

УДК 534.232

СЕЗОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦЕ «ВОДА–ДНО»

В.А. Чупин¹, С.С. Будрин¹,
Г.И. Долгих^{1,2}, А.А. Пивоваров¹,
А.Н. Самченко¹, А.Н. Швырёв¹,
И.О. Ярощук¹

Тихоокеанский Океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН¹
Школа естественных наук Дальневосточного федерального университета²

В рамках данной работы приводятся результаты обработки данных, полученных при проведении цикла экспериментальных работ, выполненных по единой методике в разные сезоны года с целью изучения закономерностей трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе «вода–дно» в шельфовой зоне Японского моря. В комплексе оборудования в качестве излучающей системы использовался низкочастотный гидроакустический излучатель с центральной частотой излучения 33 Гц, а в качестве приёмной системы – береговой 52,5-метровый лазерный деформограф. Выполнены исследования по изучению природы вариаций амплитуды принятого сигнала при работе излучателя на различном удалении от приемной системы и проведен анализ изменения коэффициента трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую энергию. Установлено, что величина коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны имеет сезонную изменчивость.

ВВЕДЕНИЕ

При проведении ряда экспериментальных работ установлено, что с понижением частоты излучения всё большая доля энергии гидроакустических волн трансформируется в энергию сейсмоакустических волн на границе «вода–дно» [1–3]. Дальнейшие модельно-теоретические исследования, основанные на полученных экспериментальных данных, позволили оценить величину гидроакустической энергии, трансформированной в сейсмоакустическую энергию [4]. Но при анализе данных, полученных в ходе выполнения экспериментальных работ на шельфе Японского моря по генерации низкочастотных гидроакустических колебаний низкочастотным гидроакустическим излучателем и приёму излучённых сигналов бе-

реговым лазерным деформографом, установлено, что при дрейфовом перемещении работающего излучателя значительно меняется амплитуда принятых лазерным деформографом сигналов. При расположении излучателя на «глубокой» воде вариации принятых амплитуд имеют значительно меньшую величину. Дрейфовое изменение принятых амплитуд может быть связано прежде всего с неоднородным строением сред распространения (вода, верхний слой морской земной коры), а также с вариациями наклона морского дна относительно направления на гидроакустический излучатель. Неоднородное строение водной среды связано с изменяющимися размерами слоёв воды, имеющих различные температуры. Для изучения влияния неоднородности водной среды на эффективность

трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны необходимо было провести экспериментальные исследования по изучению закономерностей трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую энергию с применением низкочастотного гидроакустического излучателя с центральной частотой излучения 33 Гц и берегового лазерного деформографа в разные сезоны года по одной методике при расположении гидроакустического излучателя в одинаковых точках. В данной работе нас не интересуют определения и понятия «гидроакустическая энергия» или «сейсмоакустическая

¹ 690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43.
E-mail: chupin@poi.dvo.ru

² 690990 Владивосток, ул. Суханова, 8.
E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru

энергия», происхождение которой связано с результатом трансформации гидроакустических сигналов, излучённых низкочастотным гидроакустическим излучателем на частоте 33 Гц, в сейсмоакустические сигналы на границе «вода–дно», а интересует лишь изменение отношения («сейсмоакустическая энергия»)/ («гидроакустическая энергия»), которое можно определить как коэффициент трансформации. Таким образом, целью данной работы является экспериментальное изучение сезонной зависимости коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для экспериментального изучения сезонной зависимости коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны была использована программно-аппаратная база сейсмоакустико-гидрофизического комплекса ТОИ ДВО РАН [5], ос-

нову которого составляет лазерно-интерференционный комплекс [6], состоящий из двухкоординатного лазерного деформографа [7], лазерного нанобарографа [8] и лазерно-интерференционных гидросферных приёмных систем [9, 10]. В статье анализируются данные, полученные на 52,5-метровом лазерном деформографе (лазерный деформограф «север–юг») (рис. 1), созданном на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона и частотно стабилизированного гелий-неонового лазера, который структурно входит в состав двухкоординатного лазерного деформографа [7]. Измерительное плечо лазерного деформографа «север–юг» ориентировано под углом 198° к линии «север–юг» и находится на глубине 3–5 м от поверхности земли. Ближайшая к воде часть конструкции лазерного деформографа «север–юг» (угловой отражатель) расположена на расстоянии 120 м от уреза воды на высоте 67 м над уровнем моря.

