



## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Г.И. Долгих, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.,  
dolgikh@poi.dvo.ru,  
С.С. Будрин, С.Г. Долгих, к.ф.-м.н.,  
В.А. Чупин, к.ф.-м.н.,  
С.В. Яковенко, к.т.н.,  
Тихоокеанский океанологический институт  
им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

Технологии освоения арктических ресурсов нуждаются в результатах фундаментальных исследований структуры и состава морской земной коры как шельфовых, так и глубоководных покрытых льдом арктических акваторий. В статье рассмотрены особенности применения мобильного лазерного деформографа поверхностного типа для решения подобных задач. Приведены результаты эксперимента по определению скоростных характеристик волн, генерируемых низкочастотным гидроакустическим излучателем, создающим в воде гармонические и сложные фазоманипулированные сигналы.

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с необходимостью освоения Арктики перед учеными стоят задачи различного направления по выполнению ряда фундаментальных исследований с дальнейшим выходом полученных результатов в прикладную область с разработкой технологий и методик освоения арктических ресурсов. Одной из злободневных задач является задача по изучению структуры и состава морской земной коры как шельфовых, так и глубоководных покрытых льдом арктических акваторий. В настоящее время для этих целей в большей степени подходят активные и пассивные акустические методы [1-7]. Активные акустические методы ориентированы на применение низкочастотных гидроакустических излучателей, способных генерировать в воде сигналы различной сложности. В отличие от использования пневмопушек, взрывных источников и стримеров, применение гидроакустических излучателей является наи-

## FEATURES OF APPLICATION OF MOBILE LASER STRAINMETER IN WINTER CONDITIONS

G.I. Dolgikh, *Corr. member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, dolgikh@poi.dvo.ru,*  
S.S. Budrin, S.G. Dolgikh, *Candidate of Physical and Mathematical Sciences,*  
V.A. Chupin, *Candidate of Physical and Mathematical Sciences,*  
S.V. Yakovenko, *Candidate of Technical Sciences,*  
V.I. Ilyichev *Pacific Oceanological Institute, FEB of RAS, Vladivostok*

The technologies for the exploration of Arctic resources require the results of fundamental studies of the structure and composition of the sea crust of both shelf and deep-water ice-covered Arctic waters. This article deals with the features of using a surface-type mobile laser strainmeter for solving similar problems. The results of an experiment for determining the speed characteristics of waves generated by a low-frequency hydroacoustic radiator that creates harmonic and complex phase-shift keyed signals in water are described.

### INTRODUCTION

In connection with the need for the exploration of the Arctic, the scientists are faced with the tasks of various directions in the implementation of a number of fundamental studies with further output of the results obtained in the applied field with the development of technologies and techniques for the exploration of Arctic resources. One of the topical tasks is the task of studying the structure and composition of the sea crust of both shelf and deep-water ice-covered Arctic areas. Nowadays, active and passive acoustic methods are more suitable for these purposes [1-7]. Active acoustic methods are focused on the use of low-frequency hydroacoustic radiators, capable of generating signals of varying complexity in water. Unlike the use of air guns, explosive sources and streamers, the use of hydroacoustic radiators is the most environmentally friendly for the environment and biota. Nowadays, the receiving systems in one of the main technologies for studying the structure and composition of the sea crust for the purpose of searching for minerals are arranged in the form of sensors distributed under the sea. Such arrangement of receiving systems is a

более экологически безопасным для окружающей среды и биоты. В настоящее время в одной из главных технологий по изучению структуры и состава морской земной коры с целью поиска полезных ископаемых приемные системы располагаются в виде распределенных по дну датчиков. Такое расположение приемных систем является сложной задачей для покрытых льдом акваторий, особенно без его предварительного разрушения. Для преодоления данного затруднения возможно расположение приемных систем во льду [6] или на берегу [2-4].

