ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ЧЕРЕЗ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНУЮ ОКЕАНИЧЕСКУЮ СРЕДУ

В. М. Кузькин¹, С. А. Пересёлков^{1,2}, Г. Н. Кузнецов¹, А. Ю. Малыхин², С. А. Ткаченко²

¹ — Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН;
 ² — Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 11.12.2018 г.

Аннотация. Приведены результаты голографической обработки эксперимента на двух стационарных трассах, когда интенсивные внутренние волны приводили к горизонтальной рефракции и взаимодействию мод акустического поля источника. Двукратным преобразованием Фурье интерферограмм на голограммах получены раздельные области локализации спектральных плотностей в форме фокальных пятен, обусловленные невозмущенным и возмущенным полями. Фильтруя эти области, и применяя к ним обратные двукратные преобразования Фурье, реконструированы интерферограммы этих полей, что позволило восстановить передаточную функцию невозмущенного волновода и временную изменчивость океанической среды на двух трассах. Изложен алгоритм передачи неискаженного модуля спектра источника на фоне неоднородностей океанической среды.

Ключевые слова: интерферограмма, голограмма, преобразование Фурье, интенсивные внутренние волны, горизонтальная рефракция, взаимодействие мод, передаточная функция.

THE USING OF HOLOGRAPHY TO TRANSMIT THE SOURCE IMAGE THROUGH A RANDOMLY INHOMOGENEOUS OCEANIC ENVIRONMENT

V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, G. N. Kuznetsov, I. V. Kaznacheev, S. A. Tkachenko

Abstract. The results of holographic processing of the experiment on two stationary tracks when intensive internal waves led to horizontal rays refraction and sound field modes coupling are presented. By using of 2D Fourier transform of interferograms to holograms obtained separate areas of spectral densities localization in focal spots, corresponding to unperturbed sound field and perturbation of propagation environment. By filtering these areas and applying of inverse 2D Fourier transforms, the interferograms of these fields are reconstructed. So, the offered method allows reconstruct the transfer function of the unperturbed waveguide and the temporal variability of the oceanic environment on two acoustic tracks. The algorithm of transmission of module of the unperturbed source spectrum at presence of the inhomogeneities in the oceanic environment is presented in the paper.

Keywords: interferogram, hologram, Fourier transformation, intensive internal waves, horizontal refraction, mode coupling, transfer function.

введение

Исследованиям в интерферометрии гидроакустики положили работы [1, 2], в которых теоретически и экспериментально выявлен механизм образования интерференционной картины

[©] Кузькин В. М., Пересёлков С. А., Кузнецов Г. Н., Малыхин А. Ю., Ткаченко С. А., 2019

(интерферограммы) в координатах расстояние (время)-частота, формируемой широкополосным источником. Интерференционное поле, образующее интерферограмму, обусловлено волноводной дисперсией, т. е. частотной зависимостью горизонтальных волновых чисел мод, и многомодовым характером распространения.

Дальнейшие успехи в интерферометрии широкополосного источника, связаны с использованием голограмм — двукратного преобразования Фурье интерферограмм [3–7]. В этих работах с применением одиночных векторно-скалярных приемников впервые установлены условия применимости голографического метода локализации источника (далее голографический метод), выработан критерий обнаружения, получены оценки координат (пеленга, удаленности, радиальной скорости, глубины), проанализирована помехоустойчивость, изложен алгоритм разрешения нескольких шумовых источников и оценена устойчивость по отношению к вариациям гидрофизических условий распространения. Метод успешно апробирован в вычислительных и натурных экспериментах. Надо отметить, что предложения о применении голографической обработки гидроакустических сигналов высказывались и ранее [8, 9], однако извлечение информации из голограмм об источнике, которая содержится в зашифрованном виде, и использование ее для решения обратных задач впервые было реализовано в работах [3–7]. Если физико-математические принципы, лежащие в основе голографического метода, ясны и подкреплены экспериментальными данными [3–7], то открытым остается вопрос о влиянии нестационарности среды на его работоспособность.

