



ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

DOI: 10.5862/JPM.253.7

УДК: 681.7.08

*С.В. Яковенко, С.С. Будрин,
С.Г. Долгих, В.А. Чупин, В.А. Швец*

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДО РАН,
Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС

Создан новый гидрофизический измерительный комплекс, основой которого являлся разработанный ранее и прошедший экспериментальную апробацию лазерный измеритель вариаций давления гидросферы. Все характеристики нового комплекса значительно улучшены благодаря полученному ранее эксплуатационному опыту. Обеспечены принципиально новые возможности созданного оборудования, так как прибор получил новые датчики для сопутствующих измерений и контейнер, позволяющий работать автономно. Новый измерительный комплекс более прост в эксплуатации, обеспечивает более высокое качество получаемых данных и новые сферы его применения.

ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ, ВАРИАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ, ГИДРОСФЕРА, ИНТЕРФЕРОМЕТР, МОНИТОРИНГ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.

При исследовании различных геосферных процессов и явлений большое значение имеют технические характеристики оборудования, применяемого для решения возникающих проблем, например природы возникновения и развития вариаций деформации земной коры. С целью изучения такой природы созданы лазерные деформографы различных модификаций [1 – 3]. Применение лазерно-интерференционных методов при разработке других измерительных средств позволило создать лазерные нанобарографы [4] и лазерные измерители вариаций давления гидросферы [5], которые способны измерять вариации атмосферного и гидросферного давлений в инфразвуковом и звуковом диапазонах с высокой точностью. Одновременное использование лазерного нанобарографа и лазерного измерителя вариаций давления гидросферы позволило получить ряд принципиально новых результатов. Так, было установлено, что цуги волн давления в водной сре-

де с периодами, лежащими в диапазоне временных периодов 7 – 13 мин, вызваны подобными же цугами волн в атмосферном давлении, а не короткопериодными внутренними морскими волнами [6]. Несмотря на успешное применение лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (ЛИВДГ) в научных исследованиях, необходимо его дальнейшее усовершенствование, так как он обладает рядом существенных недостатков:

- большие габариты и вес, что приводит к неустойчивости интерференционной картины (помимо неудобства в эксплуатации);
- невозможность разделить вклады, обусловленные вариациями забортной температуры, в показания прибора;
- отсутствие возможности автономной работы;
- отсутствие возможности подключения дополнительных датчиков.

В связи с указанными недостатками, ЛИВДГ был подвергнут значительным кон-

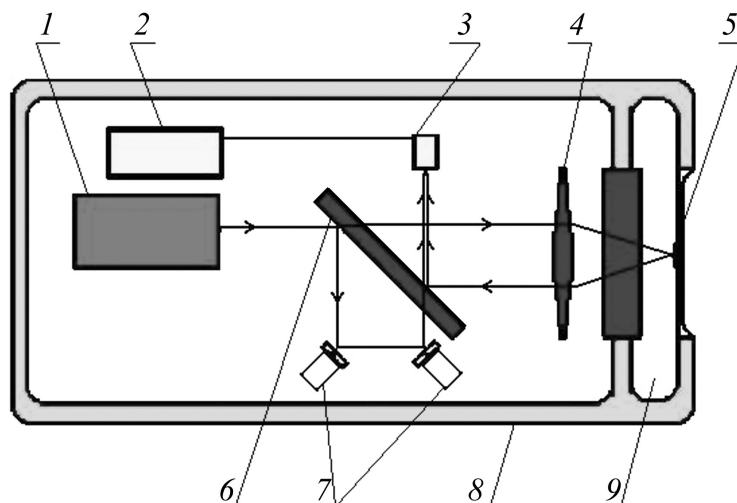


Рис. 1. Оптико-механическая схема интерферометра:

1 – источник излучения (гелий-неоновый лазер), 2 – система регистрации, 3 – фотоприемник, 4 – собирающая линза, 5 – мембрана с закрепленным на ней зеркалом, 6 – делительная плоскопараллельная пластина, 7 – пьезокерамики компенсации и пробного сигнала, 8 – герметичный корпус, 9 – камера компенсации гидростатического давления

структивным изменениям, которые позволили существенно улучшить его эксплуатационные характеристики.

