРПС и ограничивают частотный диапазон измерений снизу. По этой причине к гидрофонам ВРПС, предназначенным для работы в инфразвуковом диапазоне, следует предъявлять повышенные требования к виброзащищенности. Очевидно также, что существующие на данный момент гидрофоны обычно не обладают требуемой виброзащищенностью, поэтому особую важность приобретает задача оптимизации конструкции ВРПС с целью снижения вибраций.

#### Список литературы

- 1. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М., 2007.
- 2. Законов Ю.И., Коротин П.И., Орлов Д.А. и др. // Акуст. журн. 2010. 56. С. 223.
- 3. Лоция Белого моря. СПб., 1995.
- 4. Gordienko V.A., Krasnopistsev N.V., Nasedkin A.V. et al. // Acoustical Physics. 2009. **55**, N 6. P. 741.
- 5. Краснописцев Н.В., Некрасов В.Н., Торопов В.Н. // Акуст. журн. 2011. 57, № 2. С. 179.
- 6. Зуйкова Н.В., Кондратьева Т.В., Свет В.Д. // Акуст. журн. 2005. 49, № 2. С. 183.
- 7. Гордиенко В.А. Векторно-фазовые методы в акустике. M., 2007.
- 8. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М., 1981.
- 9. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л., 1981.
- 10. Харкевич А.А. Избранные труды. Т. 2. М., 1973.
- 11. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. М.,
- 12. Van Trees H.L. Optimum Array Processing. N.Y., 2002.

#### The peculiarities of the effects of underwater currents on low-frequency hydroacoustic stationary vertically distributed receiving systems

 $[V. A. Gordienko]^1$ , V. N. Nekrasov<sup>2,a</sup>, N. V. Krasnopistcev<sup>2,b</sup>

Moscow 119991, Russia.
<sup>2</sup> All-Russian Scientific Research Institute for Physical-Technical and Radiotechnical Measurements (VNIIFTRI), Settl. Mendeleevo, Moscow Region 141570, Russia.

E-mail: a nvn@vniiftri.ru, b lab21@vniiftri.ru.

Features of the behavior of long vertically distributed receiving systems (VDRSs) for use in the low-frequency tomography of the ocean are considered. In the most common design variant, VDRSs are structures that consist of a cable rope of up to several hundreds of meters in length with receiving modules placed coaxially (hydrophones) or axis-perpendicularly (accelerometers) on it, a buoy, and an anchor, which support the predetermined spatial position of the system. The results of the experiments carried out using VDRSs of 32 and 128 m in the White Sea

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Department of Acoustics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University,

are discussed. Underwater-current forces on a VDRS result in vibrations on system elements, especially on the cable-rope, which are transmitted to hydrophones and are responsible for the formation of a pseudo sound signal at frequencies below 10–12 Hz that, under certain conditions, can considerably exceed the background noise level of the water area. These facts may considerably reduce the efficiency of a VDRS and limit the frequency range of measurements from the bottom. The similarity of the results obtained by different experiments suggests that there is a general mechanism for the occurrence of vibrations and pseudo sound. The definition of such a mechanism can point the way to eliminating these undesirable effects and extending the frequency range of a VDRS into the infrasonic range.

*Keywords*: ocean tomography, acoustic arrays, vertically distributed receiving systems, extended hydroacoustic receiving systems, hydroacoustics, vector-phase methods, combo receiver, vector receiver, vibration noise, hydrodynamic noise, flow pseudo sound, sound power flow, Umov's vector, localization of sound sources, noise immunity, sonographic analysis of high-resolution metrology, high-frequency geoacoustic emission.

PACS: 43.30.Wi, 43.28.Te, 43.58.Fm.

Received 5 September 2013.

English version: Moscow University Physics Bulletin 4(2014).

#### Сведения об авторах

- 1. Гордиенко Валерий Александрович докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник.
- 2. Некрасов Виталий Николаевич докт. техн. наук, начальник НИК-2 ФГУП ВНИИФТРИ; e-mail: nvn@vniiftri.ru.
- 3. Краснописцев Николай Вячеславович зав. лабораторией НИК-2 ФГУП ВНИИФТРИ; e-mail: lab21@vniiftri.ru.