В работах [2-4] в качестве приемных систем используются стационарные лазерные деформографы, расположенные на берегу м. Шульца Японского моря. Лазерные деформографы созданы по схеме интерферометра Майкельсона с использованием в качестве источника излучения частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров. Рабочие плечи лазерных деформографов имеют длины 52,5 и 17,5 м [8, 9]. В совокупности они составляют двухкоординатный лазерный деформограф [9], который можно использовать для пеленгования различных источников естественного и искусственного происхождения [10].

Стационарные лазерные деформографы невозможно использовать для решения инверсионных задач многих акваторий. Для решения различных задач не требующих высокого метрологического обеспечения был создан мобильный лазерный деформограф [11], длина рабочего плеча которого варьируется в зависимости от поставленных задач. В качестве источника излучения в мобильном лазерном деформографе используется частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер фирмы Melles Griot, имеющий долговременную стабильность в девятом знаке. В данной статье рассмотрены особенности применения мобильного лазерного деформографа в зимних условиях для решения задач по изучению структуры и состава морской земной коры.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Перед началом эксперимента на берегу Амурского залива Японского моря в точке с координатами 43°11,754' СШ и 131°55,141' ВД был установлен мобильный лазерный деформограф, см. рис.1. В термостабилизированном помещении 1, в котором поддерживалась температура с точностью 0,5 град, располагалась основная часть интерферометра Майкельсона. Она состояла из: 1) лазера; 2) коллиматора; 3) делительной пластины ПИ-100;



**Рис.1.** Береговой пункт наблюдения: 1 – помещение основного интерференционного узла мобильного лазерного деформографа; 2 – бокс отражателя; 3 – лучевод; 4 – лабораторное помещение

**Fig. 1.** Coastal observation point: 1 – location of the main interference assembly of the mobile laser strainmeter; 2 – reflector box; 3 – ray guide; 4 – laboratory room

complex task for ice-covered water areas, especially without its pre-destruction. To overcome this difficulty, the receiving systems can be located in ice [6] or on the shore [2-4].

In papers [2-4], stationary laser strainmeters located on the shore of the Schulz Cape in the Sea of Japan are used as receiving systems. Laser strainmeters are created according to the Michelson interferometer scheme using frequency-stabilized helium-neon lasers as a radiation source. The actuating arms of laser strainmeters have lengths of 52.5 and 17.5 m [8, 9]. Together they make up a two-coordinate laser strainmeter [9], which can be used for direction finding of various sources of natural and artificial origin [10].

Stationary laser strainmeters cannot be used to solve the inversion problems of many water areas. To solve various problems that do not require high metrological support, a mobile laser strainmeter was created [11], where the length of the actuating arm varies depending on the tasks assigned. A frequency-stabilized helium-neon laser by Melles Griot is used as a source of radiation in a mobile laser strainmeter which has a long-term stability to the nine decimal places. This article deals with the features of using a mobile laser strainmeter in winter conditions for solving problems on studying the structure and composition of the sea crust.

## DESCRIPTION OF THE EXPERIMENT AND THE RECEIVED RESULTS

Before the beginning of the experiment, a mobile laser strainmeter was installed on the shore of the Amur Bay of the Sea of Japan with the coordinates of 43°11.754' north latitude and 131°55.141' east longitude, see Fig. 1. In the heat-stabilized room 1, where the temperature was maintained with an accuracy of 0.5 deg, the bulk of the



4) двух плоскопараллельных зеркал, закрепленных на пьезокерамических цилиндрах раскочки и системы сброса уровней; 5) системы экстремального регулирования, предназначенной для управления работой интерферометра. Угловой отражатель размещался в термоизолированном боксе 2. Между точками 1 и 2 луч лазера распространялся в пен пропиленовых трубах (3). Компьютер с аналого-цифровым преобразователем размещался в отапливаемом помещении 4, в котором также находился оператор. Вся аппаратура запитывалась от переносного генератора, обеспечивающего на выходе стабильное переменное напряжение величиной 220 В. Цифровая система регистрации лазерного деформографа регистрировала изменение расстояния между основным узлом интерферометра (точка 1) и угловым отражателем (точка 2) с точностью 0,3 нм. При длине измерительного плеча, равной 6 м, предельная чувствительность мобильного лазерного деформографа составляла величину