Источником излучения 1 в ЛИВДГ служит гелий-неоновый частотно-стабилизированный лазер MellesGriot (рис. 1). Основная часть данного лазерного измерителя по-прежнему представляет собой интерферометр Майкельсона, построенный по модифицированной схеме неравноплечего типа, одно плечо которого является эталонным.

Луч, который распространяется по другому плечу, проходит через зеркало, установленное на мембрану в крышке прибора, контактирующую внешней стороной с водой. Этот луч является, таким образом, измерительным. Сведение обоих лучей, вернувшихся на делительную пластину, позволяет получить интерференционную картину, изменение яркости которой связано с изменением разности хода лучей. Изменение яркости регистрируется фотоприемником 3 системы регистрации 2, которая формирует сигнал на компенсацию разности хода лучей. Этот же сигнал является выходным.

В приборе применяется система ком-

пенсации гидростатического давления. Она необходима для выравнивания давления по обе стороны от мембраны для приведения ее перед измерениями в нейтральное положение. При погружении комплекса под воду, по команде открывается электромагнитный клапан, который пропускает воздух из специальной емкости в камеру. По окончании погружения до необходимой глубины клапан закрывается, что позволяет начать измерения. При подъеме прибора из водной глубины давление сравнивают.

Оптическая скамья – металлическая пластина, несущая на себе все оптические компоненты прибора, была укорочена при создании нового комплекса с прежней длины в 1144 мм до 400 мм. Это стало возможным после проведения оптимизации размеров деталей и их более рационального расположения в программе трехмерного моделирования (рис. 2).

Обновленная оптическая скамья выполнена из нержавеющей стали, что вкупе с ребрами усиления, расположенными с обеих сторон, и стальной растяжкой с верхней стороны увеличило жесткость этого элемента. Источник излучения перенесен с прежнего места под оптическую скамью,

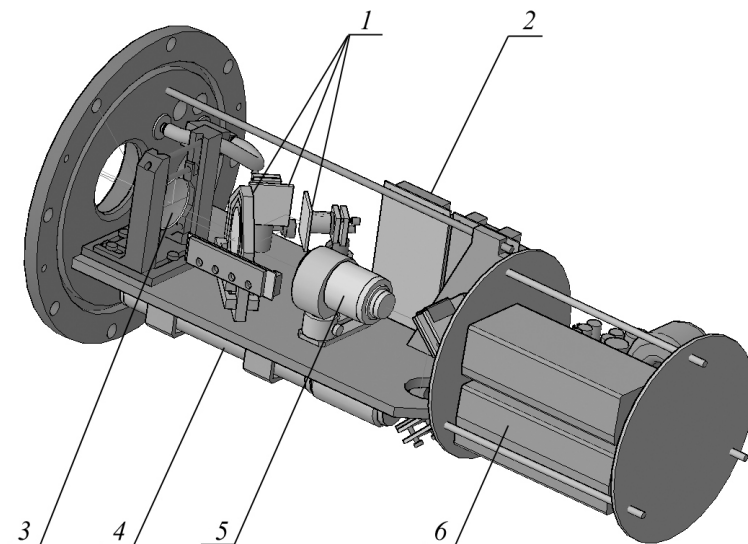


Рис. 2. Трехмерная модель расположения компонентов измерительного комплекса: 1 – зеркала и делительная пластина, 2 – печатные платы системы регистрации, 3 – линза, фокусирующая луч на мембране, 4 – лазер, 5 – коллиматор, 6 – отсек блоков питания

откуда луч стал выводиться с помощью системы зеркал на оригинальном пружинном подвесе, который компенсирует сотрясения системы. Уменьшение длины оптической скамьи позволило сократить длину герметичного корпуса на 543 мм; это значительно снизило вес прибора, а новые габариты упростили выполнение работ по установке измерителя в рабочее положение и по его подъему из глубины.

Датчики температуры на основе цифрового термометра DS18B20 были установлены по одному внутри (на оптической скамье интерферометра) и снаружи (тонкостенный щуп-стержень в районе мембраны) прибора. Необходимость измерения температуры внутри прибора связана с тем, что ее изменение вносит существенную погрешность в работу неравноплечего интерферометра. Разрешающая способность по температуре в 12-битном режиме работы применяемого датчика составила 0,0625 °С.

На крышку прибора установлен герморазъем для установки флуориметра ECO FL, предназначенного для определения биологических характеристик воды. В частности, определение количества хлорофилла *a* данный датчик способен проводить в диапазоне 0 – 125 мкг/л с разрешением 0,02 мкг/л.

