

## Интерферограмма звукового поля при наличии интенсивных внутренних волн на океаническом шельфе

С. А. Пересёлков<sup>1,\*</sup>, В. М. Кузькин<sup>2,†</sup>, М. Badiéy<sup>3,‡</sup>, И. В. Казначеев<sup>1,§</sup>, С. А. Ткаченко<sup>1,§</sup>

<sup>1</sup>Воронежский госуниверситет, Россия, 394006, Воронеж, Университетская пл., д. 1

<sup>2</sup>Институт общей физики РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

<sup>3</sup>Delaware University, Evans Hall #316, USA, 19716, Newark

(Статья поступила 10.11.2019; Подписана в печать 11.11.2019)

Приведены результаты обработки эксперимента SWARM-95, когда на стационарной трассе интенсивные внутренние волны приводили к взаимодействию мод акустического поля источника. Двукратным преобразованием Фурье интерферограммы на голограмме получены области локализации спектральной плотности, обусловленные невозмущенным и возмущенным полями.

PACS: 92.10.Vz

УДК: 534.44

Ключевые слова: гидроакустика, голография, интерференционная структура, звуковое поле, широкополосный источник шума, гидролокация.

### ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент SWARM-95 проводился на побережье штата Нью-Джерси [1, 2]. Две стационарные акустические трассы располагались под углами  $\beta_1 = 5^\circ$  (первая трасса) и  $\beta_2 = 39^\circ$  (вторая трасса) к фронту интенсивных внутренних волн (ИВВ), угол между направлениями трасс  $\alpha = 34^\circ$ . Вдоль первой трассы, протяженностью 14.98 км, глубина изменялась в пределах 71 – 73 м, вдоль второй трассы, протяженностью 17.95 км, – в границах 70 – 88 м. Амплитуда ИВВ достигала значений 10 – 15 м, скорость распространения 0.65 м/с, временной масштаб изменчивости 10 мин [3]. Пневмоисточник, размещенный на глубине 12 м, ежеминутно излучал импульсы длительностью 0.2 с [4]. Обработывался сигнал с одиночного гидрофона вертикальной линейной антенны, расположенного на глубине 36 м.

На первой трассе ИВВ приводили к горизонтальной рефракции звуковых волн, на второй трассе – взаимодействию мод поля источника. Горизонтальная рефракция и межмодовая трансформация представляют два предельных случая влияния ИВВ на акустические поля. С использованием интерферометрического метода локализации источника звука [5] (далее интерферометрический метод) результаты восстановления интерферограмм невозмущенного и возмущенного (рассеянного на неоднородностях показателя преломления) полей на первой трассе представлены в [4]. Под интерферограммой понимается квадрат модуля звукового давления в переменных частота-время, вызванного интерференцией нормальных волн поля источника, под голограммой – двукратное преобразование Фурье интерферограммы.

Настоящая статья, являющаяся продолжением работы [4], посвящена восстановлению интерферограмм невозмущенного и рассеянного полей на второй трассе. По полученным голограммам оценена скорость распространения ИВВ и реконструированы передаточная функция невозмущенного волновода и временная изменчивость среды.

### 1. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Вариации показателя преломления океанической среды, вызванные гидродинамическим возмущением, инициируют изменения горизонтальных волновых чисел (в широком смысле и амплитуд мод) по отношению к невозмущенным значениям. Это приводит к тому, что результирующая интерферограмма, определяемая разностью горизонтальных волновых чисел, будет представлять собой линейную суперпозицию двух независимых интерферограмм, порожденных невозмущенным и рассеянным полями. Двукратное преобразование Фурье интерферограммы, в силу линейности, формирует на голограмме две независимые локализованные области в форме фокальных пятен. Одна из них, обусловленная невозмущенным полем, концентрируется преимущественно в направлении оси времени, а вторая, вызванная гидродинамическим возмущением, – в направлении оси частоты. Фильтрация областей локализации дает возможность разделить голограммы этих полей. Применение к ним обратного двукратного преобразования Фурье позволяет реконструировать их интерферограммы. В первом случае интерферограмма формируется интерференцией мод невозмущенной среды, во втором случае – возмущенной среды. При известном спектре источника появляется возможность восстановления передаточной функции невозмущенного волновода и диагностирования временной изменчивости среды.