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,3 \text{ нм}}{6 \text{ м}} = 5 \cdot 10^{-11}.$$

На расстоянии 3150 м от места постановки мобильного лазерного деформографа в точке с координатами 43° 12,391' СШ и 131° 52,984' ВД в пропиленную лунку на глубину 12 м был спущен низкочастотный гидроакустический излучатель электромагнитного типа, который создавал в воде гармонические и сложные фазоманипулированные (M-последовательности) сигналы с центральной частотой 33 Гц. Низкочастотный гидроакустический излучатель является основным элементом излучающей системы, в которую дополнительно входят рама для подвеса излучателя, кабель-шланг с контрольным манометром, источник электропитания, электронасос, контрольный гидрофон, два калибровочных акселерометра, цифро-аналоговый преобразователь, ноутбук. В качестве первичных источников постоянного тока используется батарея последовательно соединенных (в количестве от 3 до 6 штук, в зависимости от необходимой мощности) кислотных аккумуляторов напряжением по 12 В, емкостью 90 А·ч. Источник питания представляет собой мостовой ключевой усилитель, выполненный на двух полумостовых IGBT-модулях, снабженный компенсирующей батареей конденсаторов 420 мкФ, защитным автоматом и амперметром постоянного тока. Максимальное эффективное звуковое давление, которое способна выдавать излучающая система, состав-

Michelson interferometer was located. It consisted of: 1) a laser; 2) a collimator; 3) a dividing plate PI-100; 4) two plane-parallel mirrors fixed on piezoceramic propelling cylinders and a level-resetting system; 5) an extreme regulation system designed to control the operation of the interferometer. The angle reflector was placed in the thermally insulated box 2. The laser beam was propagated into the foam propylene pipes (3) between points 1 and 2. A computer with an analog-to-digital converter was placed in a heated room 4, where the operator was also located. All hardware was powered by a portable generator that provides stable variable voltage at the output of 220 V. The digital registration system of the laser strainmeter registered the change in the distance between the main node of the interferometer (point 1) and the angle reflector (point 2) with an accuracy of 0.3 nm. With a measuring arm length of 6 m, the ultimate sensitivity of the mobile laser strainmeter was

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,3 \text{ nm}}{6 \text{ m}} = 5 \cdot 10^{-11}.$$

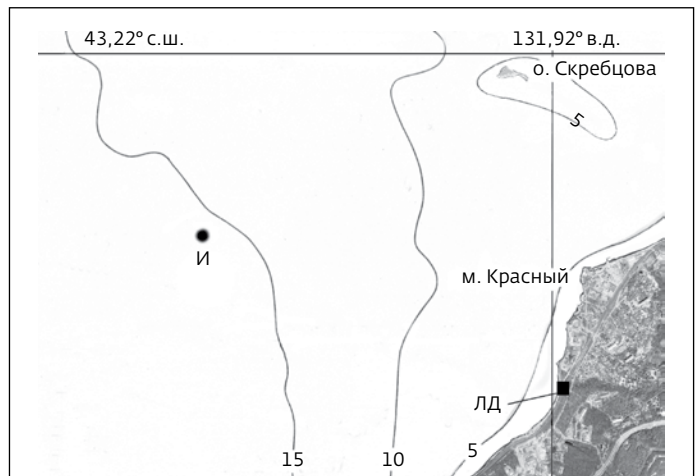
At a distance of 3150 meters from the location of the mobile laser strainmeter at the point with coordinates 43° 12.391' north latitude and 131° 52.984' east longitude, a low-frequency hydroacoustic radiator of electromagnetic type was lowered into the propylene hole to a depth of 12 m, which produced harmonic and complex phase-shift keyed (M-sequences) signals in the water with a central frequency of 33 Hz. The low-frequency hydroacoustic radiator is the main element of the radiating system, which additionally includes a frame for suspending the radiator, a cable-hose with a control manometer, a power source, an electric pump, a control hydrophone, two calibration accelerometers, a digital-to-analog converter, a laptop. A battery of 12 V acid cells connected in series with a capacity of 90 A·h was used as a primary source of direct current (in the amount of 3 to 6 pieces, depending on the required power). The power supply source was a bridge key amplifier made on two half-bridge IGBT-modules, equipped with a compensating battery of 420  $\mu$ F capacitors, a protective automatic device and a direct current ammeter. The maximum effective sound pressure that a radiating system is capable of producing is 3500 Pa (191 dB/1  $\mu$ Pa). All additional hardware of the radiating system was located in a minibus standing on the ice. The experimental scheme is shown in Fig. 2.