В качестве генератора низкочастотных гидроакустических сигналов в эксперименте использовалась низкочастотная излучающая си-

стема с электромагнитным преобразователем, предназначенная для генерации гармонических и фазоманипулированных гидроакустических сигналов на частоте 33 Гц (рис. 2), которая может работать на глубинах погружения от 2 до 25 м и выдавать максимальное эффективное звуковое давление величиной до 3700 Па (191 дБ/1 мкПа) [11].

Для измерения гидрофизических параметров морской среды на трассе распространения гидроакустических колебаний использовался профилометр Valeport miniSVP, представляющий собой 24-битовый профилирующий регистратор температуры, скорости звука и давления.

Обработка экспериментальных данных выполнялась средствами пакета прикладных программ «Deformograph», в котором имеются всевозможные программы спектрального и статистического характера.

При выполнении поставленных в работе задач необходимо было обеспечить соблюдение следующих условий: 1) станции излучений должны быть во всех экспериментах одними и теми же со строгой привязкой к координатной сетке; 2) глубина погружения излучателя и его режим работы должны быть одинаковыми при проведении экспериментов в разные сезоны года на одной и той же станции; 3) оптико-электронная часть лазерного деформографа должна быть неизменной. Все эти условия были выполнены.

В соответствии с существующей теорией [12], утверждающей, что при расположении источника звука близко к поверхности воды, т.е. при $h/\lambda < 0,5$ (где h – заглубление источника, λ – длина гидроакустической волны), его поле соответствует полю диполя и амплитуда звукового давления тем меньше, чем меньше h , была выбрана оптимальная глубина рабочего погружения излучателя 15 м, при которой наблюдается наибольший уровень сигнала. Во всех точках излучения обеспечивалась постоянная мощность излучения, амплитуда которого контролировалась гидрофоном,

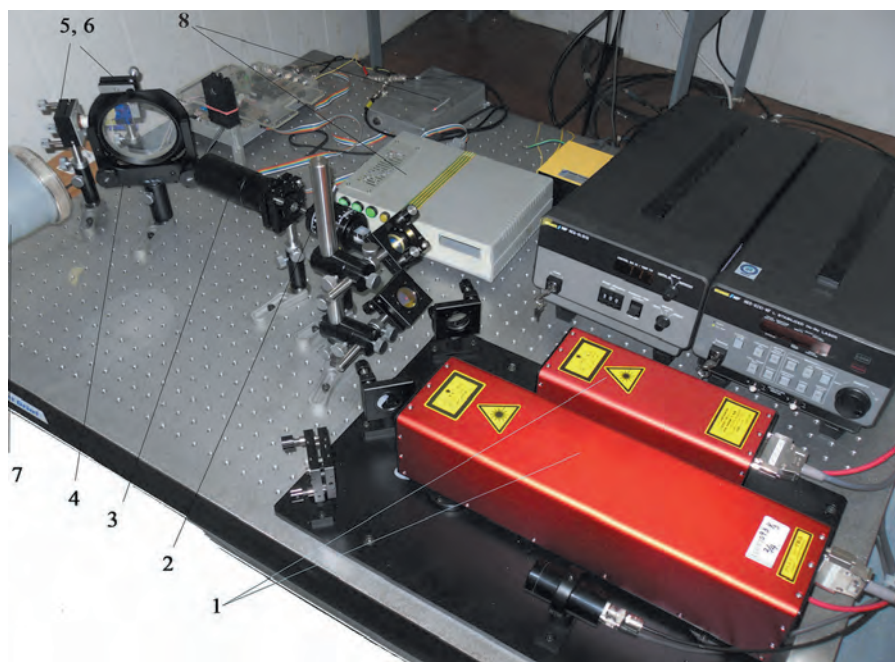


Рис. 1. Центральные узлы интерферометров лазерного деформографа с плечами 52,5 м (слева) и 17,5 м (справа). 1 – лазер; 2 – оптический затвор; 3 – коллиматор; 4 – полупрозрачная плоскопараллельная пластина; 5, 6 – плоскопараллельные юстировочные зеркала на пьезокерамических цилиндрах; 7 – световод; 8 – система регистрации



Рис. 2. Гидроакустическая излучающая система (33 Гц)

расположенным на расстоянии 1 м от геометрического центра излучателя.