В настоящей работе, опираясь на результаты обработки экспериментальных данных, рассмотрены возможности применения голографического метода для реконструирования невозмущенной передаточной функции волнового канала в присутствии интенсивных внутренних волн (ИВВ) и временной диагностики неоднородностей.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент SWARM-95 проводился на побережье штата Нью-Джерси [10]. Две стационарные акустические трассы располагались под углами $\beta_1 = 5^{\circ}$ (первая трасса) и $\beta_2 = 39^{\circ}$ (вторая трасса) к фронту ИВВ, угол между направлениями трасс $\alpha = 34^{\circ}$ (рис. 1) [11]. Распределение скорости звука по глубине приведено на рис. 2 [12].





Рис. 1. Схема эксперимента. VLA 1 и VLA 2 — вертикальные линейные антенны первой и второй трасс [11].

Рис. 2. Невозмущенный профиль скорости звука [12].



Рис. 3. Нормированный сигнал пневмоисточника: (а) временной импульс; (б) спектр [12].

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. Ширина волнового фронта превышала длину трасс. Амплитуда ИВВ достигала значений ≈ 10 м, скорость распространения ≈ 0.65 м/с, характерный временной масштаб изменчивости ≈ 10 мин. Принимался сигнал пневмоисточника, размещенного на глубине 12 м, который ежеминутно излучал импульсы длительностью ≈ 0.2 с, форма и спектр которых приведены на рис. 3. Обрабатывалась информация с одиночных гидрофонов вертикальных линейных антенн, расположенных на глубине 36 м.

На первой трассе ИВВ приводили к горизонтальной рефракции звуковых волн, на второй трассе — взаимодействию нормальных волн поля источника. Горизонтальная рефракция и межмодовая трансформация представляют собой два предельных случая влияния ИВВ на акустические поля, что позволяет оценить влияние расположения трассы по отношению к фронту ИВВ на работу голографического метода восстановления интерферограмм невозмущенного и возмущенного полей. Под интерферограммой понимается квадрат модуля звукового давления в переменных частота-время, образованного интерференцией нормальных волн поля источника.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА

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. Поэтому двукратное преобразование Фурье интерферограммы, в силу линейности, формирует на голограмме две независимые локализованные спектральные 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 спектральных плотностей дает возможность получения раздельных голограмм невозмущенного и рассеянного полей. Применение к ним обратного двукратного преобразования Фурье позволяет реконструировать их интерферограммы. В первом случае интерферограмма формируется интерференцией мод невозмущенной среды, во-втором случае — гидродинамической изменчивостью среды. Такая обработка гидроакустической информации дает возможность восстановления передаточной функции невозмущенного волновода

и диагностирования временной изменчивости среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Для двух диапазонов частот интерферограммы и голограммы в присутствии ИВВ приведены на рис. 4, 5. С целью повышения контрастности и информативности на интерферограммах вырезаны средние значения. Модуль нормированной голограммы в трехмерном изображении обозначен символом |F|. На низких частотах, когда рассеяние на неоднородностях мало, в интерферограммах преобладают вертикальные локализованные полосы (рис. 4a, 5a), свойственные невозмущенному волноводу. С повышением частоты эффекты рассеяния возрастают, что усиливает вклад горизонтальных локализованных полос, и интерференционная картина усложняется (рис. 4г, 5г). Фокальные пятна сконцентрированы на осях времени и частоты (рис. 4 (б, в), рис. 5 (б, в)). Вне этих пятен спектральная плотность значительно подавлена. Наложение фокальных пятен максимальной интенсивности практически отсутствует, что делает возможным восстановление невозмущенной передаточной функции и наблюдение временной изменчивости среды. Качественная картина формирования интерферограмм и голограмм не зависит от расположения трассы по отношению к фронту ИВВ. Наиболее ярко это положение иллюстрируют рис. 6, 7 и рис. 8, 9. Таким образом, голографический метод обработки гидроакустической информации открывает совершенно исключительные возможности получения неискаженной передаточной функции при наличии неоднородностей океанической среды, ранее недоступные другим методам обработки.