Before the beginning of the experiment, a signal model was constructed on the computer consisting of a tone signal 300 s long, a pause 30 s long and a single phase-shifted signal. The total duration of radiating packet was 485 s. The radiation of a single phase-modulated signal was separately performed additionally after each radiation series. Fig. 3 shows

ляет 3500 Па (191 дБ/1 мкПа). Вся дополнительная аппаратура излучающей системы располагалась в стоящем на льду микроавтобусе. Схема эксперимента приведена на рис.2.

Перед началом эксперимента на компьютере была построена модель сигнала, состоящая из тонового сигнала длительностью 300 с, паузой 30 с и одного фазоманипулированного сигнала. Излучающий пакет был общей длительностью 485 с. Дополнительно после каждой серии излучения отдельно выполнялось излучение одного фазоманипулированного сигнала. На рис.3 приведены динамические спектрограммы записей контрольного гидрофона и мобильного лазерного деформографа при работе гидроакустического излучателя.

Полученные записи контрольного гидрофона и мобильного лазерного деформографа были подвергнуты дополнительной обработке в лаборатории, которая сводилась к свертке записи контрольного гидрофона с записью лазерного деформографа. Один из результатов свертки представлен на рис.4. Применение систем точного времени в излучающей системе и в мобильном лазерном деформографе позволило объективно оценить времена приходов зарегистрированных



**Рис.2.** Схема проведения эксперимента. И – излучатель; ЛД – мобильный лазерный деформограф  
**Fig. 2.** Scheme of the experiment. R – radiator; LS – mobile laser strainmeter

the dynamic spectrograms of the records of the control hydrophone and the mobile laser strainmeter when the hydroacoustic radiator operates.

The received records of a control hydrophone and a mobile laser strainmeter were subjected to additional processing in the laboratory, i.e., convolution of the



сигналов с точностью 1 мс. Уверенно было зарегистрировано три прихода с временными промежутками от начала излучения 0,924; 1,270 и 1,526 с. По временам приходов сигналов и расстоянию между точками излучения и приема были определены вероятные минимальные скорости их распространения: 3400, 2480 и 2060 м/с. Можно предположить, что: 1) сигнал, распространяющийся со скоростью 2480 м/с, соответствует затухающей волне Рэлея, распространяющейся по границе "вода-дно"; 2) сигнал, распространяющийся со скоростью 3400 м/с, соответствует волне Лява, распространяющейся по границе "донные осадки – базальт". Интересен сигнал, имеющий скорость распространения 2060 м/с. Он может быть связан либо с ледяным покровом и обусловлен изгибной модой, либо его можно приписать поверхностной волне (аналог волны Рэлея затухающего типа), распространяющейся по границе "лед – водный слой".