Система регистрации интерференционного измерителя вариаций давления была значительно усовершенствована. Функционально новая система подобна ранее созданной и подробно описана в статье [7].

Максимальная точность измерения перемещений мембраны составила 0,06 нм. Давление *P*, которое регистрирует измеритель вариаций давления гидросферы, оборудованный описанной регистрирующей системой, можно рассчитать по следующей формуле, описывающей поведение плоской мембраны, заземленной на краях:

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

где Δl – смещение мембраны; R, h – радиус мембраны и ее толщина; E – модуль Юнга; σ – коэффициент Пуассона.

В измерителе может быть использована мембрана, изготовленная из нержавеющей стали, причем измеритель комплектуется набором мембран разной толщины, мм: 0,1, 0,5, 1,0 и 2,0. Испытания проводились с мембраной толщиной в 1 мм.

Таким образом, при значениях параметров $R = 5$ см, $h = 1$ мм, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Н/м², $\sigma = 0,25$ и $\Delta l = 0,06$ нм значение разрешения по давлению составляет $P = 11,5$ мПа.

Система способна регистрировать вариации давления в диапазоне частот от нуля (условно) до 1 кГц.

Работа прибора с использованием кабельной линии усложняет эксплуатацию, а проведение измерений на дистанциях более 500 м от береговой черты и вовсе становится невозможным по многим причинам. В силу указанных обстоятельств появилась необходимость в автономизации данного измерительного средства. Сохранить все преимущества и имеющиеся возможности работы как с использованием кабельной линии, так и без нее, удалось путем разработки и создания универсального контейнера автономизации гидрофизических приборов (КАГП).

Универсальный контейнер подключается к основному герморазъему прибора и тем самым заменяет собой береговой кабель, имитируя таким образом работу прибора на кабеле. КАГП содержит в себе батареи элементов питания, блоки согласования и стабилизации параметров электрических цепей, а также микрокомпьютер с твердотельным накопителем для записи информации, поступающей из прибора. Испытания работы КАГП в течение 7 ч показали работоспособность данного устройства. Теоретически рассчитанное время автономной работы прибора составляет около 40 ч.

Зимой 2015 года проходили испытания обновленной системы в бухте Витязь залива Посыет Приморского края. Глубина бухты в месте установки измерительного комплекса составляла 9,5 м; высота измерительной мембраны и датчиков над дном – 0,5 м.

При проведении испытаний, с помощью интерферометра прибора были получены записи ветрового волнения. Высота волны по данным зафиксированного давления была получена по следующей формуле [8]:

$$P = g\rho a \frac{\text{ch}[k(h+z)]}{\text{ch}(kz)}, \quad (2)$$

где P – давление; g – ускорение свободного падения; a – амплитуда волны; k – волновое число; h, ρ – глубина и плотность воды; z – глубина установки датчика.

В качестве примера на рис. 3 приведена запись, где зафиксирован сигнал ветрового волнения. Период колебаний сигнала составлял 6,89 с; средняя величина вариаций давления, определенная интерферометром для этого волнения, составила 1697,97 Па, что соответствует амплитуде поверхностной волны 0,27 м (согласно формуле (2)).

Установленные в приборе цифровые датчики температуры дают возможность производить корректировку показаний интерферометра, вариации показаний кото-

