

ТРЕБОВАНИЯ К РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛАЗЕРНЫХ ДЕФОРМОМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА МЭС «МЫС ШУЛЬЦА»

Швец В.А., Яковенко С.В.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток
vshv@poi.dvo.ru*

Результаты исследований, полученные при анализе данных лазерно-интерференционных приборов измерительного комплекса морской экспедиционной базы «Мыс Шульца», в течение многих лет представляются в научных работах и на конференциях в России и за рубежом. Они в основном касаются литосферных деформаций, вариаций давления атмосферы и гидросферы и основных закономерностей взаимодействия геосфер [1]. В данной работе мы делаем попытку наиболее полно ответить на два основных типа вопросов, задаваемых по поводу лазерно-интерференционных приборов измерительного комплекса: 1) что измеряют приборы (основной сигнал, виды помех) и 2) способы обеспечения заявленной точности измерения и долговременной работы. На основе этих ответов формулируются требования к условиям работы и требования к работоспособности приборов. Данная работа может быть полезна для исследователей, которые хотели бы использовать данные лазерно-интерференционных приборов для совместного анализа, но не знакомы с их спецификой.

Очень часто в процессе обсуждения на конференциях, семинарах, выступлениях задается вопрос: что измеряет прибор под названием «лазерный деформограф»? Обычно «ответом по умолчанию» на этот вопрос являлся следующий: это измерительный прибор на основе лазерного интерферометра Майкельсона, установленный на два бетонных основания, на одном из которых установлен интерференционный узел, опорное плечо интерферометра и источник когерентного излучения (лазер), а на другом – уголкового отражатель измерительного плеча. Лазерный деформограф предназначен для измерения относительных деформаций земной коры в месте установки путем измерения оптической разности хода измерительного и опорного лучей интерферометра.

В зависимости от условий измерения вид графика измеряемой деформации может существенно отличаться. Ниже предлагается уточнение названия «лазерный деформограф» и деление его на три различных типа: 1) лазерный интерферометр, 2) лазерный деформометр и 3) лазерный измеритель относительных деформаций земной коры.

Дадим общее описание для каждого из них.

1. Интерферометр. Принцип действия интерферометра заключается в следующем: пучок когерентного электромагнитного излучения (света, радиоволн и т. п.) с помощью того или иного устройства пространственно разделяется на два или большее число. (Здесь мы рассмотрим только случай двух пучков). Каждый из пучков проходит различные оптические пути и направляется на экран (или фотоприемник), создавая интерференционную картину, по которой можно установить разность фаз интерферирующих пучков в данной точке картины.

В общем случае интерферометр фиксирует разность фаз, которая вызывается не только изменениями состояния исследуемого объекта, но и всей совокупностью изменений параметров окружающей среды. Измерительный прибор, называемый «лазерный деформограф», построенный на базе неравноплечего интерферометра Майкельсона, в котором не обеспечена термоизоляция, достаточная степень шумоизоляции, а также не исключено влияние атмосферы на когерентные пучки, по сути, представляет собой самый общий случай интерферометра.

Приведенному в абзаце выше описанию соответствует установка, называемая «лазерным деформографом», не имеющая, по сути, термоизоляции; с трубами лучевода, которые не обеспечивают герметичности от атмосферы; установленная в поверхностном или незначительно углубленном варианте.

Изменения разности хода лучей в этом «лазерном деформографе», который фактически представляет собой интерферометр с длинным (десятки метров) измерительным плечом, качественно представляют из себя вариации атмосферного давления с добавлением температурного воздействия.

2. Лазерный деформометр. Еще один тип приборов, называемый «лазерным деформографом», имеет в широком круге источников название «лазерный деформометр». Его измерительная

часть также построена на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона. Качественным отличием лазерного деформометра от простого интерферометра является то, что за счет термоизоляции помещения, герметизации или вакуумирования трубы-лучевода измерительного плеча, пространственного разнесения источника когерентного излучения (лазера), который существенно нагревает окружающее пространство и детали интерферометра, удастся в значительной степени исключить непосредственное влияние температуры и атмосферы на оптические и механические элементы измерительной установки и, как следствие, на измеряемую разность хода. Например, лазерный деформометр может регистрировать низкочастотные колебания, очевидно связанные с внешней температурой, но при этом изменения температуры непосредственно в помещении, где установлен лазерный деформометр, могут не превышать величины 5 – 10 мК. То есть, измеряется разность хода, вызванная только деформация участка земной коры под воздействием различных факторов (температура, давление, приливная деформация, естественные процессы деформации). В зарубежной литературе такие приборы называются *laser deformometer*.

