

УДК 534.23

© В. А. Чупин¹, А. Е. Бородин², Г. И. Долгих¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

²Дальневосточное отделение Секции прикладных проблем при Президиуме РАН, г. Владивосток
chupin@poi.dvo.ru

РЕГИСТРАЦИЯ ДВУХОСЕВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ДЕФОРМОГРАФОМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, СОЗДАВАЕМЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ

В статье представлены результаты экспериментов по обнаружению и локализации источников низкочастотных гидроакустических сигналов размещенными на берегу лазерными деформографами. Описываются состав и измерительные характеристики двухосевого лазерного деформографа, включая его чувствительность и направленные свойства. Приведены примеры регистрации деформографом шумов проходящих судов различного водоизмещения, в том числе с большим удалением от места размещения прибора. Оценены его возможности по определению направления на источник низкочастотных гидроакустических сигналов по величине амплитуды регистрируемого сигнала в измерительных плечах прибора. По результатам эксперимента с использованием в качестве источника низкочастотных гидроакустических излучателей подтверждено, что с понижением частоты излучаемых сигналов доля гидроакустической энергии, трансформированной в сейсмоакустическую энергию растет нелинейно. Анализ приведенных в статье результатов показывает, что размещенный на берегу двухосевой лазерный деформограф позволяет уверенно регистрировать сигналы низкочастотного первичного гидроакустического поля различных судов, выделять классификационные признаки и определять направление на их источники. Предложены варианты применения лазерных деформографов в системе контроля подводной и надводной обстановки, учитывающие особенности их работы. Определены направления дальнейших фундаментальных и прикладных исследований.

Ключевые слова: береговые лазерные деформографы, трансформация сигналов, низкочастотные сейсмоакустические сигналы, первичное гидроакустическое поле, районы шельфа и проливов.

V. A. Chupin¹, A. E. Borodin², G. I. Dolgikh¹

¹V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia

²Applied problem Department of Primorsky Scientific Center, Vladivostok, Russia

SEISMOACOUSTIC SIGNALS REGISTRATION BY THE TWO-AXIAL LASER STRAINMETER, CREATED BY HYDROACOUSTIC SOURCES

The paper describes the results of experiments on detection and localization of sources of low-frequency hydroacoustic signals by laser strainmeters placed ashore. A composition and measuring characteristics of a two-axis laser strainmeter, including its sensitivity and directional properties are described. Examples of noise registrations of passing ships of various displacement by a strainmeter, as well as with a large distance from the device location are presented. The strainmeter's opportunities for definition of direction to low-frequency hydroacoustic signals source by amplitudes of the registered signals in measuring arms of the device are estimated. On the basis of the experiment with the use of low-frequency hydroacoustic radiators as a source it's confirmed that the proportion of hydroacoustic energy transformed into seismoacoustic one increases nonlinearly at frequency decrease of the radiated signals. The analysis of the results shows that a two-axis laser strainmeter placed ashore allows signals registration of low-frequency primary hydroacoustic field of various ships with confidence as well as allocating classification features and determining the direction of their sources. The variants of laser strainmeters application in control system of underwater and surface situation considering features of their work are offered. The directions of further fundamental and applied researches are defined.

Key words: coastal laser strainmeters, transformation of signals, low-frequency seismoacoustic signals, primary hydroacoustic field, region of shelf and straits.

В ходе проведения многолетних исследований различными вариантами лазерных деформографов по изучению природы вариаций деформаций верхнего слоя земной коры [1—4] многократно регистрировались низкочастотные сейсмические сигналы, обусловленные первичными гидроакустическими полями судов различного водоизмещения, проходящими через прилегающие акватории.

Дополнительные исследования с применением низкочастотных гидроакустических излучателей позволили сделать предварительные оценки доли гидроакустической энергии, трансформируемой на границе «вода-дно» в сейсмоакустическую энергию [5]. Также было установлено, что создаваемый излучателем низкочастотный (32 Гц) гидроакустический сигнал распространяется в воде к точке приема по приповерхностному звуковому каналу по закону цилиндрической расходимости, а с глубин порядка половины длины волны по границам «вода-дно» и «земная кора-воздух», в основном, в виде поверхностных волн рэлеевского типа.