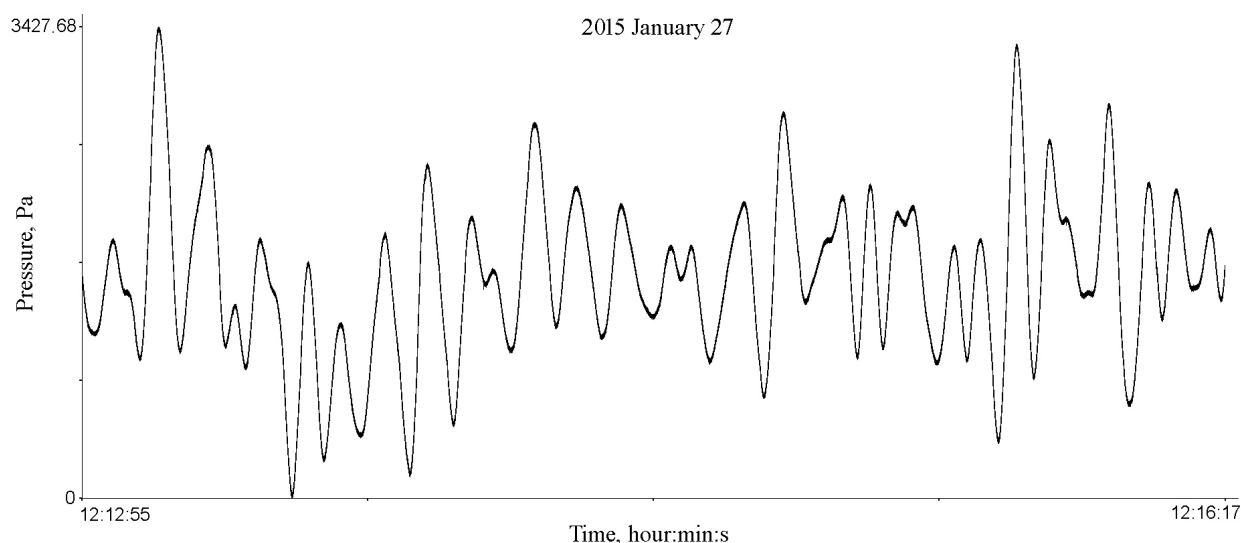


Рис. 3. Пример графика вариаций давления ветра, вызванных ветровым волнением. График получен при измерении комплексом ЛИВДГ. Найденные параметры сигнала приведены в тексте