3. Лазерный измеритель относительных деформаций земной коры. В зарубежной литературе для установок данного типа применяется название *strainmeter* (от *strain* – напряжение). График деформации земной коры обычно дается в стрейнах – относительных единицах, обозначаемых буквой ε :

$$\varepsilon = \Delta L/L$$

Здесь L – это длина измерительного плеча, а величина деформации в стрейнах равна отношению деформации на участке земной коры к L . Наиболее часто применяемой единицей измерения является нанострейн (н ε).

Обязательным условием отнесения лазерного измерителя именно к типу *strainmeter* является наличие выходного сигнала, который с высокой точностью пропорционален теоретическому приливу литосферы в данной местности на временном отрезке не менее недели. Если же выходной сигнал установки (изменения разности хода лучей) несет в себе значительную часть температурной деформации (заметны суточные колебания внешней температуры), или если на фоне температурных колебаний вообще без обработки

невозможно различить приливы, то такие установки в зарубежных источниках называются laser deformometer.

В отечественных источниках обычно не делается разделения лазерных деформометров на типы laser deformometer и strainmeter. Оба эти типа называются лазерными деформометрами, а их отличия представлены в описании характеристик и виде выходного сигнала. Но при этом при переводе на английский язык словосочетание «лазерный деформометр» переводится как «laser strainmeter», что предполагает вполне конкретные черты установки типа laser strainmeter и характерный вид выходного сигнала, который является лишь немного искаженным сигналом теоретического литосферного прилива и идентифицируется без всякой обработки.

При анализе данных лазерный измеритель относительных деформаций земной коры (strainmeter) предварительно считается исправным при выполнении следующих условий:

- 1) Ненулевой выходной сигнал (или не прямая линия).
- 2) Отсутствие постоянного линейного тренда.
- 3) Пропорциональность выходного сигнала теоретическому приливу в данной местности на временных интервалах единицы дней – неделя.

Подобная классификация лазерных измерителей деформации земной коры близка к приводимой в [2] и других.

Далее сформулируем требования по работоспособности лазерного деформометра по аналогии с лазерным измерителем относительных деформаций земной коры, имея в виду, что лазерно-интерференционные приборы морской экспедиционной станции «Мыс Шульца» представляют собой именно деформометры с газонаполненным лучеводом измерительного плеча.

Обеспечение точности измерений.

В качестве источника света используется частотно-стабилизированный He-Ne лазер. Чувствительность лазерного деформографа $10^{-9} - 10^{-10}$ м/м, точность измерения $- 10^{-9} - 10^{-10}$ м. Контроль внешних метеоусловий ведется двумя метеостанциями, регистрирующими температуру воздуха и почвы с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление с точностью $0,1$ гПа, скорость и порывы ветра с точностью до $0,01$ м/с. Датчики температуры в термоизолированном помещении и внутри негерметизированного лучево-

да имеют разрешение $0,01^{\circ}\text{K}$, давления – $0,1$ Па. Для достижения чувствительности $\Delta L/L = 10^{-10}$ (где L – длина измерительного плеча деформографа) требуется суточная стабильность температуры порядка $0,05^{\circ}\text{K}$ в случае, если лучевод измерительного плеча вакуумирован. Если лучевод заполнен воздухом, требуется надежная его герметизация и обеспечение суточных изменений температуры помещения, где расположен деформограф, не более 2 мК. Внутри лучевода без вакуума обязательно устанавливаются датчики температуры и давления с высокой разрешающей способностью для последующего учета ошибки измерения, вызванной изменениями коэффициента преломления воздуха в лучевode.

Измеряемая деформация.