Двухосевой лазерный деформограф. Представленные в статье результаты получены с помощью двухосевого (двухкоординатного) лазерного деформографа [6], входящего в состав берегового измерительного комплекса морской экспериментальной станции «м. Шульца» ТОИ ДВО РАН. Его основу составляют два установленных на высоте 76 м над уровнем моря лазерных деформографа (рис. 1), оптические части которых построены по принципу неравноплечего интерферометра Майкельсона с использованием в качестве источников излучения частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров. Чувствительные элементы приборов установлены в отдельных гидротермоизолированных камерах, размещенных вместе с воздухомонаполненными световодами на глубине 3—5 м от поверхности земли. Измерительные плечи лазерных деформографов практически ортогональны друг другу и ориентированы под углом 18° (198°) от направления «север-юг» и под углом 110° (290°) от направления «запад-восток». Принцип работы приборов заключается в синхронном измерении с помощью интерференционных методов изменений набега фазы лучей лазеров, проходящих через измерительные плечи от центральных интерференционных узлов до уголкового отражателя и обратно. Учитывая поляризационные свойства волн рэлеевского типа и наличие у деформографов направленных свойств [7], их совместное использование позволяет определять направление на источник сигнала, а при сопровождении судов обеспечивает взаимную компенсацию характеристик направленности измерителей.

В диапазоне от 0 (условно) до 150 Гц лазерные деформографы «север-юг» и «запад-восток» имеют чувствительность ($\varepsilon = \Delta L/L$, где L — длина измерительного плеча лазерного деформографа, ΔL — точность измерения смещения, равная 0.01 нм) 0.19×10^{-12} и 0.57×10^{-12} , соответственно, при практически неограниченном динамическом диапазоне, обеспечиваемым автоматической коррекцией положения юстировочных зеркал.

Регистрация гидроакустических сигналов проходящих судов. Географическое положение морской экспериментальной станции позволяет обеспечивать визуальный контроль близлежащей акватории. Из-за наличия нескольких портов акватория является районом с интенсивным судоходством, шумы которого регистрируются лазерными деформографами. Идентификация источников и временная привязка сигналов осуществлялась путем визуального наблюдения и анализа архива панорамного видеорегистратора, установленного на экспедиционной станции. Так, например, на рис. 2 приведена спектрограмма записи лазерного деформографа «север-юг» при прохождении 18 ноября 2014 г. гидрографического катера вокруг п-ова Шульца к причалу в бух. Витязь Японского моря. Радиус наблюдения не превышал одну милю.

На рис. 3 приведена полуторачасовая спектрограмма записи лазерного деформографа «север-юг» при прохождении 23 июня 2013 г. малого рыболовного сейнера вдоль побережья берегового полигона до его входа в порт Зарубино, расположенного в бух. Троицы. Радиус наблюдения составил 5 миль.

На рис. 4 приведены спектрограммы восьмидесятиминутной записи



Рис. 1. Береговой двухосевой лазерный деформограф. 1 — 52.5-метровая компонента лазерного деформографа «север-юг»; 2 — 17.5-метровая компонента лазерного деформографа «запад-восток»; 3 — лабораторное помещение (расположение комплекса на карте указано белым квадратом).

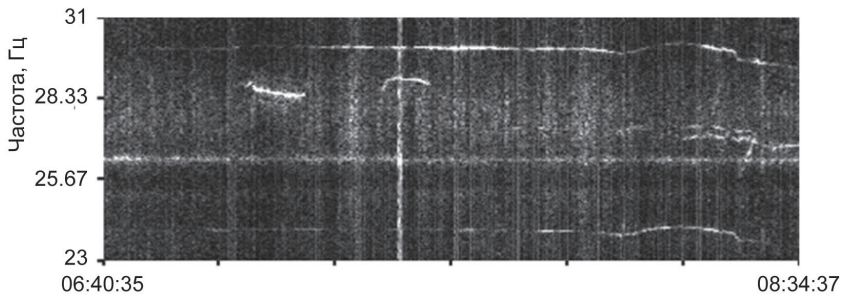


Рис. 2. Спектрограмма записи деформографа «север-юг» при прохождении гидрографического катера.