В статье мы остановимся на анализе данных лазерного деформографа «север-юг», полученных при работе низкочастотного гидроакустического излучателя на станциях №1–№3 (рис. 3).

Ближайшая к лазерному деформографу точка излучения (станция №1) находилась на расстоянии около 2 км от береговой линии м. Шульца, следующая точка излучения (станция №2) располагалась на расстоянии около 2 км от станции №1, а самая удалённая точка (станция №3) находилась на расстоянии около 6 км от береговой линии м. Шульца. Экспериментальные работы по генерации низкочастотных гидроакустических сигналов низкочастотным гидроакустическим излучателем на указанных станциях были выполнены в октябре 2012 г.,

Рис. 3. Карта-схема проведения экспериментальных работ



а также в июне 2013 г. Излучаемый гидроакустический сигнал имел следующую форму: тональное излучение – 300 с, пауза – 20 с, излучение М-последовательности – 84 с. На рис. 4, а приведена динамическая спектрограмма, полученная при обработке записи контрольного гидрофона, который применялся с целью определения мощности излучённого сигнала, времени начала и окончания работы излучателя. Как видно из динамической спектрограммы, излучатель работал в двух режимах: гармоническом (3/4

левой части динамической спектрограммы) и фазоманипулированном (последняя четвёртая часть динамической спектрограммы). При анализе данных контрольного гидрофона установлено, что величина излучённого сигнала на станции №3 при проведении экспериментов в октябре 2012 г., а также в июне 2013 г. была одинаковой. Это же было обеспечено при работе низкочастотного гидроакустического излучателя на станциях №1 и №2. На рис. 4, б–г приведены динамические спектрограммы, полученные

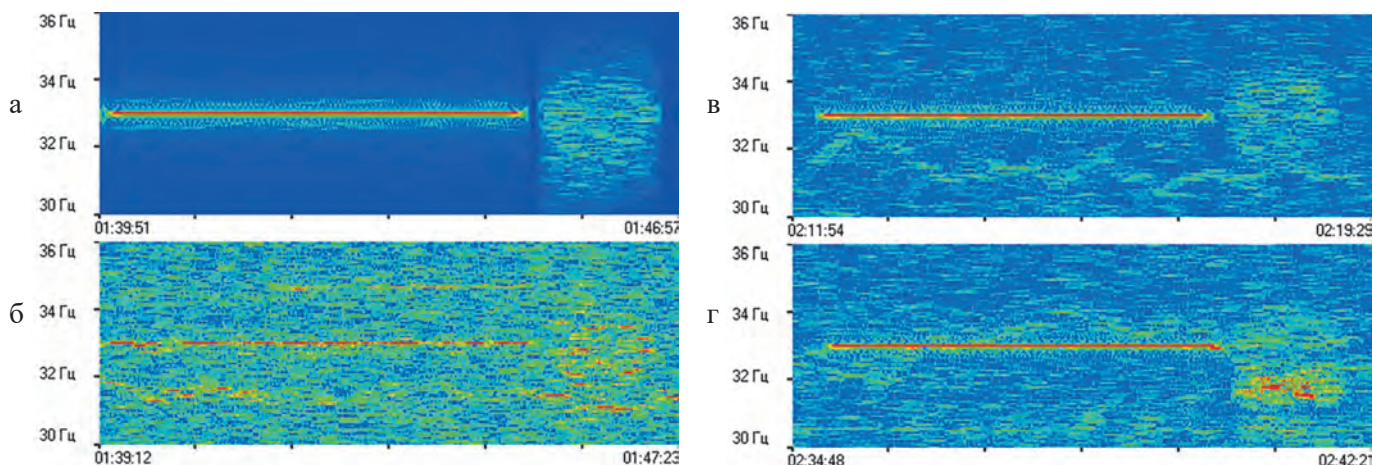


Рис. 4. Динамические спектрограммы при работе гидроакустического излучателя: а – контрольный гидрофон, б – лазерный деформограф при удалении от источника около 6 км, в – лазерный деформограф при удалении от источника около 4 км, г – лазерный деформограф при удалении от источника около 2 км. 10 июня 2013 г.