\*E-mail: pereselkov@yandex.ru

†E-mail: kumiov@yandex.ru

‡E-mail: badiéy@udel.edu

§E-mail:

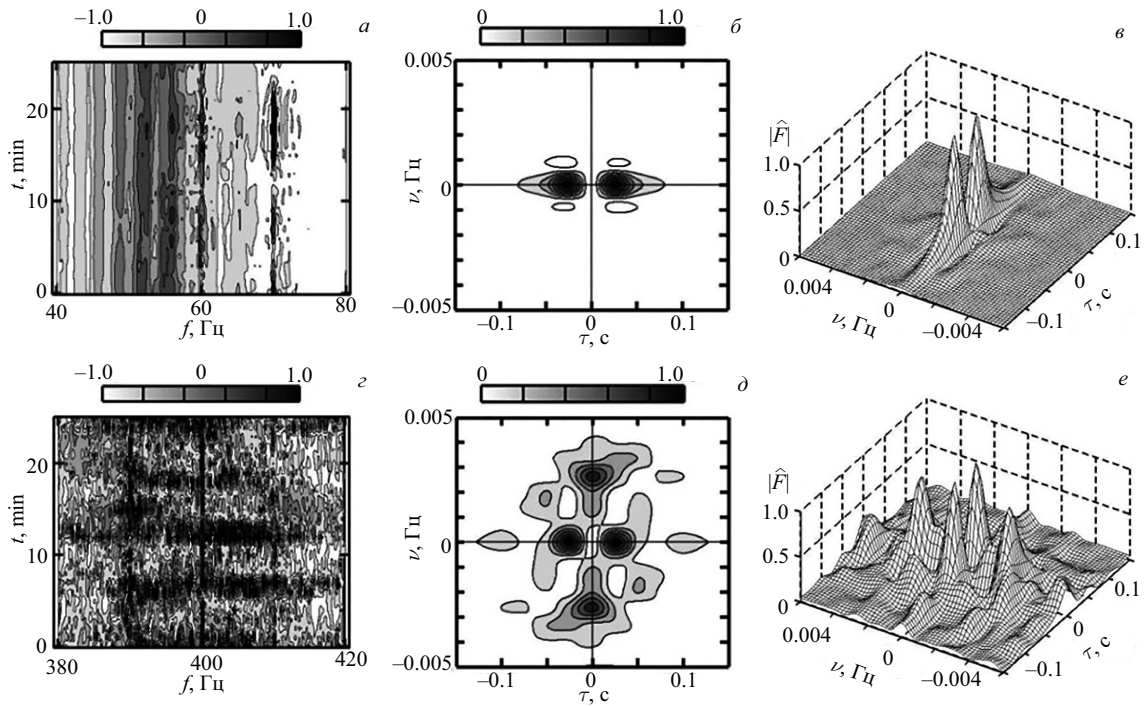


Рис. 1: Нормированные интерферограммы (а, з) и голограммы (б, в, д, е) для разных диапазонов частот в присутствии ИВВ. Ширина полосы: 40 – 80 Гц (а, б, в); 380 – 420 Гц (з, д, е)

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Сохранены глубина одиночного приемника и диапазоны частот, использованные при обработке данных на первой трассе [4], что при равных условиях приема позволяет оценить влияние расположения трассы по отношению к фронту ИВВ на работу голографического метода [5] при восстановлении интерферограмм невозмущенного и возмущенного полей.

Для нескольких диапазонов частот исходные интерферограммы и голограммы в присутствии ИВВ представлены на рис. 1. С целью повышения контрастности и информативности на интерферограммах вырезаны средние значения. Модуль нормированной голограммы в трехмерном изображении обозначен символом  $|\hat{F}|$ . На низких частотах, когда рассеяние на неоднородностях мало, в интерферограмме преобладают вертикальные локализованные полосы, присущие невозмущенному волноводу. С повышением частоты эффекты рассеяния возрастают, что усиливает вклад горизонтальных локализованных полос, и интерференционная картина усложняется (рис. 1 (а, з)). Фокальные пятна голограмм расположены преимущественно на осях времени и частоты (рис. 1 (б, в, д, е)). Вне их спектральная плотность значительно подавлена. Наложение фокальных пятен максимальной интенсивности практически отсутствует, что делает возможным восстановление передаточной функции и наблюдение временной изменчивости среды.

