



Система учета температурной погрешности показаний интерферометра автономного лазерного измерителя колебаний давления

С. В. Яковенко

Тихоокеанский океанологический институт
им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия

Описана система учета погрешности показаний интерферометра, связанной с изменением температуры на примере автономного лазерного измерителя колебаний давления жидкости. Рассматриваются особенности регистрации и учета температуры снаружи и внутри прибора, результаты измерения скорректированных колебаний давления сравниваются с теоретически рассчитанными для частотного диапазона приливов. Показана строгая необходимость проведения учета температурной погрешности, значительно искажающей первичные данные.

Ключевые слова: температурная погрешность при работе интерферометра, автономный измеритель колебаний давления, подводная измерительная система, гидросфера, мониторинг гидродинамических процессов.

Статья получена: 28.07.2020

Принята к публикации: 24.08.2020

Высокая чувствительность лазерного интерферометра, а также широчайший частотный диапазон позволяют использовать его для мониторинга многих физических величин прямыми и косвенными методами. Во время измерений происходит регистрация изменения

System for Recording Interferometer Readings Error Associated with the Temperature Change in Autonomous Laser Meter of Pressure Fluctuations

S. V. Yakovenko

V. I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

A system for recording interferometer readings error associated with the temperature change in example stand-alone laser meter of pressure fluctuations is described. The peculiarities of registration and accounting of temperature outside and inside the device are considered, the results of measuring the corrected pressure fluctuations are compared with those theoretically calculated for the frequency range of tides. It is shown that it is strictly necessary to take into account the temperature error, which significantly distorts the primary data.

Keywords: interferometer temperature error, stand-alone pressure fluctuation meter, underwater measuring system, hydrosphere, monitoring of hydrodynamic processes.

Received on: 28.07.2020

Accepted on: 24.08.2020

The high sensitivity of the laser interferometer, as well as the widest frequency range, makes it possible to use it for monitoring many physical quantities by direct and indirect methods. During measurements, a change in the state of the interference pattern is registered, formed by a certain path of rays in the interferometer, the path length of which is directly or indirectly related to the measured physical quantity. Based on this principle, laser meters for

состояния интерференционной картины, образованной определенным ходом лучей в интерферометре, длина пробега которых напрямую или опосредованно связана с измеряемой физической величиной. По такому принципу созданы лазерные измерители микроколебаний земной коры (деформографы) [1], лазерные измерители вариаций давления атмосферы (нанобарографы) [2] и гидросферы [3], лазерные гравиметры [4] и другие приборы.

Однако, несмотря на потенциально уникальные характеристики, достижимые в измерителях на основе лазерных интерферометров, фактическое создание приборов, действительно имеющих такие параметры, связано с решением важных инженерных задач, а также специальной пост-обработкой полученных данных. Игнорирование или некорректное решение этих вопросов приводит, например, к тому, что записанный сигнал искажен за счет «подмешанной» информации, не имеющей отношения к измеряемой величине. В частности, для работы этого типа оборудования требуются очень стабильные условия микроклимата в интерференционном узле либо его изменения должны учитываться. Влажность, давление и температура влияют на изменение коэффициентов преломления либо попросту изменяют физические размеры компонентов прибора, внося, таким образом, погрешность в измерения.