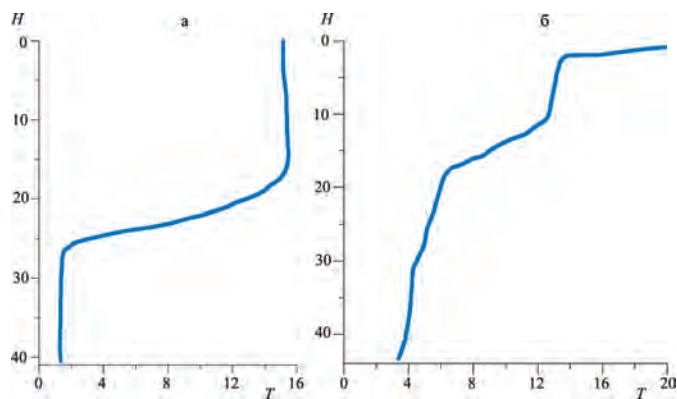


Рис. 5. Распределение температуры на трассе распространения гидроакустического сигнала в заливе Посьета Японского моря в 21 октября 2012 г. (а) и 10 июня 2013 г. (б)

при обработке записей лазерного деформографа «север–юг» при удалении источника излучения на 6, 4 и 2 км соответственно, на которых тоже видны сигналы, полученные при работе низкочастотного гидроакустического излучателя в непрерывном и фазоманипулированном режимах работы.

На рис. 5, а и 5, б приведены графики распределения температуры в октябре 2012 г. и в июне 2013 г. соответственно, полученные с помощью профилометра Valeport miniSVP.

Далее сравним результаты обработки экспериментальных данных лазерного деформографа «север–юг», полученные при работе гидроакустического излучателя на одних и тех же станциях в разные сезоны года.

На рис. 6 приведены графики вариаций амплитуд, зарегистрированных лазерным деформографом сейсмоакустических сигналов на частоте излучения 33 Гц, полученных в результате трансформации гидроакустических сигналов на границе «вода–дно», при работе гидроакустического излучателя на станции №3 21 октября 2012 г., 09 июня 2013 г., 10 июня 2013 г. соответственно, в непрерывном режиме. Можно утверждать, что 21 октября 2012 г. максимальная величина принятого сигнала равна 2,3 нм с усреднённым значением около 0,9 нм. 09 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 0,9 нм с усреднённым

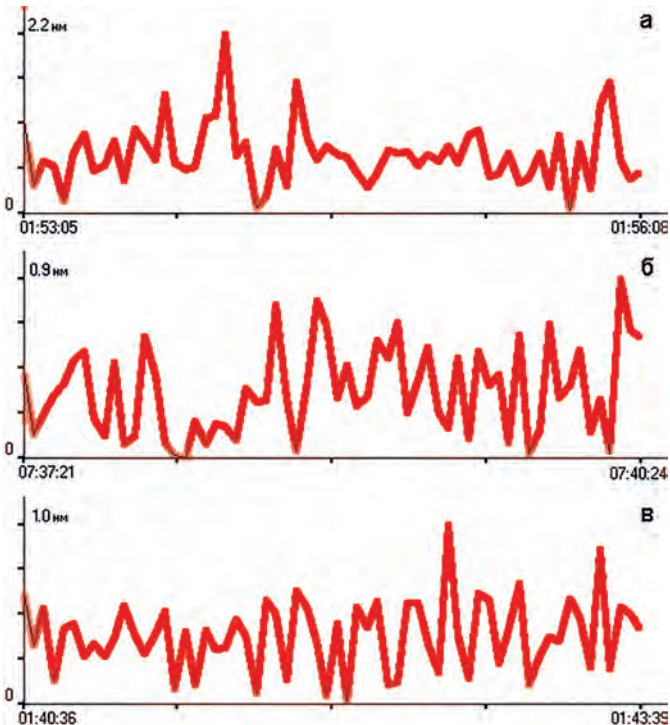


Рис. 6. Вариации амплитуды сигнала, принятого лазерным деформографом при работе гидроакустического излучателя на станции № 3: а – 21 октября 2012 г., б – 09 июня 2013 г., в – 10 июня 2013 г.