Фильтрация фокальных пятен, расположенных на оси частоты, и применение к ним обратного двукратного преобразования Фурье приведены на рис. 2. При этом практически не обрезаются спектральные плотности в направлении оси времени, поэтому восстановленные интерферограммы в форме горизонтальных локализованных полос можно считать обусловленными гидродинамическим возмущением. Возрастание частоты не приводит к изрезанности интерферограмм, т.е. усилению проявления мелкомасштабной структуры возмущения. По голограмме рассеянного поля оценим скорость  $w$  распространения ИВВ ([5]). Согласно [2], на частоте  $f_0 = 64$  Гц разности горизонтальных волновых чисел  $h_{mn} = h_m - h_n$  для соседних номеров мод равны:  $h_{12} = 0.00928 \text{ м}^{-1}$ ,  $h_{23} = 0.0144 \text{ м}^{-1}$ ,  $h_{34} = 0.0113 \text{ м}^{-1}$ ,  $h_{45} = 0.0158 \text{ м}^{-1}$ . Координата основного максимума голограммы (рис. 2 (а, б)):  $\nu_1 = 0.0015$  Гц. В результате получаем  $w = 0.74 \text{ м/с}$ , что близко к экспериментальной оценке  $0.65 \text{ м/с}$ .

Фильтрация спектральных плотностей голограмм, сконцентрированных вблизи оси времени, и их нормированный образ Фурье показаны на рис. 3. Интерферограммы имеют вид вертикальных локализованных полос, что позволяет их рассматривать как интерференцию мод невозмущенного поля. С возрастанием частоты увеличивается число мод звукового поля и наблюдается усиление мелкомасштабной изменчивости интерференционной картины.

По сравнению с первой трассой положение максимума функции  $g(f)$  [4] (рис. 4) практически не изменилось, как и следовало ожидать, максималь-

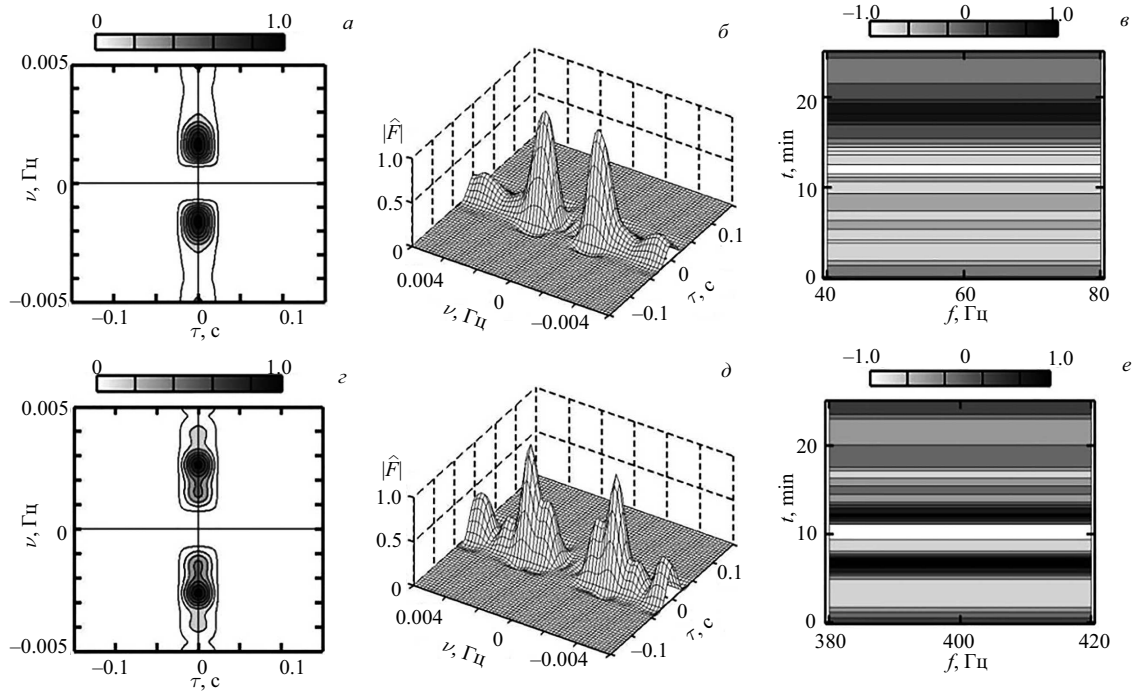


Рис. 2: Фильтрация спектральной плотности голограммы, локализованной в окрестности оси частоты (а, б, г, д), и восстановление интерферограмм (е, е) для разных диапазонов частот