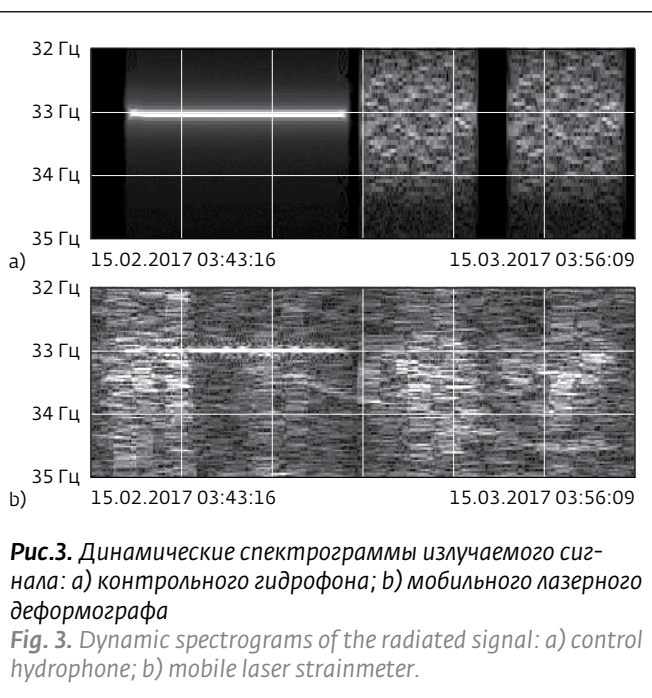
## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения экспериментальных работ на льду и берегу Амурского залива Японского моря была отработана методика эксплуатации мобильного лазерного деформографа в зимних условиях при отрицательных температурах воздуха. По полученным экспериментальным данным были определены минимальные скорости трех сигналов, распространяющихся от места излучения до берега, которые равны 3400, 2480 и 2060 м/с. Полученные результаты проведенного эксперимента продемонстрировали большие возможности данной технологии по изучению структуры и состава морской земной коры покрытых льдом арктических акваторий.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы "Дальний Восток" и РФФИ (грант 16-29-02023 офи\_м, модернизация аппаратуры и проведение эксперимента).*

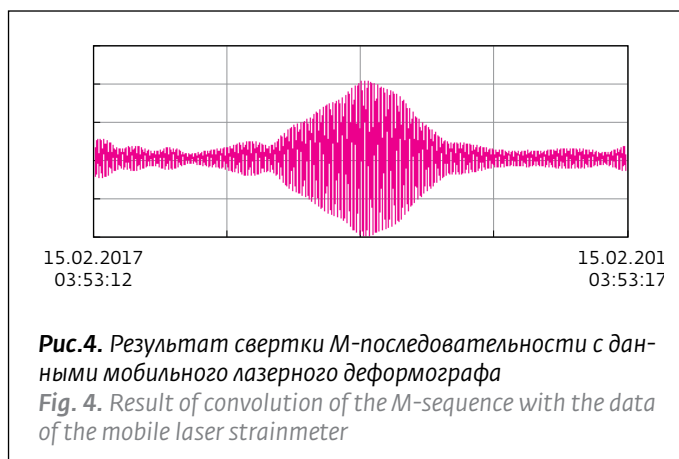
## ЛИТЕРАТУРА

1. **Авербах В.С., Боголюбов Б.Н., Заславский Ю.М. и др.** Применение сложных фазоманипулированных сигналов для сейсмоакустического зондирования грунта гидроакустическим источником. – *Акустический журнал*, 1999, т. 45, № 1, с. 5–12.
2. **Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Чупин В.А., Швырев А.Н., Ярошук И.О.** О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна. – *Доклады Академии наук*, 2013, т. 452, № 3, с. 321–325.
3. **Чупин В.А., Долгих Г.И.** Развитие технологии диагностики морского дна с помощью низкочастотных гидроакустических излучателей



**Рис.3.** *Динамические спектрограммы излучаемого сигнала: а) контрольного гидрофона; б) мобильного лазерного деформографа*  
**Fig. 3.** *Dynamic spectrograms of the radiated signal: a) control hydrophone; b) mobile laser strainmeter.*

control hydrophone record with the laser strainmeter record. One of the results of the convolution is shown in Fig. 4. The use of time-accurate systems in the radiating system and in the mobile laser strainmeter allowed us to objectively estimate the arrival times of the recorded signals with an accuracy of 1 ms. Three arrivals were registered for sure with time intervals from the beginning of the radiation of 0.924, 1.270 and 1.526 s. By the times of signal arrival and the distance between the radiation and reception points, the probable minimum propagation velocities were determined: 3400, 2480 and 2060 m/s. It can be assumed that: 1) a signal propagating with a velocity of 2480 m/s corresponds to a damped Rayleigh wave propagating along the "water-bottom" interface; 2) the signal propagating with a velocity of 3400 m/s corresponds to the Love wave propagating