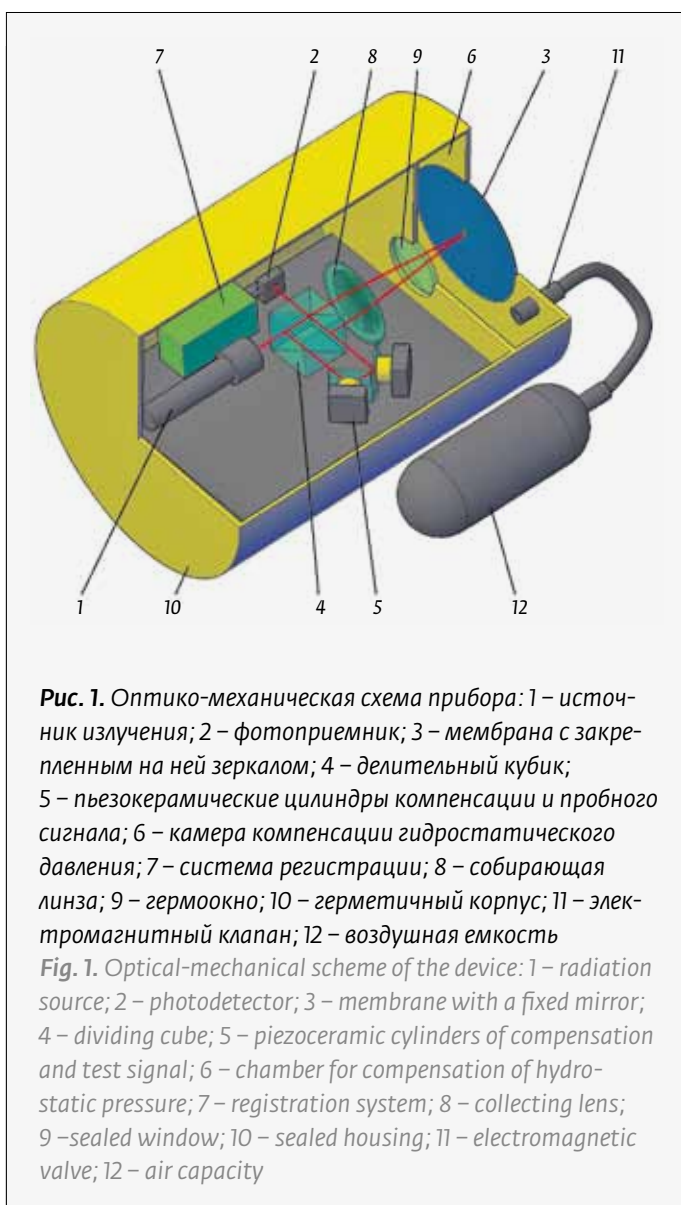
Рассмотрим влияние изменения температуры на получаемые интерферометром данные на примере разработанного ранее лазерного измерителя колебаний давления [5]. Применение нами подобных измерителей позволило накопить большой опыт работы с такими устройствами. Были созданы модификации с использованием разных источников излучения и компоновки прибора [6].

Основой прибора является интерферометр Майкельсона, собранный по модифицированной схеме неравноплечего типа. Оптико-механическая схема устройства и принцип его действия показаны на рис. 1.

В качестве источника излучения используется газовый гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер 1. Его луч разделяется на делительном кубе 4 на две части, образуя «плечи» интерферометра, одно из которых является эталонным. Луч, который распространяется по второму, проходит через зеркало, закрепленное на внутренней стороне мембраны, установленной в крышке прибора. На внешнюю сторону мембраны 3 производится давление заборной воды и это «плечо» является, таким образом, измерительным. Про-

microvibration of the earth's crust (strainmeters) [1], laser meters for atmospheric pressure variations (nanobarographs) [2] and hydrosphere [3], laser gravimeters [4] and other devices have been created.

However, in spite of the potentially unique characteristics attainable in meters based on laser interferometers, the actual creation of instruments that actually have such parameters is associated with the solution of important engineering problems, as well as special post-processing of the data obtained. Ignoring or incorrect solution of these issues leads, for example, to the fact that the recorded signal is distorted due to “mixed” information that has nothing to do with the measured value. In particular, this type of equipment requires very stable microclimate conditions in the interference node or its changes must be taken into



странственное сведение попадающих обратно на делительный куб 4 обеих лучей (после их прохождения по своим оптическим путям) позволяет получить интерференционную картину переменной яркости, обусловленную изменением разности хода лучей. Изменение яркости регистрируется фотоприемником 2 системы регистрации 7, которая формирует сигнал разности хода лучей. Этот сигнал является выходным, и он же подается на один из пьезокерамических элементов 5 для возврата интерференции на экстремум, т. е. таким способом происходит компенсация возникшей разности хода.

В приборе применяется система компенсации гидростатического давления. Она необходима для выравнивания давления по обе стороны от мембраны перед началом измерений. Назначение системы в том, чтобы не позволить мембране быть задавленной внутрь пространства прибора при наращивании гидростатического давления. Таким образом, к началу проведения измерений мембрана остается в положении нулевого смещения. Для этого при погружении прибора по команде открывается электромагнитный клапан 11, который пропускает воздух из специальной эластичной емкости 12 в камеру небольшого объема (компенсационная камера 6) между мембраной и основным пространством корпуса, отделенную от него прозрачным гермоокном 9. Воздух из емкости нагнетается внутрь компенсационной камеры с давлением, равным забортному. По окончании погружения клапан закрывается. При обратном подъеме прибора воздух из компенсационной камеры таким же образом стравливают обратно во внешний резервуар, вновь выравнивая давление по обе стороны от мембраны. На рис. 2 показана фотография практической реализации описанного прибора.

