

Разработка технологии томографии земной коры шельфа и глубокого моря на основе применения береговых лазерных деформографов и широкополосных низкочастотных гидроакустических излучателей

Г. И. Долгих^{1,2*}

¹Тихоокеанский океанологический институт имени В.И.Ильичева
ДВО РАН// Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

²Дальневосточный федеральный университет, Школа естественных наук,
кафедра океанографии и гидрометеорологии// Россия, Кампус ДВФУ, о. Русский
(Статья поступила 11.07.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Рассмотрены особенности разработки технологии томографии морской земной коры на основе применения береговых лазерных деформографов и низкочастотных гидроакустических излучателей. При изучении закономерностей распространения гидроакустических сигналов, создаваемых гидроакустическими излучателями, по клиновидному шельфу уменьшающейся глубины с оценкой доли гидроакустической энергии, трансформированной в сейсмоакустическую энергию, установлено, что при глубинах меньше половины гидроакустической волны практически весь сигнал распространяется в дне. При выполнении экспериментальных исследований, проведенных в бухте Витязь Японского моря с применением береговых лазерных деформографов и гидроакустического излучателя, генерирующего сложные фазоманипулированные сигналы с центральной частотой 33 Гц, отработаны основы создания технологии томографии земной коры шельфовых областей различных морей. С целью решения подобных задач при больших глубинах моря разработан и создан мощный низкочастотный гидроакустический излучатель на 19–26 Гц, предназначенный для генерации сигналов различной сложности с амплитудой до 10 кПа. В ходе его испытаний на шельфе Японского моря определены скорости волн Рэлея, Стоунли и Лява на трассе «излучатель–лазерный деформограф».

PACS: 43.35.+d, 43.58.+z

УДК: 551.462

Ключевые слова: томография дна, инверсия, гидроакустические излучатели, лазерные деформографы, модель земной коры.

ВВЕДЕНИЕ

Низкочастотная гидроакустика является уникальным инструментом для диагностики пород океанического дна. Чем ниже частота сигнала, тем большая часть его энергии проникает в дно и тем глубже его проникновение в донные осадочные слои. Такое проникновение может достигать сотни метров, а при очень низких частотах излучаемых сигналов - до границы Мохоровичича. Благодаря этому характеристики такой волны зависят от параметров дна, а значит, при анализе принятых сигналов можно получить информацию о физических свойствах дна. Методы и подходы использования низкочастотных сигналов в интересах диагностики структуры морского дна активно развиваются уже на протяжении более чем сорока лет. Результаты этих многочисленных исследований позволяют рассматривать сейсмоакустику как самостоятельное и перспективное направление морской геофизики. В нашей стране различные авторы решение таких проблем называют как: томография дна океана, диагностика дна океана, сейсмоакустическое профилирование и др. [1]. За рубежом на протяжении уже многих лет общепринят термин «геоакустическая инвер-

сия». Геоакустическая инверсия — это процесс оценивания параметров морского дна по результатам геоакустического моделирования, основанного на натуральных измерениях [2]. Любая задача геоакустической инверсии является весьма непростой обратной задачей, относящейся к классу некорректных [3]. Важным этапом решения задач геоакустической инверсии является использование в экспериментах источников звука и приемных систем, обладающих необходимыми свойствами. В последние годы начаты подобные работы на основе применения низкочастотных гидроакустических излучателей, создающих в воде гидроакустические сигналы различной сложности, и лазерных деформографов [4, 5]. Полученные результаты по построению реальной модели земной коры изучаемого участка морского дна с определением основных упругих параметров позволили сформировать надежды по удачному применению данных методов для решения задач по изучению структуры и состава морской земной коры и построения реальной модели земной коры исследуемых регионов.

1. ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАЦИИ ИЗЛУЧЕННЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ШЕЛЬФЕ УБЫВАЮЩЕЙ ГЛУБИНЫ

Перед выполнением экспериментальных исследований, результаты которых приведены в данном разделе,

*E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

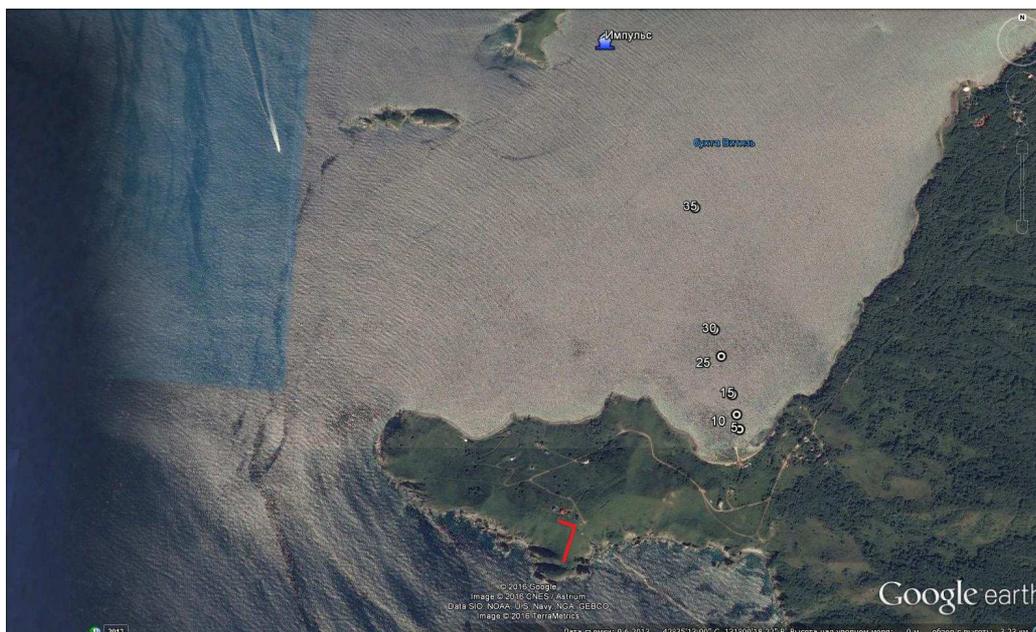


Рис. 1: Схема эксперимента Импульс (НИС «Импульс»). Точки излучения с указанием глубины (35, 30 и т.д.). Красным указан лазерный деформограф на м. Шульца

ставились следующие задачи:

1. экспериментально определить пространственное распределение энергии, излучаемой излучателем;
2. определить величину излученной излучателем энергии, которая трансформируется в энергию гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу;
3. определить предельную глубину, при которой энергия распространяющихся по шельфу гидроакустических волн почти вся переходит в энергию сейсмоакустических волн;
4. определить величину энергии распространяющихся по шельфу гидроакустических волн, трансформированной в энергию сейсмоакустических волн, регистрируемых береговым лазерным деформографом.

В эксперименте были задействованы: низкочастотный гидроакустический излучатель, гидрофоны Bguel & Kjaer 8104 и 8103, береговой 52.5-метровый лазерный деформограф, научно-исследовательское судно «Импульс», маломерный катер, вспомогательная аппаратура. Низкочастотный гидроакустический излучатель, частично описанный в [4], предназначен для генерации сигналов различной сложности в частотном диапазоне 30-40 Гц при глубинах погружения от 2 до 25 м. Эффективное звуковое давление, которое создает излучатель в его рабочем диапазоне частот, может достигать величину 3700 Па (191 дБ/мкПа). Гидрофон Bguel & Kjaer 8103 применялся для вертикального зондирования гидроакустического поля вблизи

излучателя. Гидрофон Bguel & Kjaer 8104 был помещен на мобильной капсуле, внутри которой находились: предусилитель гидрофона, аналого-цифровой преобразователь, автономное записывающее устройство. 52.5-метровый лазерный деформограф находится на м. Шульца. Научно-исследовательское судно (НИС) «Импульс» водоизмещением 40 т использовалось для обеспечения режима излучения. Маломерный катер использовался для транспортировки капсулы с гидрофоном Bguel & Kjaer 8104 и зондирования распространяющихся по шельфу гидроакустических сигналов. Вспомогательная аппаратура состоит из системы точного времени, аналого-цифрового преобразователя, станции бесперебойного питания, метеостанции ANDERRA, записывающего компьютера.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. С борта судна, стоящего в точке 1, низкочастотный гидроакустический излучатель опускался на глубину 15 м. Он непрерывно излучал гармонический сигнал с частотой 33 Гц. С борта судна с помощью гидрофона Bguel & Kjaer 8103 проводилось вертикальное зондирование от поверхности моря до дна. Зондирование выполнялось через каждые 1 м по вертикальной линии, ближайшая точка которой находилась на расстоянии 1 м от излучателя. По экспериментальным данным было определено уравнение распределения давления с глубиной. В точках №2–№6 с помощью мобильной капсулы с гидрофоном Bguel & Kjaer 8104 проводилось вертикальное зондирование давления, создаваемого распространяющимися по шельфу гидроакустическими волнами. Для каждой точки приёма по полученным экспериментальным данным было определено уравнение кривой вертикального распределения давления.