Фильтрация фокальных пятен, расположенных на оси частоты, и применение к ним обратного двукратного преобразования Фурье представлены на рис. 6, 7. Важно, что практически не обрезаются спектральные плотности в направлении оси времени, поэтому восстановленные интерферограммы в форме горизонтальных локализованных полос можно считать обусловленными гидродинамическим возмущением. На обеих трассах увеличение частотыМ не приводит к изрезанности интерферограмм, т.е. к усилению проявления мелкомасштабной структуры возмущения. На низких частотах конфигурации фокальных пятен близки (рис. 6а, 7а), с увеличением частоты различие между ними возрастает (рис. 6г, 7г). Это явление обусловлено анизотропией рассеяния акустических волн на высоких частотах.

Фильтрация спектральных плотностей голограмм, сосредоточенных вблизи оси времени, и их нормированный образ Фурье показаны на рис. 8, 9. Интерферограммы имеют вид вертикальных локализованных полос, что позволяет их рассматривать как результат интерференции мод невозмущенного поля. С возрастанием частоты, как и следовало ожидать [13], усиливается мелкомасштабная изменчивость интерференционной картины. Форма фокальных пятен различна (рис. 8a, 9a, рис. 8г, 9г), однако положение их максимумов близки. Данная особенность объясняется разными условиями (протяженность трассы, глубина) распространения акустических волн вдоль стационарных трасс.

На рис. 10 приведены нормированные временные интерферограммы на частотах 60 (a) и 400 (б) Гц, представляющие собой вертикальные разрезы восстановленных двумерных интерферограмм, вызванных ИВВ (рис. 6 (в, е), рис. 7 (в, е)). Асинхронность временной изменчивости на разных частотах связана с зависимостью возмущения горизонтальных волновых чисел от их невозмущенных значений, что обусловливает частотную зависимость.

Квадрат модуля передаточной функции волновода $|G(f)|^2$ равен

$$|G(f)|^2 = \frac{I(f)}{|S(f)|^2},\tag{1}$$

где S(f) — спектр излучаемого сигнала, I(f) — горизонтальное сечение реконструированной интерферограммы невозмущенного волновода (рис. 8 (в, е), рис. 9 (в, е)). На рис. 11 приведены зависимости (1) от частоты. С возрастанием частоты, как отмечалось выше, уменьшается



Рис. 4. Нормированные интерферограммы (a, г) и голограммы (б, в, д, е) для диапазонов частот 40-80 Гц (a-в) и 380-420 Гц (г-е) в присутствии ИВВ. Первая трасса.



Рис. 5. Нормированные интерферограммы (a, г) и голограммы (б, в, д, е) для диапазонов частот 40-80 Гц (a-в) и 380-420 Гц (г-е) в присутствии ИВВ. Вторая трасса.



Рис. 6. Фильтрация спектральных плотностей голограмм, локализованных в окрестности оси частоты (a, б, г, д), и восстановление интерферограмм (в, е). Первая трасса



Рис. 7. Фильтрация спектральных плотностей голограмм, локализованных в окрестности оси времени (a, б, г, д), и восстановление интерферограмм (в, е). Вторая трасса.



Рис. 8. Фильтрация спектральных плотностей голограмм, локализованных в окрестности оси времени (a, б, г, д), и восстановление интерферограмм (в, е). Первая трасса.



Рис. 9. Фильтрация спектральных плотностей голограмм, локализованных в окрестности оси времени (a, б, г, д), и восстановление интерферограмм (в, е). Вторая трасса.

частотный масштаб χ осцилляций передаточной функции волновода. В области частот 40-80 Гц: на первой трассе $\chi = 2.2$ Гц (рис. 11а), на второй трассе $\chi = 3.2$ Гц (рис. 11б). В диапазоне частот 380-420 Гц: на первой трассе $\chi = 1.8$ Гц (рис. 11в), на второй трассе $\chi = 1.9$ Гц (рис. 11г). Изменение частоты приводит к перераспределению спектральных плотностей голограмм (рис. 4, 5). Данный механизм будем описывать отношением

$$g(f) = \frac{|F_{\max}(v, f)|}{|F_{\max}(\tau, f)|}.$$
(2)