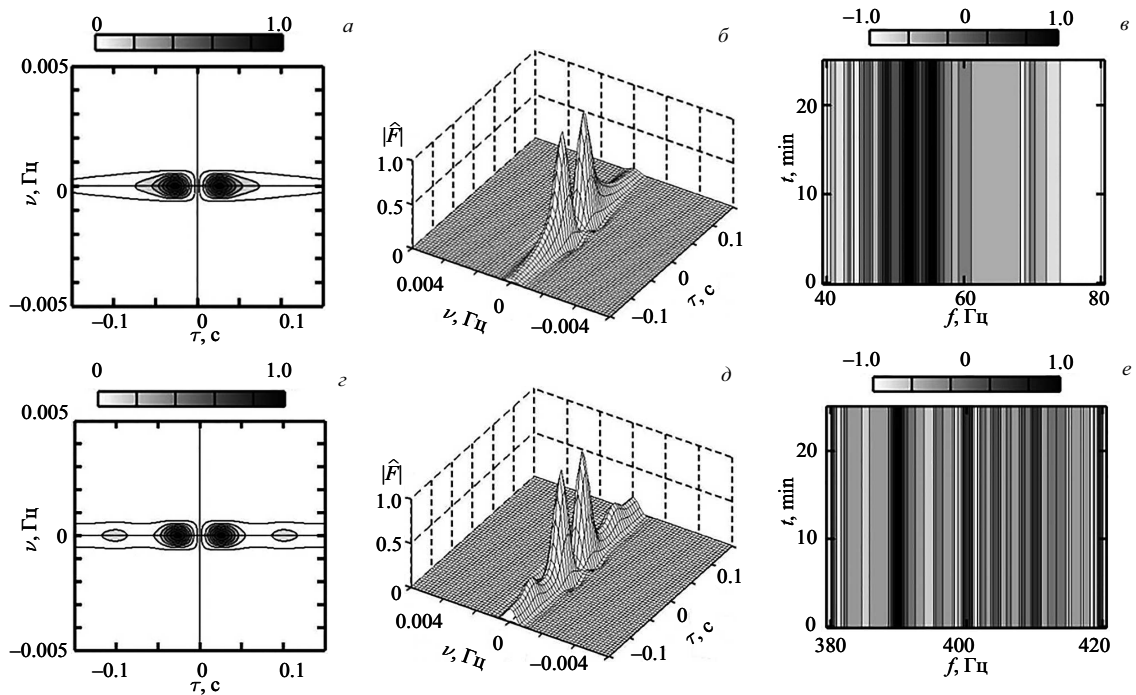


Рис. 3: Фильтрация спектральной плотности голограммы, локализованной в окрестности оси времени (а, б, г, д), и восстановление интерферограмм (е, е) для разных диапазонов частот

ное значение уменьшилось в 1.6 раз, а частотный масштаб изменчивости увеличился в 1.2 раза. Последнее объясняется геометрическим фактором: частотные масштабы  $\Lambda_{1,2}$  изменчивости  $g(f)$

на первой и второй трассах связаны соотношением  $\Lambda_1 = \Lambda_2 \cos \alpha$ . Принимая значение  $\Lambda_1 = 30 \text{ Гц}$  [4],  $\alpha = 34^\circ$ , получаем  $\Lambda_2/\Lambda_1 = 1.4$ , что согласуется с экспериментальной оценкой.

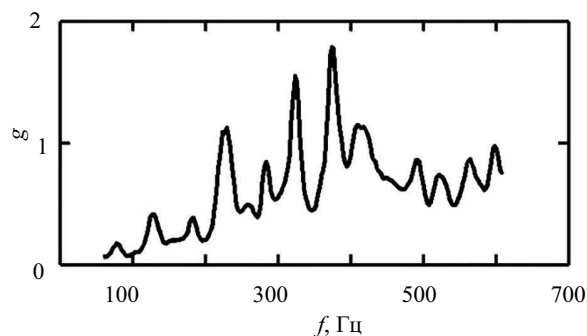


Рис. 4: Частотная зависимость отношения спектральных максимумов фокальных пятен, обусловленных ИВВ и в их отсутствие