**Рис.4.** *Результат свертки M-последовательности с данными мобильного лазерного деформографа*  
**Fig. 4.** *Result of convolution of the M-sequence with the data of the mobile laser strainmeter*

- и береговых лазерных деформографов. – Вестник ДВО РАН, 2015, № 6, с. 90–95.
4. **Долгих Г.И., Привалов В.Е.** Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. – Владивосток: ООО "Рея", 2016.
  5. **Ball Justin S., Godin Oleg A., Evers Laslo G., Lv Cheng.** Long-range correlations of microseism-band pressure fluctuations in the ocean. – Geophys. J. Int., 2016, v.206, p.825–834.
  6. **Преснов Д.А., Жостков Р.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л.** Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема. – Известия РАН. Сер. физическая, 2017, т. 8, № 1, с. 76–80.
  7. **Diez A., Bromirski P.D., Gerstoft P., Stephen R.A., Anthony R.E., Aster R.C., Cai C., Wiens D.A., Nyblade A.** Ice shelf structure derived from dispersion curve analysis of ambient seismic noise, Ross Ice Shelf, Antarctica. – Geophys. J. Int., 2016, v.205, p.785–795.
  8. **Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К.** Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон. – Физика Земли, 2002, № 8, с. 69–73.
  9. **Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В.** Двухкоординатный лазерный деформограф. – Физика Земли, 1998, № 11, с. 76–81.
  10. **Бородин А.Е., Долгих А.Г., Долгих Г.И., Фищенко В.К.** Регистрация сейсмоакустических сигналов надводного судна двухкоординатным лазерным деформографом. – Акустический журнал, 2016, т. 62, № 1, с. 59–69.

along the "bottom sediments – basalt" interface. The signal having a propagation velocity of 2060 m/s is of particular interest. It can be connected with the ice cover, and is caused by a bending mode. Alternatively, it can be ascribed to a surface wave (similar to a Rayleigh wave of decaying type) propagating along the ice-water interface.

## CONCLUSIONS

During the experimental work on the ice and the coast of the Amur Bay of the Sea of Japan, the technique of operating a mobile laser strainmeter in winter conditions under negative air temperatures has been perfected. Based on the obtained experimental data, the minimum velocities of three signals propagating from the radiation site to the shore, which are equal to 3400, 2480 and 2060 m/s, were determined. The obtained results of the experiment demonstrated the great possibilities of this technology for studying the structure and composition of the sea crust of ice-covered Arctic water areas.

*The research was carried out with partial financial support of the Far Eastern program and the Russian Foundation for Basic Research (grant 16-29-02023 ofi\_m, hardware modernization and experimentation).*

## XIV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ГОЛОЭКСПО 2017 (HOLOEXPO 2017)

Принять участие в Международной научно-технической конференции "Голография. Наука и практика" приглашает специалистов организационный комитет конференции. Мероприятие состоится 12–14 сентября 2017 года в Звенигороде, в отеле HELIOPARK Thalasso, ул. Лермонтова, 1 ([www.heliopark-thalasso-hotel.ru](http://www.heliopark-thalasso-hotel.ru))

Цель конференции – обсуждение новейших научно-технических достижений и технологий в области голографии в России, Республике Беларусь, в других странах СНГ и за рубежом, а также оценки состояния рынка голографических технологий и продукции и направлений их развития. Планируется работа следующих секций:

- Секция №1 – "Технологии получения защитных голограмм";
- Секция №2 – "Формирование изображений и отображение информации с помощью голограммной оптики и оптико-голографических систем";
- Секция №3 – "Метаматериалы, нанотехнологии и плазмонные структуры для голографии, голограммные и дифракционные оптические элементы, методы компьютерного синтеза и технология изготовления";
- Секция №4 – "Изобразительная голография и фоточувствительные материалы для голографии";
- Секция №5 – "Голографическая интерферометрия, голографическая память, оптико-голографическая обработка информации".

*С.Б.Одинокоев, д.т.н., профессор,  
Председатель Организационного комитета XIV Международной конференции ГолоЭкспо 2017*