где $|F_{\max}(v, f)|$ и $|F_{\max}(\tau, f)|$ — максимумы фокальных пятен голограммы, отвечающие рассеянному и невозмущенному полям. Графики функции (2) с разрешением 5 Гц представлены на рис. 12. Зависимости имеют резонансный характер с максимумом огибающей на частоте ≈ 370 Гц. Это связано с тем, что возмущение горизонтальных волновых чисел зависит от частоты резонансным образом, а их максимумы приходятся на частоту, в окрестности которой моды, формирующие поле, имеют с термоклином максимальное пересечение [12]. Термоклин располагался на глубине 10 < z < 35 м (рис. 2).

По сравнению с первой трассой максимальное значение g(f) на второй трассе уменьшилось в 1.6 раза. Следовательно, горизонтальная рефракция мод, по сравнению с их взаимодействием, вызывает более сильное перераспределение спектральных плотностей голограмм в область возмущенного поля. Характерный частотный масштаб изменчивости g(f): на первой трассе $\Lambda_1 \approx 30$ Гц, на второй трассе $\Lambda_2 \approx 42$ Гц. Их отношение $\gamma = \Lambda_1/\Lambda_2 = 0.7$. Различие масштабов обусловлено геометрическим фактором, так как они связаны соотношением $\Lambda_1 = \Lambda_2 \cos \alpha$. Принимая $\alpha = 34^\circ$, получаем $\gamma = 0.83$, что всего лишь в 1.2 раза превышает экспериментальную оценку.

ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОКЕАНИЧЕСКУЮ СРЕДУ

Неоднородности океанической среды приводят к искажениям передаваемого спектра сигнала источника. Избежать этих искажений для передачи модуля спектра позволяет голографический метод локализации источника [5, 6]. Модуль спектра источника для краткости назовем изображением. Предположим, что при наличии неоднородностей на одну голограмму записана интерферограмма опорного изображения $S_1(f)$, а на вторую голограмму — восстанавливаемого изображения |S(f)|. При считывании с голограмм этих изображений получаем интерферограммы $I_1(f)$ и I(f) опорного и восстанавливаемого изображений. Тогда, согласно (1), для восстанавливаемого изображения получаем

$$|S(f)| = |S_1(f)| \frac{\sqrt{I(f)}}{\sqrt{I_1(f)}}.$$
(3)

Таким образом, наличие неоднородностей среды никак не влияет на получение неискаженного восстанавливаемого изображения. Опорное изображение необходимо для получения модуля передаточной функции невозмущенной среды. Эта методика, несомненно, может найти широкое применение в тех случаях, когда не требуется фаза спектра сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях горизонтальной рефракции и взаимодействия мод акустического поля источника, вызванного проявлением ИВВ, голографическим методом экспериментально продемонстрировано восстановление передаточной функции невозмущенного волновода и возможность наблюдения временной изменчивости среды. Метод основан на записи исходных фурье-голограмм, формируемых невозмущенным и рассеянным полями. Голограммы представляют собой раздельные локализованные области спектральных плотностей, отвечающие отсутствию и наличию возмущения.



Рис. 10. Разрез восстановленных интерферограмм рассеянного поля. Первая трасса 60 Гц (а), 400 Гц (б). Вторая трасса 60 Гц (в), 400 Гц (г).



Рис. 11. Восстановленная частотная зависимость квадрата модуля передаточной функции невозмущенного волновода для двух диапазонов частот. Первая трасса (a),(б). Вторая трасса (b), (г).



Рис. 12. Частотная зависимость отношения спектральных максимумов фокальных пятен, обусловленных ИВВ и в их отсутствие: (a) первая трасса; (б) вторая трасса.

Считывание этих областей обратным двукратным преобразованием Фурье позволяет получить интерферограммы невозмущенного и рассеянного полей. 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 гидродинамическим возмущениям океанического шельфа, таким как фоновые внутренние волны, поверхностное волнение, приливные колебания. Таким образом, метод голографической обработки гидроакустической информации позволяет по-новому осмыслить те направления в акустике океана, где играет роль интерференция волн, обусловленная широкополосным сигналом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 19-08-00941).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чупров, С. Д. Интерференционная структура звукового поля в слоистом океане / Акустика океана. Современное состояние / С. Д. Чупров. — М. : Наука, 1982. — С. 71–82.