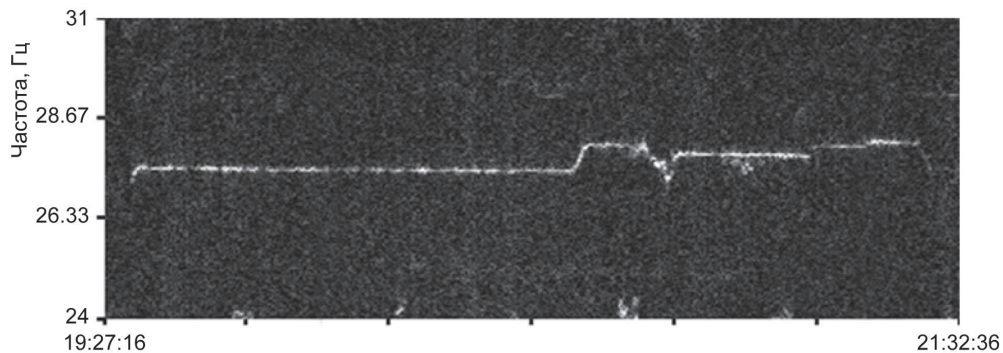


Рис. 3. Спектрограмма записи лазерного деформографа «север-юг» при прохождении малого рыболовного сейнера.

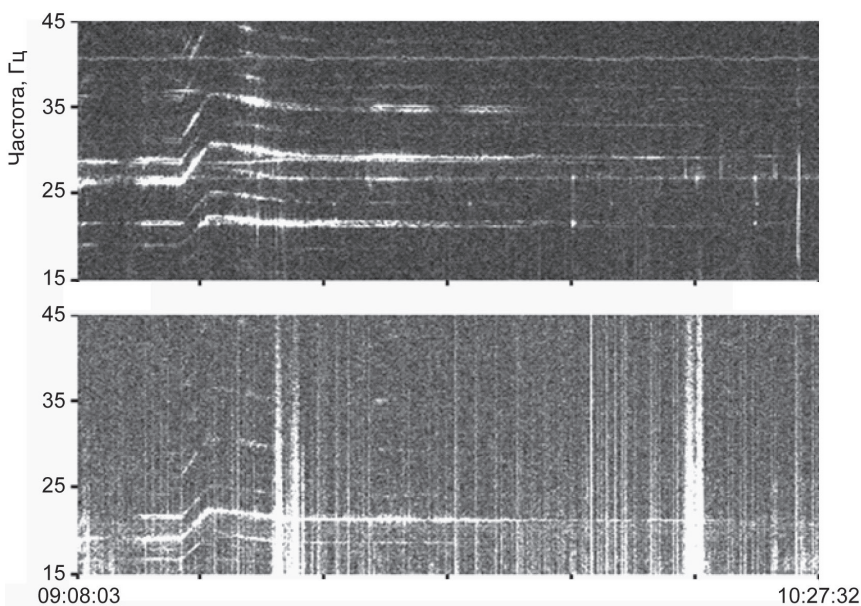


Рис. 4. Спектрограммы записи двухосевого лазерного деформографа при движении рейсового морского парома (вверху — «север-юг», внизу — «запад-восток»).

двухосевого деформографа при прохождении рейсового морского грузопассажирского парома «New Blue Ocean», вышедшего 03 декабря 2013 г. из порта Зарубино. Паром имеет следующие характеристики: длина 160 м; ширина 25 м; осадка 6.3 м; водоизмещение 16 490 т. На рисунке отчетливо виден вызванный работой двух пропульсивных установок ансамбль гармоник, являющийся характерным идентификационным признаком данного судна. Радиус наблюдения — около 15 миль.

Высокие отношения сигнал/помеха позволили предположить, что приборы данного типа способны регистрировать сигналы судов, движущихся на многократно больших расстояниях. Регулярность маршрута парома и указанные идентификационные признаки позволили по спектрограммам записи 3 июня 2014 г. (приведенным на рис. 5) подтвердить данное предположение и осуществить длительное сопровождение парома от момента начала его движения из порта Зарубино до дистанции 156 км, полученной по данным Автоматической Идентификационной Системы (AIS) (<http://www.marinetraffic.com>). Стрелкой на рисунке показано время принятия решения о потере контакта.

