

**А.В. Давыдов, Г.И. Долгих**

## **ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНЫМИ ДЕФОРМОГРАФАМИ**

Проведена оценка чувствительности лазерных деформографов неравноплечего и равноплечего вариантов различных модификаций с учетом ошибок измерений, вызванных: 1) стабильностью частоты лазера; 2) вариациями влажности, температуры, давления; 3) шумом фотоэлектронной аппаратуры. Теоретически и экспериментально показано, что для повышения чувствительности деформографов их опоры необходимо устанавливать на среды с различными характеристиками и использовать маятниковые системы. Приведены некоторые результаты коррелированных измерений на двух разнесенных (250 км) лазерных деформографах.

### **Введение**

В 1979 г. под руководством д. ф.-м.н. У.Х. Копвиллема в Тихоокеанском океанологическом институте (ТОИ) ДВНЦ АН СССР был создан лазерный деформограф, который был одним из первых приборов такого типа в СССР. Хотя в настоящее время в ТОИ ДВО РАН лазерные деформографы работают на другой электронной и оптико-механической основе, с полным изменением принципа работы, несомненно огромная заслуга У.Х. Копвиллема в проведении пионерских работ по созданию и изучению возможностей данных установок в СССР.

С помощью современных лазерных деформографов проводятся измерения смещений земной коры с точностью до  $10^{-10}$  м в диапазоне частот  $0 \div 10^3$  Гц. Все существующие лазерные деформографы можно разделить на два класса – деформографы равноплечего и неравноплечего типов. С 1979 г. в Тихоокеанском океанологическом институте проведен большой объем работ по изучению возможности применения приборов неравноплечего и равноплечего типов при различных исследованиях с использованием модифицированного интерферометра Майкельсона. Сравнение данных в диапазоне  $0 \div 10^3$  Гц, полученных на деформографах равноплечего и неравноплечего вариантов, установленных на мысе Шульц, показало:

- а) чувствительность деформографов идентична при проведении измерений на частотах  $1 \div 10^3$  Гц;
- б) чувствительность неравноплечего деформографа выше чувствительности равноплечего на частотах менее 1 Гц при расположении приборов на однородной основе;
- в) использование дифференциальных свойств среды при размещении устоев деформографа позволяет значительно поднять чувствительность деформографов в низкочастотном диапазоне;
- г) размещение отражателя деформографа на частично демпфированной маятниковой системе значительно повышает чувствительность деформографов в высокочастотном диапазоне;
- д) при идеальном выполнении пп. <в> и <г> лазерные деформографы практически измеряют абсолютные смещения и чувствительность равноплечих и неравноплечих приборов выравнивается.

В изучении сейсмоакустических процессов большое значение имеет выбор местности для проведения экспериментов. Переходная зона океан–материк имеет блоковую, нерегулярную сейсмически активную структуру, в которой наблюдаются не только резонансное усиление известных сигналов, но и другие явления линейной и нелинейной природы. Использование лазерных деформографов, в частности в Приморском крае, позволило частично изучить структуру переходной зоны, ее спектральные характеристики, усиление слабых сигналов искусственного и естественного происхождения. Кроме того, с помощью данных деформографов проводится изучение сейсмоакустических процессов океанического происхождения, их трансформация на границе гидросфера–литосфера.

## Технические характеристики и возможности использования лазерных деформографов равноплечего и неравноплечего вариантов

Исследователи, работающие над созданием и использованием лазерных деформографов и стремящиеся повысить их чувствительность, должны уделить особое внимание: 1) стабильности частоты лазера, 2) учету и уменьшению шумов фотоэлектронной аппаратуры, 3) температурным, барическим и прочим воздействиям, 4) конструктивным особенностям и расположению приборов.

В соответствии с вышеизложенным рассмотрим учет данных факторов при эксплуатации лазерных деформографов равноплечего и неравноплечего типов.

1. Стабильность частоты лазера. С 1979 по 1988 г. проводились исследования по изучению сейсмоакустических процессов 105-метровым лазерным деформографом равноплечего типа ОКГ-13, ЛГ-78 без принудительной стабилизации частоты. Оценим величину шумов, связанных с нестабильностью частоты лазерного излучения  $\Delta\nu/\nu_0$ . Расстояние между основными типами колебаний лазера определим как

$$\Delta\nu = c / 2nL, \quad (1)$$

где  $c$ —скорость света;  $nL$ —длина оптического пути между зеркалами. При длине резонатора лазера порядка 20 см  $\Delta\nu=7,5 \cdot 10^8$  Гц. Рассмотрим, сколько мод укладывается за счет эффекта Доплера гелий-неонового лазера с длиной резонатора  $L=20$  см. Найдем доплеровскую полуширину

$$\Delta\nu = \frac{2\nu_0}{c} \left( \frac{2kT \ln 2}{M} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\nu_0$  — частота в центре линии;  $k$ —постоянная Больцмана;  $M$ —масса атома в атомных единицах;  $T$ —температура. Если предположить, что атомная температура порядка 500 К, то для гелий-неонового лазера, работающего на длине волны 6328 Å, ширина линии неона, уширенная за счет эффекта Доплера, составляет примерно 1700 МГц. Таким образом, на данной ширине укладываются две моды, соответствующие двум осевым типам колебаний, то есть при данном гелий-неоновом лазере предельная минимальная стабильность частоты определяется величиной межмодового перехода и равна

$$\Delta\nu_D = 1700 \text{ МГц}. \quad (3)$$

Дрейф частоты в газовых лазерах вызывается, в основном, механическими или тепловыми нестабильностями оптической длины резонатора  $nL$ . Этими причинами будет определена реальная нестабильность рабочего лазера. Определим нестабильность соотношением