значением около 0,4 нм. 10 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 1,0 нм с усреднённым значением около 0,3 нм.

На рис. 7 приведены графики вариаций амплитуд, зарегистрированных лазерным деформографом сейсмоакустических сигналов на частоте излучения 33 Гц, полученных в результате трансформации гидроакустических сигналов на границе «вода–дно», при работе гидроакустического излучателя на станции №2 21 октября 2012 г., 09 июня 2013 г., 10 июня 2013 г. соответственно, в непрерывном режиме. Можно утверждать, что 21 октября 2012 г. максимальная величина принятого сигнала равна 2,7 нм с усреднённым значением около 1,4 нм. 09 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 0,8 нм с усреднённым значением около 0,3 нм. 10 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 1,2 нм с усреднённым значением около 0,4 нм.

На рис. 8 приведены графики вариаций амплитуд, зарегистрированных лазерным деформографом сейсмоакустических сигналов на

частоте излучения 33 Гц, полученных в результате трансформации гидроакустических сигналов на границе «вода–дно», при работе гидроакустического излучателя на станции №1 21 октября 2012 г., 09 июня 2013 г., 10 июня 2013 г. соответственно, в непрерывном режиме. Можно утверждать, что 21 октября 2012 г. максимальная величина принятого сигнала равна 1,9 нм с усреднённым значением около 0,9 нм. 09 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 0,9 нм с усреднённым значением около 0,4 нм. 10 июня 2013 г. максимальная величина принятого сигнала равна 1,0 нм с усреднённым значением около 0,5 нм.

Далее проанализируем изменение коэффициента трансформации гидроакустической энергии в сейсмоакустическую энергию, который мы определили выше как отношение («сейсмоакустическая энергия», W_c)/ («гидроакустическая энергия», W_2), т.е.:

$$k = W_c / W_2.$$

Для летнего периода наблюдения данное отношение выразим так:

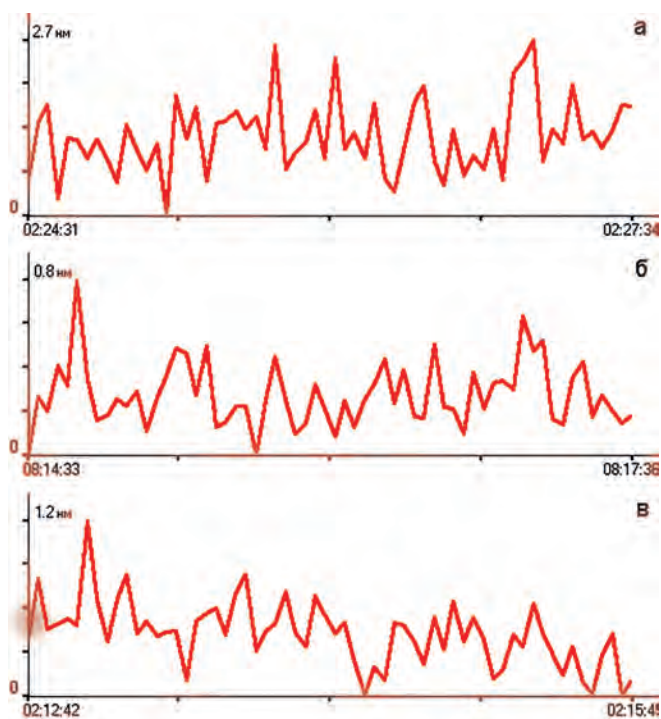


Рис. 7. Вариации амплитуды сигнала, принятого лазерным деформографом при работе излучателя на станции № 4: а – 21 октября 2012 г., б – 09 июня 2013 г., в – 10 июня 2013 г.