В дальнейших расчётах будем использовать следующие данные: $\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ — плотность воды, $c_w = 1500 \text{ м/с}$ — скорость звука в воде, $\rho_b = 2600 \text{ кг/м}^3$ — плотность пород дна, верхнего слоя земной коры, $c_b = 2970 \text{ м/с}$ — скорость волны рэлеевского типа на границах «дно–вода» и «земная кора–воздух» [4], $f = 33 \text{ Гц}$ — частота, $\theta = 8^\circ$ — угол между осью лазерного деформографа и линией «излучатель – станции 2–6», $\omega = 2\pi f$.

По полученному уравнению рассчитаем плотность энергии, излучаемой излучателем, по формуле:

$$E_r = \int_0^{30} \frac{(S_r(z))^2}{2\rho_w c_w^2} dz. \quad (1)$$

Аналогично рассчитаем плотность энергии гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу, по уравнениям, полученным для глубин 35, 30, 25, 10 и 5 м по формуле:

$$E_r = \int_0^h \frac{(S_h(z))^2}{2\rho_w c_w^2} dz, \quad (2)$$

где $S_h(z)$ — уравнение кривой при глубине моря h .

Предполагаем, что излученный низкочастотным гидроакустическим излучателем сигнал доходит до лазерного деформографа в виде волн поверхностного типа. При этом основной вклад в смещения земной коры вносят затухающие поверхностные волны рэлеевского типа. Амплитуда данных волн экспоненциально затухает с глубиной земной коры. Поэтому плотность упругой энергии поверхностных волн рэлеевского типа можно подсчитать по следующему уравнению:

$$E_r = \int_0^{\lambda_b} \frac{\rho_b \omega^2 u^2 \exp(-4\pi z / \lambda_b)}{2 \cos(\theta)^2} dz, \quad (3)$$

где: u — амплитуда смещения на частоте излученного сигнала, зарегистрированная лазерным деформографом, λ_b — длина волны рэлеевского типа на границе «вода–дно» или «воздух–земная кора».

Распространяющаяся в воде по шельфу гидроакустическая волна и распространяющаяся по границам раздела сред затухающая волна рэлеевского типа имеют цилиндрическую расходимость. В этом случае с учетом расстояния от источника (гидроакустического излучателя) можно оценить величину плотности энергии гидроакустического излучателя, которая преобразовывается в плотность энергии гидроакустических волн с частотой 33 Гц, которая, в свою очередь, трансформируется в плотность энергии зарегистрированных лазерным деформографом затухающих волн рэлеевского типа.

По полученным расчетам можно сделать следующие выводы:

1. При глубинах $h \geq \lambda/2$, где $\lambda = \frac{1500 \text{ м/с}}{33} \approx 45 \text{ м}$, в среднем около 22% энергии гидроакустического излучателя трансформируется в энергию гидроакустических волн, распространяющихся по шельфу.
2. При глубинах $h \leq \lambda/2$ энергия гидроакустических волн трансформируется в энергию затухающих волн рэлеевского типа, распространяющихся на границах «вода–дно» и «воздух–земная кора».
3. Около 72% энергии гидроакустических волн трансформируется в энергию затухающих волн рэлеевского типа.
4. Около 78% излученной гидроакустическим излучателем энергии трансформируется в энергию объемных волн. Данные волны уходят в земную кору и не регистрируются лазерным деформографом.

2. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОМОГРАФИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ШЕЛЬФОВЫХ ОБЛАСТЕЙ



Рис. 2: Схема эксперимента

Эксперимент, схема которого приведена на рис. 2, был проведен в октябре 2016 г. Излучатель опускался на глубину 11 м с борта НИС «Малахит», который стоял на якорю. В воде излученный сигнал записывался контрольным гидрофоном, который располагался в 1 м от излучателя. Работа компьютера, отвечающего за излучение, и запись контрольного гидрофона синхронизировались ГЛОНАСС-модулем, обеспечивающим временную привязку 1 мс. Модуль аналогичного типа располагался на пишущем компьютере, на который посту-

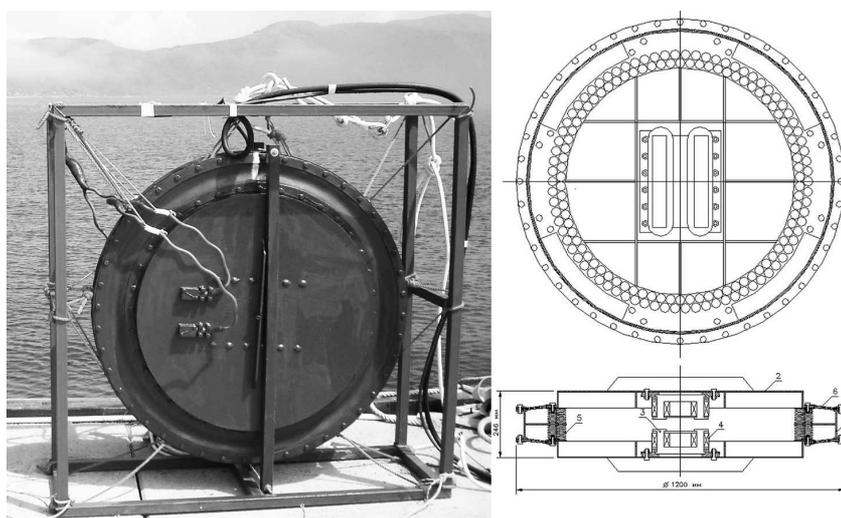


Рис. 3: Излучающая гидроакустическая система

пали данные с лазерных деформографов. Излучатель излучал сложные фазоманипулированные сигналы.

При свертке полученных экспериментальных данных лазерного деформографа с излученным сигналом выявлены максимумы приходов сигнала каждого цикла излучения. Относительно главного максимума (отсчет мах) прихода выявлены максимумы (мах-2, мах-1, мах+1, мах+2) меньшей амплитуды, соответствующие приходам сейсмических волн, распространяющихся по различным путям. Всего выделено пять максимумов приходов. При дальнейшем анализе было определено строение верхнего слоя морской земной коры б. Витязь, которая состоит из слоя осадков познеплейстоцено-голоценового возраста (QIII–IV) толщиной не более 10 м и полупространства гранитоидами познепермского возраста (γP_2).

3. ИЗЛУЧАЮЩАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НА ЧАСТОТАХ 19–26 Гц

Разработана и создана излучающая гидроакустическая система, предназначенная для генерации гармонических и фазоманипулированных гидроакустических сигналов в полосе частот порядка 1 Гц при центральной частоте полосы в диапазоне 19–26 Гц. Амплитуда объемных колебательных смещений излучателя достигает величину 0.0123 м^3 . На частоте 20 Гц в безграничном водном пространстве это соответствует излучаемой акустической мощности 1000 Вт. Внешний вид излучающей гидроакустической системы приведен на рис. 3, в состав которой входят: излучатель с электромагнитным преобразователем, рама для подвеса излучателя, кабель–шланг с контрольным манометром, источник электропитания, электронасос, контрольный гидрофон, два калибровочных акселерометра.

Излучатель имеет массу 260 кг на воздухе и 40 кг

в воде. Содержит цилиндрический корпус и пару излучающих поршней, колеблющихся во взаимно-противоположных направлениях и создающих синфазные потоки объемной колебательной скорости. Колебания возбуждает преобразователь электромагнитного типа с П-образными наборными половинами сердечника и четырьмя катушками. Между краями поршней зажат набор из 312 цилиндрических пружин, предварительное сжатие которых достигается за счет пониженного на 0.5 атм. давления воздуха в полости излучателя относительно гидростатического на глубине его погружения. Для компенсации гидростатического давления при погружении или поднятии применяется шланг длиной 60 м с контрольным манометром и двумя ниппелями. Зазоры между фланцами корпуса и краями поршней уплотнены резинотканевыми воротниками. Катушки в каждой паре на половине сердечника соединены последовательно. Подвод тока к ним осуществляют посредством упругих проводников, выведенных через уплотнения на поршнях. Коммутация проводников выполнена непосредственно на излучателе клеммно-болтовыми соединениями с полиизобутиленовой гидроизоляцией и соответствует последовательному соединению пар. В качестве первичных источников постоянного тока используется батарея последовательно соединенных (в количестве от 3 до 22 штук, в зависимости от необходимой мощности) кислотных аккумуляторов напряжением по 12 В, емкостью 90 А·час. Источник питания представляет собой мостовой ключевой усилитель, выполненный на двух полумостовых IGBT-модулях, снабжен компенсирующей батареей конденсаторов 420 мкФ, защитным автоматом и амперметром постоянного тока.