2. Орлов Е.Ф. Интерференционная структура широкополосного звука в океане / Проблемы акустики океана / Е. Ф. Орлов. — М. : Наука, 1984. — С. 85–92.

3. Noise source localization shallow water / G. N. Kuznetsov, V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, I. V. Kaznacheev // Phys. Wave Phenom. −2017. −V. 25, № 2. −P. 156–163.

4. Interferometric method for estimating the velocity of a noise sound source and the distance to it in shallow water using a vector-scalar receiver / G. N. Kuznetsov et. al. // Phys. Wave Phenom. -2017. - V. 25, $N^{\circ} 4. - P. 299-306$.

5. Кузнецов, Г. Н. Спектрограмма и локализация источника звука в мелком море / Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2017. — Т. 63, № 4. — С. 406–418.

6. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторноскалярным приемником / И. В. Казначеев, Г. Н. Кузнецов, В. М. Кузькин, С. А. Пересёлков // Акуст. журн. — 2018. — Т. 64, № 1. — С. 33–45.

7. Interferometric direction finding by a vector-scalar receiver / V. M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, G. N. Kuznetsov, I. V. Kaznacheev // Phys. Wave Phenom. −2018. − V. 26, № 1. − P. 63–73.

8. Ocean acoustic interference phenomena and signal processing (San Francisco, CA, May 1–3, 2001; AIP Conf. Proc.), Ed. by Kuperman W.A. and D'Spain G.L. N.Y.: Melville, 2002.

9. Орлов, Е. Ф. Интерференция звуковых волн в океане / Е. Ф. Орлов, Г. А. Шаронов. — Владивосток : Дальнаука, 1998. — 195 с.

10. An overview of the SWARM 1995 shallow-water internal wave acoustic scattering experiment / J. R. Apel et. al. // IEEE J. Ocean. Eng. - 1977. - V. 22. - P. 465–500.

11. Analysis and modeling of broadband airgum data influenced by nonlinear internal waves / S. D. Frank, M. Badiey, J. Lynch, W. L. Siegmann // J. Acoust. Soc. Am. -2004. - V. 116, Nº 6. - P. 3404–3422.

12. Measurement and modeling of three-dimensional sound intensity variations due to shallow-water internal waves / M. Badiey et. al. // J. Acoust. Soc. Am. -2005. -V. 117, N = 2. -P. 613–625.

13. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 264 с.

REFERENCES

1. Chuprov S.D. Interference Structure of Sound in a Layered Ocean. Ocean Acoustics. Current State. [Chuprov S.D. Interferencionnaya struktura zvukovogo polya v sloistom okeane. Akustika okeana. Sovremennoe sostoyanie]. Moscow: Nauka, 1982, pp. 71–82.

2. Orlov E.F. Interference structure of broadband sound in ocean. Problems in ocean acoustics. [Orlov E.F. Interferencionnaya struktura shirokopolosnogo zvuka v okeane. Problemy akustiki okeana]. Moscow: Nauka, 1984, pp. 85–92.

3. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V. Noise Source Localization Shallow Water. Phys. Wave Phenom, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 156–163.

4. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kaznacheev I.V., Grigor'ev V.A. Interferometric Method for Estimating the Velocity of a Noise Sound Source and the Distance to it in Shallow Water Using a Vector-Scalar Receiver. Phys. Wave Phenom, 2017, vol. 25, no. 4, pp. 299–306.

5. Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. Spectrogram and Localization of a Sound Source in Shallow Water. [Kuznecov G.N., Kuz'kin V.M., Peresyolkov S.A. Spektrogramma i lokalizaciya istochnika zvuka v melkom more]. Akusticheskij zhurnal — Acoustical Physics, 2017, vol. 63, no. 4, pp. 406–418.