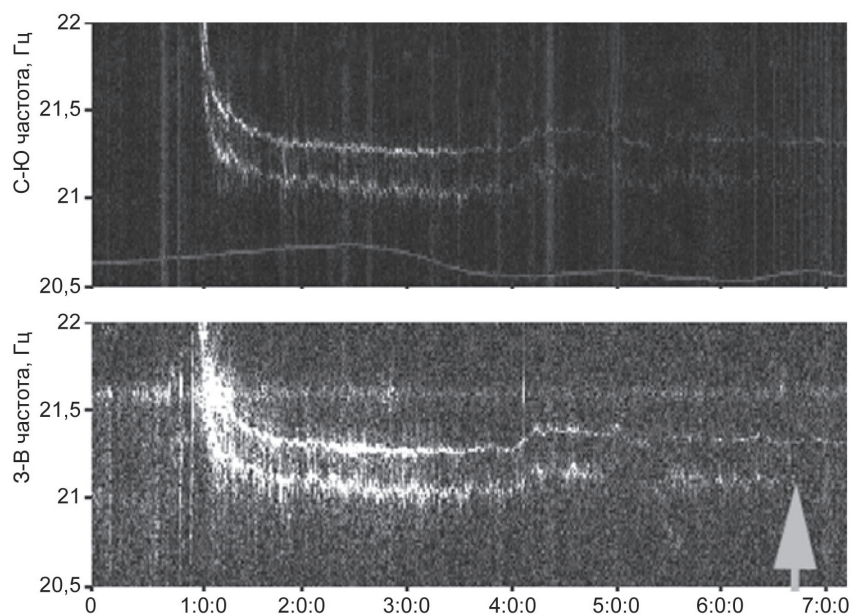


Рис. 5. Спектрограммы записи двухосевого лазерного деформографа 3 июня 2014 г. при движении рейсового морского парома (вверху — «север-юг», внизу — «запад-восток»).

Оценка возможностей по определению направления на источник низкочастотных гидроакустических сигналов. Оценка проводилась по данным спектрального анализа этого же эпизода (3 июня 2014 г.). В качестве исходных данных брались амплитуды обеих идентификационных частот, полученные при спектральной обработке синхронных участков записей двух деформографов «север-юг» и «запад-восток». При выполнении расчетов считалось, что основные смещения устоев деформографов вызваны поверхностными волнами рэлеевского типа. Так как частицы в волне Рэлея движутся по эллипсам, большая полуось которых перпендикулярна границе, а малая параллельна направлению распространения волны, то по синхронным данным двух лазерных деформографов с учетом их диаграмм направленности [6, 7] можно через тангенс, равный отношению выделенных амплитуд идентификационных частот синхронных участков записей лазерных деформографов «север-юг» и «запад-восток», найти угол направления на источник. При расчете учитывали только составляющую волны, ориентированную вдоль направления ее распространения. Результаты приведены в таблице.

Результаты эксперимента

№ путе- вой точки	Время, UTS	Глубина моря, м	Расстояние от измерителя, км	Направление по СИД, градусы	Ошибка измерения направления, градусы	Примечание
1	9:00	16	3	249.14	38.9	
2	9:29	80	16	165.87	-22.0	
3	9:51	358	29	161.74	-7.6	Свал глубин
4	10:24	2497	48	157.45	-15.4	
5	10:57	2901	66	155.81	-12.3	
6	11:21	3051	82	154.54	-10.0	
7	12:00	3309	101	155.46	-22.6	Смена курса
8	12:30	3237	113	161.75	-21.2	
9	13:04	3282	129	168.07	6.3	
10	13:30	3252	140	171.64	-3.2	
11	13:59	3339	156	175.38	-0.5	

Скачкообразное увеличение ошибки в точке № 7 (04:00 на спектрограммах), вероятно, связано с одновременным изменением курса и увеличением путевой скорости источника, что повлияло на результат спектральной оценки амплитуд идентификационных частот. Результаты вычислений подтверждают возможности рассматриваемого двухосевого лазерного деформографа по определению направления на источник низкочастотных сейсмоакустических сигналов. При этом точность возрастает с увеличением расстояния между источником и приемником.