На крышке прибора установлен дополнительный герметичный разъем, предназначенный для опционального оборудования. Это универсальный интерфейс, снабженный электрическим питанием и линией передачи данных. С помощью него измеритель может работать совместно с датчиками глубины, гидрофонами, гидрологическими и прочими измерителями, телеметрическими модулями радиосвязи. Кроме того, прибор комплектуется гермобоксом, подключаемым к основному герморазъему питания и связи для обеспечения функции автономности. Установленная там система электрического питания мощностью около 8000 Вт·ч и регистрационный блок на основе промышленного компьютера позволяют измерителю

account. Humidity, pressure and temperature affect the change in refractive indices, or simply change the physical dimensions of the device components, thus introducing an error in the measurements.

Let us consider the effect of temperature change on the data obtained by the interferometer using the example of a previously developed laser meter of pressure fluctuations [5]. Our use of such meters has allowed us to accumulate extensive experience with such devices. Modifications were created using different radiation sources and device layout [6].

The basis of the device is a Michelson interferometer, assembled according to a modified scheme of an unequal type. The optical-mechanical diagram of the device and its principle of operation are shown in Fig. 1.

A gas helium-neon frequency-stabilized laser 1 is used as a radiation source. Its beam is divided on a dividing cube 4 into two parts, forming the “arms” of the interferometer, one of which is the reference. The beam, which propagates along the second, passes through a mirror, fixed on the inner side of the membrane installed in the lid of the device. Seawater pressure is produced on the outer side of the membrane 3, and such “arm” is thus a measuring one. Spatial convergence of both rays falling back on the dividing cube 4 (after they have passed along their optical paths) allows you to obtain an interference pattern of variable brightness caused by a change in the difference in the path of the rays. The change in brightness is recorded by the photodetector 2 of the registration



Рис. 2. Автономный лазерный измеритель колебаний давления

Fig. 2. Stand-alone laser meter of pressure fluctuations

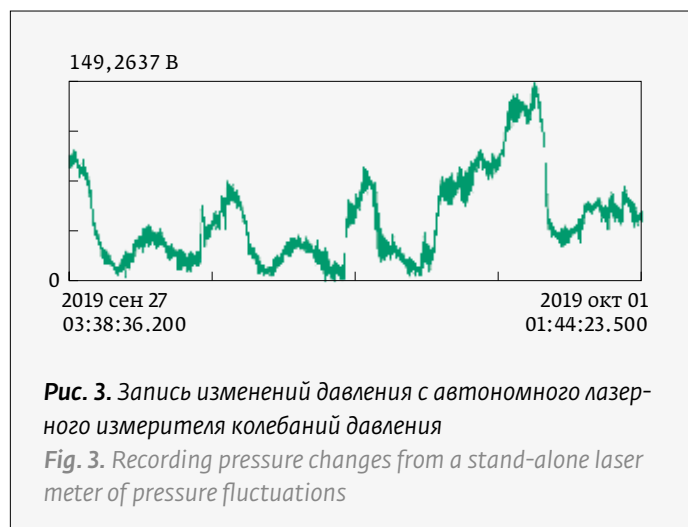
работать в автономном режиме в течение более шести суток.

В работе интерферометра используется система регистрации интерференционного измерителя вариаций давления [7]. Данная модель системы регистрации позволяет получить точность перемещения центра мембраны $0,75\lambda/(2^{N-1})$ или 0,06 нм. Пересчет регистрируемого перемещения в вариации давления производится по формуле, описывающей поведение центра закрепленной на краях плоской мембраны [8]:

$$P = \frac{\Delta l \cdot 16h^3 E}{1(1 - \sigma^2)R^4},$$

где Δl – смещение мембраны; h – толщина мембраны; E – модуль Юнга; σ – коэффициент Пуассона; R – радиус мембраны. В измерителе могут быть использованы мембраны, изготовленные из листа нержавеющей стали толщиной 0,1; 0,5; 1; 2 мм. В данной работе была использована мембрана толщиной 1 мм. Для значений $R=5$ см, $h=1$ мм, $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\sigma=0,25$ и $\Delta l=0,06$ нм получим, что разрешение измерителя по давлению составляет $P=11,5$ мПа. При этом, с точки зрения частотных характеристик, система способна регистрировать вариации давления в диапазоне частот от самых низких (близких к нулевым), зависящих от времени наблюдения до 1000 Гц.