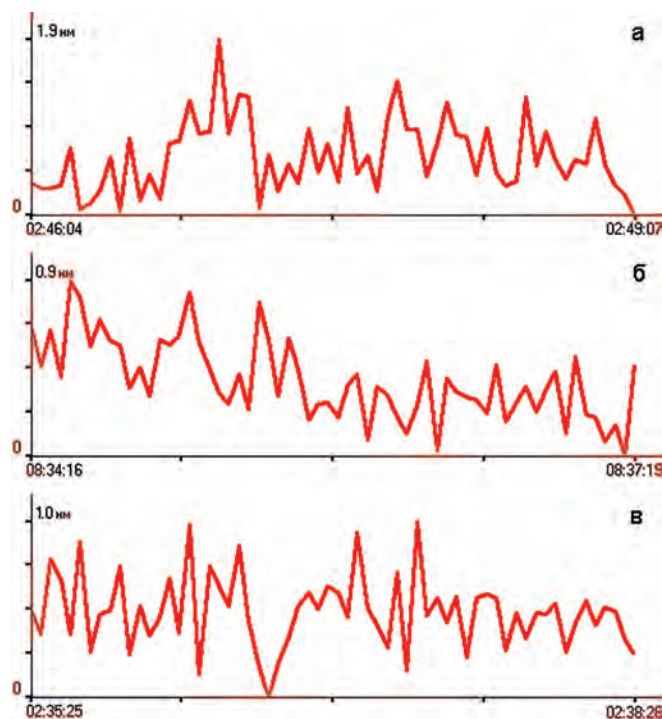


Рис. 8. Вариации амплитуды сигнала, принятого лазерным деформографом при работе излучателя на станции №5: а – 21 октября 2012 г., б – 09 июня 2013 г., в – 10 июня 2013 г.

$$k_1 = W_{c1} / W_2.$$

Для осеннего периода наблюдения данное отношение выразим так:

$$k_2 = W_{c2} / W_2.$$

Нас будет интересовать только отношение k_1/k_2 . Учитывая то, что излучаемая гидроакустическая энергия была во всех экспериментах одинаковой, а упругие свойства пород дна практически не менялись, можно написать, что:

$$k_2/k_1 = (W_{c2}/W_{c1}) \cong (A_{c2}/A_{c1})^2,$$

где A_{c2} – амплитуда сейсмоакустической волны в осенний период, A_{c1} – амплитуда сейсмоакустической волны в летний период.

Таким образом, данное отношение с учётом усреднений будет равно:

$$k_2/k_1 \cong 6.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе обработки данных лазерного деформографа, полученных при работе низкочастотного гидроакустического излучателя с центральной частотой излучения 33 Гц, установлена сезонная из-

менчивость коэффициента трансформации гидроакустических волн в сейсмоакустические волны на границе «вода–дно».

Работа по обработке полученных экспериментальных данных выполнена

при частичной финансовой поддержке программы «Дальний Восток» 2015 года, а по интерпретации полученных результатов обработки – при частичной финансовой поддержке РФФИ (соглашение №14-50-00034).

ЛИТЕРАТУРА

1. Akal Tuncay, Jensen F.B. Ocean seismo-acoustic propagation // Progr. Congr. Acoust. Symp. Underwater Acoust. Halifax; London, 1987. P. 493–500.
2. Долгих Г.И., Давыдов А.В., 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. Долгих Г.И., Чулин В.А. Экспериментальная оценка преобразования гидроакустического излучения в сейсмоакустическую волну // Акуст. журн. 2005. Т. 51, № 5. С. 628–632.
5. Долгих Г.И., Багюшин Г.Н., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы «атмосфера-гидросфера-литосфера» // Приборы и техника эксперимента. 2002. Т. 45, № 3. С. 120–122.
6. Долгих Г.И. Лазерно-интерференционный комплекс // Сейсмические приборы. 2003. Выпуск 39. С. 13–27.
7. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.
8. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швец В.А., Чулин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении бародеформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. №8. С. 82–90.
9. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Швец В.А., Чулин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Приборы и техника эксперимента. 2005. №6. С. 137–138.
10. Долгих Г.И., Плотников А.А., Швец В.А. Лазерный гидрофон // Приборы и техника эксперимента. 2007. №1. С. 159–160.
11. Долгих Г.И., Ярошук И.О., Пивоваров А.А., Пенкин С.И., Швырёв А.Н. Низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая система // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 5. С. 163–164.
12. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1976.