Экспериментальная оценка частотной зависимости коэффициента трансформации гидроакустических сигналов в сейсмоакустические. В работе [8] было показано, что с понижением частоты все большая часть гидроакустической энергии трансформируется в энергию сейсмоакустических сигналов, распространяющихся в морском дне. Для изучения этой зависимости в октябре 2014 г. были проведены экспериментальные работы с излучением тональных и фазоманипулированных гидроакустических сигналов с частотами 33 и 22 Гц и их приемом береговым двухосевым лазерным деформографом. На рис. 6 приведена схема эксперимента.

По результатам контрольных измерений излученных гидроакустических сигналов установлено, что излучатель 22 Гц создавал давление в 9.2 раза большее, чем излучатель 33 Гц (11 и 1.2 кПа, соответственно). В то же время амплитуды принятых деформографом «север-юг» излученных

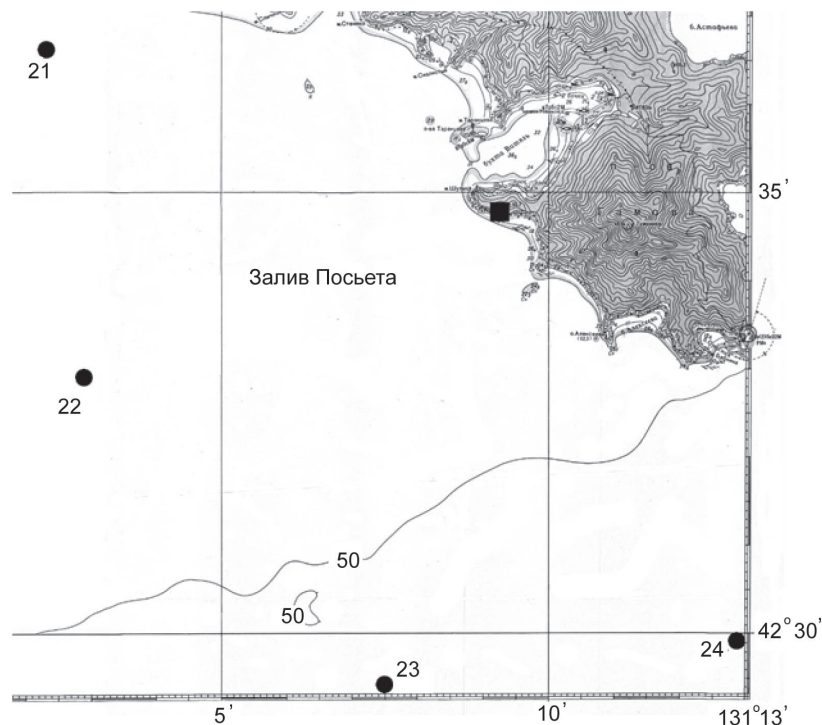


Рис. 6. Схема эксперимента 09—10 октября 2014 г. 21—24 станции излучения. Квадратом обозначено местоположение двухосевого лазерного деформографа.

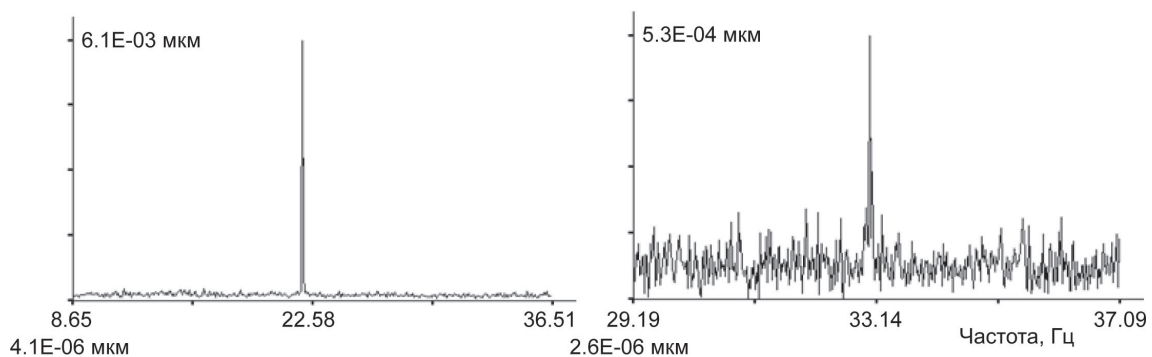


Рис. 7. Спектры принятых деформографом «север-юг» излученных на станции «21» гидроакустическими излучателями сигналов 22 Гц (слева) и 33 Гц (справа).