Как отмечено в начале статьи, представленные расчетные характеристики прибора вполне достижимы, однако получаемые данные подвергаются значительным искажениям за счет погрешностей, вносимых параметрами микроклимата внутри измерительной установки.



system 7, which generates a signal of the difference in the path of the rays. This signal is output and is also fed to one of the piezoceramic elements 5 to return the interference to an extreme, i.e. in this way, the resulting travel difference is compensated.

The device uses a hydrostatic pressure compensation system. It is necessary to equalize the pressure on both sides of the membrane before starting measurements. The purpose of the system is not to allow the membrane to be crushed into the space of the device when the hydrostatic pressure builds up. Thus, at the start of the measurement, the membrane remains in the zero offset position. To do this, when the device is immersed, on command, the solenoid valve 11 opens, which passes air from a special elastic container 12 into a small-volume chamber (compensation chamber 6) between the membrane and the main body space, separated from it by a transparent sealed window 9. Air from the container is pumped inside a compensation chamber with a pressure equal to the outboard pressure. When the device is lifted back, the air from the compensation chamber is vented back to the external reservoir in the same way, again equalizing the pressure on both sides of the membrane. Fig. 2 shows a photograph of the practical implementation of the described device.

An additional sealed connector is installed on the lid of the device for optional equipment. It is a universal interface equipped with electrical power supply and data line. With it, the meter can work in conjunction with depth sensors, hydrophones, hydrological and other meters, telemetry radio modules. In addition, the device is equipped with a hermetic box that is connected to the main power and communication hermetic connector to ensure the autonomy function. The electric power supply system installed there with a capacity of about 8,000 W·h and a registration unit based on an industrial computer allows the meter to operate in an stand-alone mode for more than six days.

The interferometer uses a system for recording an interference meter for pressure variations [7]. This model of the registration system makes it possible to obtain an accuracy of displacement of the membrane center of $0,75\lambda/(2^{N-1})$ or 0.06 nm. The recalculation of the recorded displacement in the pressure variation is carried out according to the formula describing the behavior of the center of the flat membrane fixed at the edges [8]:

$$P = \frac{\Delta l \cdot 16h^3 E}{1(1 - \sigma^2)R^4}.$$

Рассмотрим пример записи (рис. 3), сделанной в бухте Алексеева на острове Попова в Амурском заливе осенью 2019 года. Длительность участка записи более 90 часов (около 4 суток).

В период времени, когда была сделана запись, не было существенных ветров, атмосферных депрессий, выпадений осадков и прочих факторов, которые могли бы повлиять на уровень моря в данном районе береговой черты, однако запись естественного и наиболее сильного колебательного процесса – приливов здесь сильно искажена и явно имеет посторонние включения. Забегая вперед, можно сказать, что нам уже известно, что именно это за погрешности, однако данная запись демонстрирует, как выглядят измерения, сделанные интерферометром без специальной коррекции данных относительно этих погрешностей.

На рис. 4 приведен график записи температурного датчика, размещенного в металле опорной пластины интерферометра. Данные колебания вызваны изменением температуры воды снаружи прибора, которая через металл крышки и корпуса влияет на изменение температуры внутри прибора.

Это, в свою очередь, приводит к изменению длины эталонного плеча вследствие теплового расширения деталей интерферометра. Используя два датчика – внешний и внутренний, мы получаем информацию о поле температуры снаружи прибора, а также возможность расчета градиента температуры, влияющего на мгновенный корректирующий коэффициент. Функция динамически изменяющегося корректирующего коэффициента была определена расчетным путем и скорректирована при проведении тестов. После этого функция коррекции показаний интерферометра была включена в программное обеспечение обработки измерений. При этом расчет итогового значения давления производится по формуле $P_{\text{корр}} = P_i - T_i \cdot K_{\text{корр}i}$. В результате получим ряд данных вида, представленный на рис. 5.

На этом примере показано, что система корректировки температурной погрешности в данных интерферометра работает должным образом, установка ее на прибор оправдана и целесообразна, а также и то, что данная методика может быть использована на интерферометрах данного класса, использующихся в широком спектре задач, касающихся измерения вариаций давления и, в частности, при изучении амплитудно-фазовых колебаний давления гидросферы в широком частотном диапазоне.