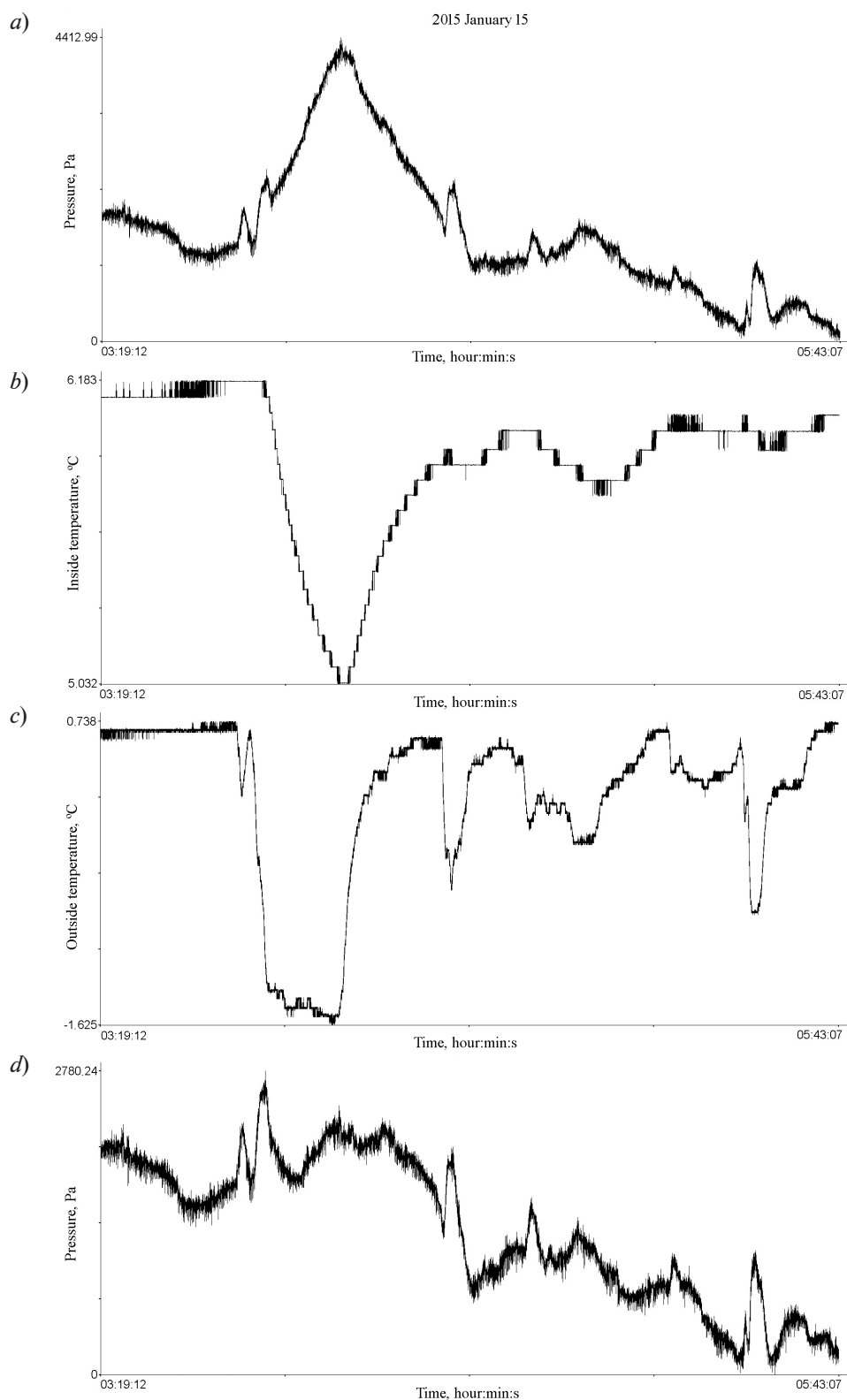


Рис. 4. Участок записи за период в 144 мин. Получены графики вариаций давления с помощью интерферометра (*a*, *d*), температуры интерферометра (*b*) и за бортом (*c*); *d* – график *a*) после коррекции

рого связаны с изменением температуры. Эта задача очень актуальна, поскольку изменение температуры внутри прибора ведет к изменению длины эталонного плеча вследствие теплового расширения деталей интерферометра. Кроме того, внешний датчик дает информацию о температуре воды, окружающей прибор. На рис. 4 приведен участок записи вариаций давления, зарегистрированных с использованием лазерного интерферометра, с одновременной регистрацией температуры за тот же период времени.

Проведенные синхронные измерения давления и температуры с помощью интерферометра и температурных датчиков позволили определить величины корректирующих коэффициентов, позволяющих минимизировать влияние температуры на измерения. Функция коррекции показаний включена в программное обеспечение для постобработки данных. График скорректированного давления приведен на рис. 4, *d*.

Итак, разработанный в Тихоокеанском

океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДО РАН гидрофизический аппаратно-программный лазерно-интерференционный комплекс показал высокую эффективность работы своих систем. Использование данного комплекса позволяет решать задачи по изучению амплитудно-фазовых вариаций колебаний и волн гидросферы в низкочастотном диапазоне. Все характеристики нового комплекса значительно улучшены благодаря полученному ранее эксплуатационному опыту. Обеспечены принципиально новые возможности созданного оборудования, так как прибор получил новые датчики для сопутствующих измерений и контейнер, позволяющий работать автономно. Новый измерительный комплекс более прост в эксплуатации, обеспечивает более высокое качество получаемых данных и новые сферы его применения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 14-50-00034, создание гидрофизического измерительного комплекса), ДВО РАН (проект № 15-1-1-043).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Дальнаука, 2009. 202 с.
- [2] Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв 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.
- [3] Долгих Г.И., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.
- [4] Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швеиц В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении баро-деформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82–90.
- [5] Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Швеиц В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 56–57.
- [6] Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швеиц В.А., Яковенко С.В. Морские внутренние волны и атмосферные депрессии // Доклады Академии наук. 2015. Т. 462. № 5. С. 601–604.
- [7] Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Швеиц В.А., Яковенко С.В. Цифровая система регистрации лазерно-интерференционных установок // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 158–159.
- [8] Боуден К. Физическая океанография прибрежных вод. М.: Мир, 1988. 87 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЯКОВЕНКО Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки (ФГБУН) «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» Дальневосточного отделения РАН (ДО РАН) и Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток.

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43

690922, Российская Федерация, г. Владивосток, ОПС Русский-2

ser_mail@poi.dvo.ru

БУДРИН Сергей Сергеевич – научный сотрудник ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» ДО РАН и Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток.

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
690922, Российская Федерация, г. Владивосток, ОПС Русский-2
ss_budrin@mail.ru

ДОЛГИХ Станислав Григорьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» ДО РАН и Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток.

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
690922, Российская Федерация, г. Владивосток, ОПС Русский-2
sdolgikh@poi.dvo.ru

ЧУПИН Владимир Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» ДО РАН и Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток.