Результаты проведенных испытаний данной системы на шельфе Японского моря показали большие перспективы применения ее при проведении работ как фундаментального, так и прикладного характеров.

4. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ МОРСКОГО ДНА С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЧАСТОТНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА 19-26 ГЦ И БЕРЕГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДЕФОРМОГРАФОВ

Для отработки технологии диагностики морского дна с помощью гидроакустических излучателей и береговых лазерных деформографов были выбраны две станции излучения (рис. 4). Так как при работе на любой глубине излучатель и противофазный ему мнимый источник совместно образуют антенну, минимум характеристики направленности, которой лежит в горизонтальной плоскости, для получения максимума характеристики, направленной вертикально вниз, было выбрано расположение излучателя на глубине, близкой к 17 м (четверти длины излучаемой волны). Станция 1 находится на расстоянии 17 км от берегового приемника в шельфовой области Японского моря с постепенно увеличивающейся глубиной моря до 90 м, с толщиной осадочных пород от 25 м в прибрежной зоне до 360 м в точке излучения [4]. Станция 2 расположена на расстоянии 16 км от деформографа с практически 30% перекрытием трассы распространения сигнала гранитными породами береговой и прибрежной части п-ова Гамова. Пакет излученного сигнала имел следующий вид: период тонового излучения и два периода фазоманипулированного сигнала разной длительности, с паузами между ними.



Рис. 4: Схема расположения станций гидроакустического излучения 1 и 2 относительно лазерного деформографа (ЛД)

В процессе обработки выявлено от 5 до 7 максимумов прихода сложного фазоманипулирован-

ного сигнала (M -последовательности). Исследованы времена прихода каждого максимума первой M -последовательности сигнала излучения на станциях 1 и 2. Определены скорости волн и построена модель верхнего слоя морской земной коры на трассе «излучатель–приёмник».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальных исследований на клиновидном шельфе с монотонно уменьшающейся глубине установлено, что около 22 % излученной излучателем энергии переходит в энергию гидроакустических волн, распространяющихся в воде. В свою очередь около 72% энергии данных гидроакустических волн трансформируется в энергию волн рэлеевского типа, которые регистрирует береговой лазерный деформограф.

На основе экспериментальных данных, полученных при проведении комплексного эксперимента в бухте Витязь Японского моря с применением береговых лазерных деформографов и низкочастотного гидроакустического излучателя, генерирующего сложные фазоманипулированные сигналы с центральной частотой 33 Гц, обрабатываются основы бесконтактной технологии томографии земной коры шельфовых областей различных морей, в том числе покрытых льдом, позволяющей оперативно определять структуру и состав верхнего слоя морской земной коры. При этом определены следующие значения скоростей распространяющихся волн: скорость волны Лява — 3790 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границах « γP_2 –вода» и « γP_2 –воздух» — 2000 м/с, скорость волны Рэлея затухающего типа на границе «QIII–IV–вода» — 1890 м/с, скорость не затухающей волны Рэлея на границах « γP_2 –вода» — 1540 м/с, скорость волны Рэлея не затухающего типа на границе «QIII–IV–вода» — 900 м/с, скорость продольной волны в слое QIII–IV — 1740 м/с.

Разработана и создана излучающая гидроакустическая система, предназначенная для генерации гармонических и фазоманипулированных гидроакустических сигналов в полосе частот порядка 1 Гц при центральной частоте полосы в диапазоне 19–26 Гц. Амплитуда объемных колебательных смещений излучателя — до 0.0123 м³. На частоте 20 Гц в безграничном водном пространстве это соответствует излучаемой акустической мощности 1000 Вт.