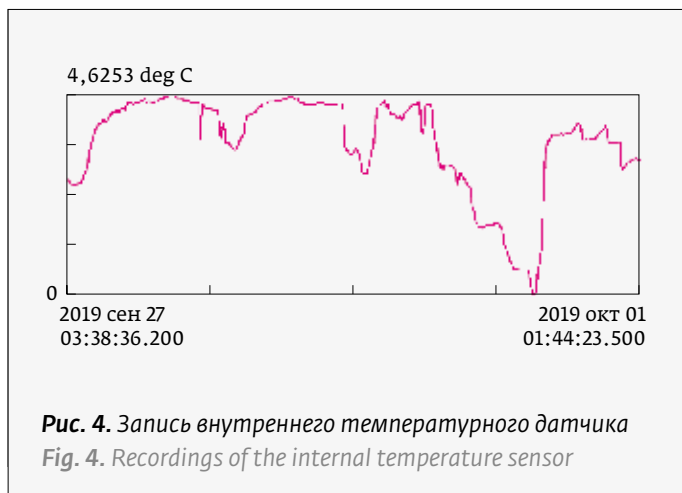


Рис. 4. Запись внутреннего температурного датчика
Fig. 4. Recordings of the internal temperature sensor

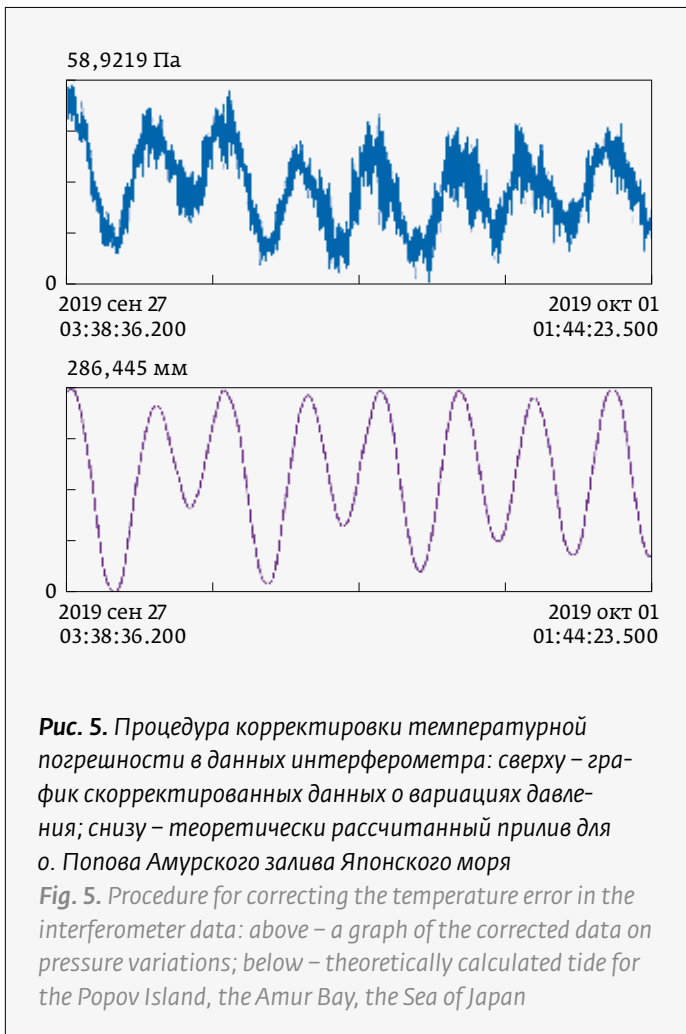
Here Δl is the displacement of the membrane; h is the thickness of the membrane; E is Young's modulus; σ is Poisson's ratio; R is the radius of the membrane. The membranes made of stainless steel sheet 0.1 thick can be used in the meter; 0.5; 1; 2 mm. In this work, a 1 mm thick membrane was used. For the values $R=5$ cm, $h=1$ mm, $E=2.1 \cdot 10^{11}$ N/m², $\sigma=0.25$ and $\Delta l=0.06$ nm, we obtain that the pressure resolution of the meter is $P=11.5$ mPa. Moreover, from the point of view of frequency characteristics, the system is able to register pressure variations in the frequency range from the lowest (close to zero), depending on the observation time up to 1,000 Hz.

As noted at the beginning of the article, the presented calculated characteristics of the device are quite achievable, however, the data obtained are subject to significant distortions due to errors introduced by the microclimate parameters inside the measuring installation.

Let's consider an example of a recording (Fig. 3) made in Alekseev Bay on the Popov Island in the Amur Bay in autumn 2019. The duration of the recording section is more than 90 hours (about 4 days).