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях взаимодействия мод акустического поля источника, вызванного проявлением ИВВ, на основе интерферометрического метода экспериментально продемонстрировано восстановление передаточной функции невозмущенного волновода и возможность наблюдения временной изменчивости среды. Метод основан на записи исходной фурье-голограммы, формируемой невозмущенным и рассеянным полями. Голограмма представляет собой отдельные локализованные области спектральных плотностей, отвечающих отсутствию и наличию возмущения. Считывание этих областей обратным двукратным преобразованием Фурье позволило получить интерферограммы невозмущенного и рассеянного полей. По записи голограммы рассеянного поля оценена скорость распростране-

ния возмущения. Описан алгоритм получения неискаженного модуля спектра источника при наличии неоднородностей среды.

Обобщая результаты, полученные на двух трассах, можно предположить, что они применимы по отношению и к другим типичным гидродинамическим возмущениям океанического шельфа. Например, фоновые внутренние волны, поверхностное волнение, приливные колебания и т.д. Таким образом, голографический метод позволяет по-новому осмыслить те направления в акустике океана, где играет определяющую роль интерференция волн, обусловленная широкополосными сигналами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 19-29-06075 и 19-08-00941). Работа Казначеева И. В. поддержана грантом Президента РФ (грант № МК-933.2019.8).

- [1] *Apel J.R., Badiay M., Chiu C.-S., Finette S., Headrick R.H., Kemp J., Lynch J.F., Newhall A.E., Orr M.H., Pasewark B.H., Tielburger D., Turgut A., von der Heydt K., Wolf S.N.* // IEEE J. Ocean. Eng. 1997. **22**. P. 465.  
 [2] *Frank S.D., Badiay M., Lynch J., Siegmann W.L.* // J. Acoust. Soc. Am. 2004. **116**, N. 6. P. 3404.  
 [3] *Badiay M., Katsnelson B.G., Lynch J.F., Pereselkov S.A., Siegmann W.L.* // J. Acoust. Soc. Am. 2005. **117**, N. 2.

- P. 613.  
 [4] *Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Zoyagin V.G., Malykhin A.Yu., Prosovetskiy D.Yu.* // Phys. Wave Phenom. 2018. **26**, N. 2. P. 160.  
 [5] *Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Пересёлков С.А.* // Акуст. журн. 2017. **63**, №4. С. 406.

## Interferogram of a sound field at presence of intense internal waves on the ocean shelf

S. A. Pereselkov<sup>1,a</sup>, V. M. Kuz'kin<sup>2,b</sup>, M. Badiay<sup>3,c</sup>, I. V. Kaznacheev<sup>1</sup>, S. A. Tkachenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University, Voronezh 394006, Russia

<sup>2</sup>General Physics Institute RAS, Moscow 119991, Russia

<sup>3</sup>Delaware University, Newark DE 19716, USA

E-mail: <sup>a</sup>pereselkov@yandex.ru, <sup>b</sup>kumiov@yandex.ru, <sup>c</sup>badiay@udel.edu

The results of processing of the SWARM-95 experiment are presented. The case when intensive internal waves cause the modes coupling on a stationary acoustic track is considered. The two types of hologram regions of localization of the spectral density are obtained by using of 2D Fourier transformation of interferogram. One of them is relating to sound field in unperturbed waveguide. Other one is relating to perturbation of sound field by internal waves.

PACS: 92.10.Vz

Keywords: hydroacoustics, holography, interference structure, sound field, broadband noise source, sonar.

Received 11 November 2019.

**Сведения об авторах**

1. Переселков Сергей Алексеевич — доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой математической физики и информационных технологий; тел.: (950) 770-86-79, e-mail: pereselkov@yandex.ru
  2. Кузькин Венедикт Михайлович, доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник Института общей физики РАН; тел.: (499) 503-83-84, e-mail: kumiov@yandex.ru.
  3. Mohsen Badiey, доктор физ.-мат. наук, профессор Университета штата Делавер; тел.: (302) 831-3687, e-mail: badiey@udel.edu.
  4. Казначеев Илья Викторович, аспирант; тел.: (950) 770-86-79, e-mail: kaznacheev.ilya@gmail.com.
  5. Ткаченко Сергей Александрович, аспирант; тел.: (950) 770-86-79, e-mail: sega-tk@mail.ru.
-