в точке «21» сигналов (рис. 7) отличаются в 34.3 раза, в точке «22» — в 20.9 раза, в точке «23» — в 22.1 раза, в точке «24» — в 81.6 раза, что подтверждает указанную частотную зависимость коэффициента трансформации энергий и ее нелинейный характер.

Анализ многочисленных записей двухосевого лазерного деформографа показывает, что он позволяет уверенно регистрировать сигналы низкочастотного первичного гидроакустического поля различных судов, выделять классификационные признаки и определять направление на их источники. Уникальные рабочие характеристики (береговое размещение и высокая чувствительность в инфра- и низкочастотном диапазоне, направленные свойства) делают приборы данного типа перспективными для использования в системах освещения обстановки.

Особую роль они могут играть при контроле шельфовых и проливных зон, где за счет особенностей трансформации гидроакустических сигналов в сейсмоакустических в максимальной степени проявляются преимущества данных приборов над гидроакустическими. По предварительным оценкам для контроля морского шельфа зал. Петра Великого и прилегающей к нему части Японского моря потребуется от трех до пяти двухосевых лазерных деформографов. Учитывая непрерывное снижение уровня первичного акустического поля как подводных, так и надводных кораблей и смещение его максимума в низкочастотную область [9], лазерные деформографы могут обеспечить компенсацию снижения эффективности стационарных гидроакустических средств наблюдения за удаленными акваториями, где их пространственная избирательность двухосевых приборов достигает максимальных значений.

Однако существующих научных знаний недостаточно для создания технических средств. Необходимо выполнить ряд фундаментальных и прикладных экспериментальных НИР для обоснования облика и режимов работы средств наблюдения, а также разработки методик по выбору оптимальных мест их размещения.

В прогнозной работе [10] показано, что демонстрируемая при измерении сейсмических процессов возможность деформографов обнаруживать и измерять сейсмические уединенные волны и деформации открывает перспективы создания на их основе нового поколения средств контроля именно подводной обстановки, основанных на выявлении гидродинамических аномалий. Но данная научная область пока не изучена и требует комплексных фундаментальных исследований.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ (соглашение № 14-17-00041, обработка и интерпретация полученных данных) и программы ДВО РАН «Дальний Восток» 2015 г.

Литература

1. Долгих Г. И., Копвиллем У. Х., Павлов А. Н. Наблюдение периодов собственных колебаний Земли лазерным деформометром // Изв. АН СССР. Физ. Земли. 1983. № 2. С. 15—20.
2. Давыдов А. В., Долгих Г. И., Кабанов Н. Ф. Применение лазерных деформографов в гидроакустике // Акуст. журн. 1995. Т. 41, № 2. С. 235—239.
3. Долгих Г. И. Некоторые результаты экспериментального исследования сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых низкочастотным гидроакустическим излучателем // Акуст. журн. 1998. Т. 44, № 3. С. 358—361.
4. Давыдов А. В., Долгих Г. И. Изучение сейсмоакустических процессов лазерными деформографами // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6, № 7. С. 844—857.
5. Долгих Г. И., Чупин В. А. Экспериментальная оценка преобразования гидроакустического излучения в сейсмоакустическую волну // Акуст. журн. 2005. Т. 51, № 5. С. 628—632.
6. Долгих Г. И., Ковалев С. Н., Корень И. А., Овчаренко В. В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76—81.
7. Долгих Г. И. Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 5. С. 24—30.
8. Кузнецов В. П. Нелинейная акустика в океанологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 264 с.
9. Пархоменко В. Н., Пархоменко В. В. Снижение шумности отечественных атомных подводных лодок в период с 1965 по 1995 г. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 2. С. 52—57.
10. Прогнозные исследования повышения эффективности систем освещения подводной и надводной обстановки на основе лазерно-интерференционных методов / Отчет о НИР «Экспедиция-ТОИ». Владивосток. 2013. 232 с.

Статья поступила в редакцию 13.05.2015 г.