6. Kaznacheev I.V., Kuznetsov G.N., Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A. An Interferometric Method for Detecting a Moving Sound Source with a Vector-Scalar Receiver. [Kaznacheev I.V., Kuznecov G.N., Kuz'kin V.M., Peresyolkov S.A. Interferometricheskiyj metod obnaruzheniya dvizhushhegosya istochnika zvuka vektorno-skalyarnym priemnikom]. *Akusticheskij zhurnal – Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 33–45.

7. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Kuznetsov G.N., Kaznacheev I.V. Interferometric direction finding by a vector-scalar receiver. Phys. Wave Phenom. 2018, vol. 26, no. 1, pp. 63–73.

8. Ocean acoustic interference phenomena and signal processing (San Francisco, CA, May 1–3, 2001; AIP Conf. Proc.), Ed. by Kuperman W.A. and D'Spain G.L. N.Y.: Melville, 2002.

9. Orlov E. F., Sharonov G. A. Interference of the sound waves in the ocean. [Orlov E.F., Sharonov G.A. Interferenciya zvukovyx voln v okeane]. Vladivostok: Dalnauka, 1998, 195 p.

10. Apel J.R., Badiey 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. An overview of the SWARM 1995 shallow-water internal wave acoustic scattering experiment. IEEE J. Ocean. Eng., 1977, vol. 22, pp. 465–500.

11. Frank S.D., Badiey M., Lynch J., Siegmann W.L. Analysis and modeling of broadband airgum data influenced by nonlinear internal waves // J. Acoust. Soc. Am., 2004, vol. 116, no. 6, pp. 3404–3422.

12. Badiey M., Katsnelson B.G., Lynch J.F., Pereselkov S.A., Siegmann W.L. Measurement and modeling of three-dimensional sound intensity variations due to shallow-water internal waves. J. Acoust. Soc. Am., 2005, vol. 117, no. 2, pp. 613–625.

13. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Fundamentals of ocean acoustics. [Brexovskix L.M., Lysanov Yu.P. Teoreticheskie osnovy akustiki okeana]. Leningrad, 1982, 264 p.

Кузькин Венедикт Михайлович, доктор	Kuz'kin Venedikt Mikhailovich, Chief
физмат. наук, главный научный сотруд-	researcher, Wave Research Center, GPI
ник, НЦВИ ИОФ РАН, Москва, Россия	RAS, Moscow, Russia
E-mail: kumiov@yandex.ru	E-mail: kumiov@yandex.ru
Тел.: +7(499)503-83-84	Tel.: + 7(499)503 - 83 - 84
Пересёлков Сергей Алексеевич, доктор физмат. наук, заведующий кафедрой математической физики ВГУ, Воронеж, Россия E-mail: pereselkov@yandex.ru Teл.: +7(473)220-87-48	Pereselkov Sergey Alexeevich, Head of the Department of Mathematical Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia E-mail: pereselkov@yandex.ru Tel.: $+7(473)220-87-48$

Кузнецов Геннадий Николаевич, доктор физ.-мат. наук, руководитель отдела "Морские технологии", НЦВИ ИОФ РАН, Москва, Россия E-mail: skbmortex@mail.ru Teл.: +7(499)256-17-90

Ткаченко Сергей Александрович, аспирант кафедры математической физики ВГУ, Воронеж, Россия E-mail: sega-tk@mail.ru Teл.: +7(473)220-87-48

Малыхин Андрей Юрьевич, кандидат физ.мат. наук, научный сотрудник ВГУ, Воронеж, Россия E-mail: mal_and@inbox.ru Teл.: +7(473)220-87-48 Kuznetsov Gennady Nikolaevich, Head of "Marine technologies" Department, Wave Research Center, GPI RAS, Moscow, Russia E-mail: skbmortex@mail.ru Tel.: +7(499)256-17-90

TkachenkoSergeyAlexanderovich,PostgraduateStudent of the DepartmentofMathematicalPhysics,Voronezh, RussiaE-mail: sega-tk@mail.ruTel.: +7(473)220-87-48

Malykhin Andrey Yurievich, Researcher, Voronezh State University, Voronezh, Russia E-mail: mal_and@inbox.ru Tel.: +7(473)220-87-48