В ходе отработки методики проведения томографических исследований с помощью низкочастотного гидроакустического излучателя на 19–26 Гц и берегового лазерного деформографа создана модель верхнего слоя морской земной коры Гамоовского полигона, которая состоит из трех слоев (QI–II, QIII–IV, N), основные параметры которой сводятся к следующему: скорость звука в воде 1459 м/с у поверхности моря до 1452 м/с у дна, скорости затухающей волны Рэлея на границах « γP_2 –вода» и « γP_2 –воздух» — 2970 м/с, скорость волны продольного типа в полупространстве γP_2 —

5650 м/с, скорость волны Лява — 3680 м/с, скорость продольной волны в осадочном слое N2 — 2380 м/с, скорость затухающей волны Рэлея на границах «QI–II–вода» — 1400 м/с.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы «Дальний Восток» и РФФИ (грант № 16-29-02023 офи_м).

- [1] Авербах В. С., Боголюбов Б. Н., Заславский Ю. М., Лебедев А. В., Марышев А. П., Постоев Ю. К., Таланов В. И. Акуст. журн. 1999. **45**, № 1. С. 5. (Averbakh V. S., Bogolyubov B. N., Zaslavskii Yu. M., Lebedev A. V., Maryshev A. P., Postoev Yu. K., Talanov V. I. Acoust. Phys. 1999. **45**, N 1, P 1.)
- [2] Tolstoy A. J. Acoust. Soc. Am. 2008. **124**, N 5. P. 2793.
- [3] Акустика дна океана / под ред. Купермана У. и Енсена Ф. М.: Мир. 1984.
- [4] Долгих Г. И., Долгих С. Г., Пивоваров А. А., Самченко А. Н., Чупин В. А., Швырёв А. Н., Яроцук И. О. ДАН. 2013. **452**, № 3. С. 321. (Dolgikh G. I., Dolgikh S. G., Pivovarov A. A., Samchenko A. N., Chupin V. A., Shvuryov A. N., Yaroshchuk I. O. Doklady Earth Sciences. 2013. **452**, N 1, P. 971.)
- [5] Чупин В. А., Долгих Г. И. Вестник ДВО РАН. 2015. № 6. С. 90.

Development of technology of tomography the earth crust of the shelf and deep sea based on the use of coastal laser strainmeters and broadband low-frequency hydroacoustic emitters

G. I. Dolgikh^{1,2}

¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia

²Far Eastern Federal University, School of Natural Sciences, Department of Oceanography and Hydrometeorology
FEFU Campus, Russky Island, Russia
E-mail: ^adolgikh@poi.dvo.ru

Particulars of development of technology the tomography of sea crust on the basis of application of coastal laser strainmeters and low-frequency hydroacoustic emitters are considered. In studying the regularities of distribution of the hydroacoustic signals created by hydroacoustic emitters according to the wedge-shaped shelf of decreasing depth with an assessment of a share of the hydroacoustic energy transformed to seismoacoustic energy, it is established that with depths less than a half of hydroacoustic wave practically the entire signal propagates in the bottom. When carrying out the experimental studies in the Vityaz Bay of the Sea of Japan using coastal laser strainmeters and the hydroacoustic emitter, generating complex phase-manipulated signals with a central frequency of 33 Hz, the foundations of technology of tomography of the earth crust of shelf areas of various seas have been worked out. With the purpose of solving similar problems at large depths of the sea, a powerful low-frequency hydroacoustic emitter on 19–26 Hz was designed and built, designed to generate signals of varying complexity with amplitude up to 10 kPa. During its tests on the shelf of the Sea of Japan, the velocities of the Rayleigh, Stoneley and Love waves were determined on «emitter–laser strainmeter» path.

PACS: 43.35.+d, 43.58.+z

Keywords: bottom tomography, inversion, hydroacoustic emitters, laser strainmeters, a model of the earth's crust.

Received 11 July 2017.

Сведения об авторе

Долгих Григорий Иванович — академик РАН, доктор физ.-мат. наук, зав. отделом ТОИ ДВО РАН, зав. кафедрой океанографии и гидрометеорологии ДВФУ; тел.: (423) 231-23-52, e-mail: dolgikh@poi.dvo.ru.