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
690922, Российская Федерация, г. Владивосток, ОПС Русский-2
chupin@poi.dvo.ru

ШВЕЦ Вячеслав Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева» ДО РАН и Школы естественных наук Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток.

690041, Российская Федерация, г. Владивосток, Балтийская ул., 43
690922, Российская Федерация, г. Владивосток, ОПС Русский-2
vshv@poi.dvo.ru

Yakovenko S.V., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Chupin V.A., Shvets V.A. HYDROPHYSICAL LASER-INTERFERENCE COMPLEX.

A new hydrophysical measuring complex has been developed on the basis of the laser measuring instrument of hydrosphere pressure variations. The latter was previously engineered and experimentally approbated. The use of this equipment allows solving problems on investigation of the amplitude-phase variations of hydrosphere vibrations and waves in the low-frequency range. All performance data of the complex was considerably improved by virtue of the operating experience obtained previously. Radically new opportunities of the created equipment were provided since the apparatus was rigged with new sensors for accompanying measurements and a container, which allowed working independently. The new hydrophysical measuring complex is easier to operate and maintain, ensures higher quality data obtained and new spheres of its application.

LASER MEASURER, HYDROSPHERE PRESSURE VARIATION, INTERFEROMETER, MEASUREMENT SYSTEM, HYDROSPHERE.

REFERENCES

[1] G.I. Dolgikh, V.E. Privalov, Lazery. Lazernyye sistemy [Lasers, Laser systems]. Vladivostok, Dalnauka, 2009.

[2] G.I. Dolgikh, D.I. Valentin, S.G. Dolgikh, et al., Primeneniye lazernykh deformografov vertikalnoy i gorizontальной orientatsiy v geofizicheskikh issledovaniyakh perekhodnykh zon [Application of lazer deformographs with vertical and horizontal orientation to geophysical studies of transitive zones], Fizika Zemli. (8) (2002) 69–73.

[3] G.I. Dolgikh, S.N. Kovalev, I.A. Koren, et al., Dvukhkoordinatnyy lazernyy deformograf [Two-coordinate lazer deformograph], Fizika Zemli. (11) (1998) 76–81.

[4] G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh, S.N. Kovalev, et al., Lazernyy nanobarograf i yego primeneniye pri izuchenii baro-deformatsionnogo vzaimodeystviy [Lazer barograph and its application for measurement of baro-deformation interactions], Fizika Zemli. (8) (2004) 82–90.

[5] **G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh, S.N. Kovalev, et al.**, Lazernyy izmeritel variatsiy davleniya gidrosfery [Lazer meter of hydrosphere pressure variation], *Pribory i tekhnika eksperimenta*. (6) (2005) 56–57.

[6] **G.I. Dolgikh, S.S. Budrin, S.G. Dolgikh, et al.**, Morskiye vnutrenniye volny i atmosferynye depressii [Sea internal waves and atmospheric depressions], *Doklady Akademii nauk*. 462 (5) (2015) 601–604.

[7] **G.I. Dolgikh, S.N. Kovalev, V.A. Shvets, et al.**, Tsifrovaya sistema registratsii lazerno-interferentsionnykh ustanovok [Digital recording system of lazer-interference setups], *Pribory i tekhnika eksperimenta*. (5) (2008) 158–159.

[8] **K. Bouden**, Fizicheskaya okeanografiya pribrezhnykh vod [Physical oceanography of coastal water], Moscow, Mir, 1988.

THE AUTHORS

YAKOVENKO Sergey V.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Far Eastern Federal University

'Russkiy-2' Postal Service Facility, Vladivostok, 690922, Russian Federation

ser_mail@poi.dvo.ru

BUDRIN Sergey S.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Far Eastern Federal University

'Russkiy-2' Postal Service Facility, Vladivostok, 690922, Russian Federation

ss_budrin@mail.ru

DOLGIKH Stanislav G.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Far Eastern Federal University

'Russkiy-2' Postal Service Facility, Vladivostok, 690922, Russian Federation

sdolgikh@poi.dvo.ru

CHUPIN Vladimir A.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Far Eastern Federal University

'Russkiy-2' Postal Service Facility, Vladivostok, 690922, Russian Federation

chupin@poi.dvo.ru

SHVETS Vyacheslav A.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute

43 Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Far Eastern Federal University

'Russkiy-2' Postal Service Facility, Vladivostok, 690922, Russian Federation

vshv@poi.dvo.ru