At the time when the record was made, there were no significant winds, atmospheric depressions, precipitation and other factors that could affect the sea level in this area of the coastline, however, the record of the natural and most powerful oscillatory process – tides here is highly distorted and clearly has “extraneous inclusions”. Looking ahead, we can say that we already know what these errors are, but this record demonstrates what the measurements made by the interferometer look like without special data correction regarding these errors.

Fig. 4 shows a graph of the recording of a temperature sensor placed in the metal of the interfer-



ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-80011_Опасные явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Овчаренко В. В., Чупин В. А., Швец В. А., Яковенко С. В. Лазерный деформограф с точностью на уровне пикометров. *Приборы и техника эксперимента*. 2013; 36(2): 138–139.
2. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н., Корень И. А., Новикова О. В., Овчаренко В. В., Окунцева О. П., Швец В. А., Чупин В. А., Яковенко С. В. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении баро-деформационного взаимодействия. *Физика Земли*. 2004; 8: 82.
3. Долгих Г. И., Долгих С. Г., Ковалев С. Н., Швец В. А., Чупин В. А., Яковенко С. В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы. ПТЭ. 2005; 48(6): 137–138.
4. Патент RU99194 U1. Лазерный баллистический гравиметр / Калиш Е. Н.
5. Долгих Г. И., Будрин С. С., Швец В. А., Яковенко С. В. Автономный лазерный измеритель колебаний давления. *Фотоника*. 2019; 13(4): 372–381. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.4.372.380.
6. Долгих Г. И., Ковалев С. Н., Швец В. А., Яковенко С. В. Цифровая система регистрации лазерно-интерференционных установок. *Приборы и техника эксперимента*. 2008; 51(5):158–159.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости*. – М.: Наука. 1987. 246 с.

ometer's support plate. These fluctuations are caused by a change in the temperature of the water outside the device, which, through the metal of the cover and body, affects the temperature change inside the device.

This, in turn, leads to a change in the length of the reference “arm” due to thermal expansion of the interferometer parts. Using two sensors, external and internal ones, we get information about the temperature field outside the device, as well as the ability to calculate the temperature gradient that affects the instantaneous correction factor. The function of the dynamically changing correction factor was determined by calculation and corrected during the tests. After that, the function of correcting the interferometer readings was included in the measurement processing software. In this case, the calculation of the final pressure value is made according to the formula $P_{corr} = P_i - T_i \cdot K_{corr i}$. As a result, we obtain a series of data of the form shown in Fig. 5.

This example shows that the system for correcting the temperature error in the interferometer data works properly, its installation on the device is justified and expedient, as well as that this technique can be used on interferometers of this class used in a wide range of tasks related to measuring variations pressure and, in particular, when studying the amplitude-phase fluctuations of the hydrosphere pressure in a wide frequency range.

FINANCING

The research was carried out with partial financial support from RFBR grant No. 18-05-80011_Dangerous phenomena.

REFERENCES

1. Dolgih G. I., Dolgih S. G., Ovcharenko V. V., Chupin V. A., Shvec V. A., Yakovenko S. V. Lazernyj deformograf s tochnost'yu na urovne pikometrov. *Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and Experimental Techniques)*. 2013; 36(2): 138–139.
2. Dolgih G. I., Dolgih S. G., Kovalev S. N., Koren' I. A., Novikova O. V., Ovcharenko V. V., Okuntseva O. P., Shvets V. A., Chupin V. A., Yakovenko S. V. A Laser Nanobarograph and Its Application to the Study of Pressure–Strain Coupling. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2004; 40(8): 683.
3. Dolgih G. I., Dolgih S. G., Kovalev S. N., Chupin V. A., Shvets V. A., Yakovenko S. V. Laser measuring instrument of hydrosphere pressure variations. *Instruments and Experimental Techniques*. 2005; 48(6): 56–57.
4. Patent RU99194 U1. Lazernyj ballisticheskij gravimetr / Kalish E. N.
5. Dolgih G. I., Budrin S. S., Shvets V. A., Yakovenko S. V. Autonomous Laser Pressure Fluctuation Meter. *Fotonika (Photonics Russia)*. 2019; 13(4): 372–381. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2019.13.4.372.380.
6. Dolgih G. I., Kovalev S. N., Shvec V. A., Yakovenko S. V. Cifrovaya sistema registracii lazerno-interferencionnyh ustanovok. *Pribory i tekhnika eksperimenta (Instruments and Experimental Techniques)*. 2008; 51(5):158–159.
7. Landau L. D., Lifshic E. M. *Teoreticheskaya fizika. T. VII. Teoriya uprugosti*. – M.: Nauka. 1987. 246 pp.