В большинстве случаев можно принять, что суммарная измеряемая лазерным деформометром литосферная деформация $\varepsilon(t)$ равна:

$$\varepsilon(t) = k_{\text{пп}}\varepsilon_{\text{пп}}(t) + k_T T(t) + k_p p(t) + k_h \varepsilon_h(t) + \varepsilon_r(t),$$

где $\varepsilon_{\text{пп}}(t)$ – расчетная приливная деформация, $T(t)$ – изменения внешней температуры, $p(t)$ – изменения атмосферного давления, $\varepsilon_h(t)$ – изменения водно-физического состояния горных пород в месте установки деформографа, $\varepsilon_r(t)$ – деформация, вызванная подъемом или опусканием данного участка земной коры (тренд), индекс r от residual – остаточный, оставшийся после вычитания, $k_{\text{пп}}$, k_T , k_p , k_h – соответствующие коэффициенты.

Рассмотрим более детально слагаемые $\varepsilon(t)$. В слагаемом $k_h \varepsilon_h(t) + \varepsilon_r(t)$ в многолетних исследованиях наибольший интерес представляет $\varepsilon_r(t)$, который стараются определить наиболее точно. Слагаемое $\varepsilon_h(t)$ часто имеет сезонную зависимость или может резко кратковременно меняться вследствие землетрясений и горных ударов. Литосферная деформация существенно отстает по времени от изменений температуры и давления, задержка может составлять от десятков часов до недель. Слагаемые $T(t)$ и $p(t)$ представляют собой температуру и давление, взятые с учетом этой задержки. Так же отметим, что для вычисления термо- и бародеформационного коэффициентов используются массивы данных длиной до 40–60 суток, в течение которых не было близких к месту расположения измерительного комплекса сейсмических событий, способных существенно повлиять на величины k_T , k_p , и k_h .

Как уже говорилось выше, основной вклад в измеряемую лазерным деформометром деформацию вносит температура. Влияние атмосферного давления же крайне мало, и если оно наблюдается в сигнале деформации, регистрируемом электронной аппаратурой, то это говорит о неисправности – разгерметизации лучевода измерительного плеча.

В целом, при анализе данных лазерного деформометра относительных деформаций земной коры (laser deformometer) считается исправным при выполнении следующих условий:

- 1) Ненулевой выходной сигнал (или не прямая линия).
- 2) Отсутствие постоянного линейного тренда.
- 3) Очевидная зависимость измеряемой деформации от температуры воздуха (почвы), причем с задержкой 2 часа и более.
- 4) Отсутствие схожести качественного вида графиков деформации и атмосферного давления (их схожесть говорит о разгерметизации).
- 5) Отсутствие резкого нарастания измеренной деформации в случае осадков (неработоспособность дренажа).

В качестве наиболее яркого примера неисправности лазерного деформометра приведены графики рисунка 1.

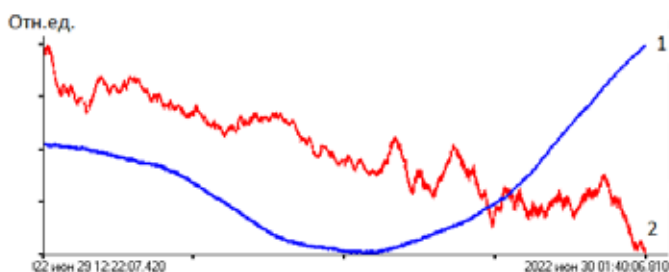


Рис. 1. Деформация, измеренная исправным лазерным деформометром (1) и лазерным деформометром с негерметичным лучеводом измерительного плеча (2)

Работа выполнена по теме госзадания «Изучение природы линейного и нелинейного взаимодействия геосферных полей переходных зон Мирового океана и их последствий», регистрационный номер: 124022100074-9, и при частичной финансовой поддержке гранта № 075-15-2024-642 «Исследование процессов и закономер-

ностей возникновения, развития и трансформации катастрофических явлений в океанах и на континентах методами сейсмоакустического мониторинга».

Литература

1. Яковенко С.В., Будрин С.С., Долгих С.Г., Плотников А.А., Чупин В.А., Швец В.А. Лазерно-интерференционная система «приморье - о. Сахалин» // Метрология. 2015. № 1. С. 28-31.
2. Duncan C. Agnew, Frank K. Wyatt. Long-Base Laser Strainmeters: A Review // Scripps Institution of Oceanography Scripps Institution of Oceanography Technical Report (University of California, San Diego) Year 2003, Paper 2.