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta(nL)}{nL}. \quad (4)$$

Полагая временную зависимость  $nL$  в течение  $\tau_0$  линейной, получим

$$\frac{\Delta\lambda(\tau_0)}{\lambda} = \frac{\tau_0}{nL} \frac{d(nL)}{dt}. \quad (5)$$

Зависящее от времени изменение длины составного цилиндра лазера можно определить по коэффициентам теплового расширения первого порядка материалов лазера. Коэффициент теплового расширения инвара равен  $5 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>. Расширение цилиндра лазера

$$dL = \alpha_{\text{и}} L dT \text{ или } \alpha_{\text{и}} = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}. \quad (6)$$

Нестабильность длины волны лазера при этом равна

$$\frac{\Delta\lambda(\tau_0)}{\lambda} = \frac{\tau_0 n \alpha_u L dT}{n L dT} = \tau_0 \alpha_u \frac{dT}{dt} = 5 \cdot 10^{-8}, \quad (7)$$

$\tau_0$  – временной промежуток измерения порядка 120 часов, а скорость температурных изменений равна

$$\frac{dT}{dt} = \pm 0,1 \text{ град}/[\tau_0]. \quad (8)$$

Выражение (8) можно записать и через  $\Delta v/v$  с учетом  $\tau_0$  и  $dT/dt$ :

$$\frac{\Delta v}{v} = 5 \cdot 10^{-8}. \quad (9)$$

Изменения показателя преломления среды между разрядной трубкой лазера и внешними зеркалами обусловлены вариациями температуры  $T$ , давления  $P$  и влажности  $h$ . Снова, учитывая коэффициенты только первого порядка, при  $T = 293^\circ\text{K}$ ,  $P = 760$  Торр,  $h = 8,5$  Торр и  $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-6}$  м, находим значения соответствующих коэффициентов

$$\beta_T = \frac{1}{n} \frac{dn}{dT} = -0,3 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}; \quad (10)$$

$$\beta_P = \frac{1}{n} \frac{dn}{dP} = 3,6 \cdot 10^{-7} \text{ Торр}^{-1}; \quad (11)$$

$$\beta_h = \frac{1}{n} \frac{dn}{dh} = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Торр}^{-1}. \quad (12)$$

Эти соотношения применимы к части длины резонатора  $g$  (допустим  $g=0,8$ ), не занятой разрядной трубкой. Пусть внутри резонатора лазера параметры воздуха изменяются со скоростями  $dT/dt=0,1^\circ/(\text{период измерений})$  и  $dh/dt=0,5$  Торр/(период измерений), тогда

$$\left( \frac{\Delta\lambda_L(\tau)}{\lambda_L} \right)_{n(T)} = g \tau \beta_T \frac{dT}{dt} = \pm 7,4 \cdot 10^{-8}; \quad (13)$$

$$\left( \frac{\Delta\lambda_L(\tau)}{\lambda_L} \right)_{n(P)} = g \tau \beta_P \frac{dP}{dt} = \pm 8,6 \cdot 10^{-8}; \quad (14)$$

$$\left( \frac{\Delta\lambda_L(\tau)}{\lambda_L} \right)_{n(h)} = g \tau \beta_h \frac{dh}{dt} = \pm 2,28 \cdot 10^{-8}. \quad (15)$$

Таким образом, стабильность частоты лазера (в пренебрежении расширением брьюстеровских окон на концах разрядной трубки и изменением показателя преломления плазмы) равна

$$\left( \frac{Dl_L}{l_L} \right)_{\text{полн}} = \pm \{(5)^2 + (7,4)^2 + (8,6)^2 + (2,28)^2\}^{1/2} \cdot 10^{-8} = 1,26 \cdot 10^{-8}. \quad (16)$$

Относительное смещение устоев деформографа

$$\Delta l / l = -(\Delta\lambda / \lambda). \quad (17)$$

При уравнивании плеч интерферометра лазерного деформографа равноплечего варианта с точностью  $10^{-2}$  мы можем измерять смещение интерференционной картины  $\Delta l$  при вышеуказанной стабильности частоты лазера с точностью  $\Delta l = 1,26 \cdot 10^{-9}$  м. Применяемые методы интерферометрии в деформографах равноплечего и неравноплечего вариантов нашей конструк-

ции позволяют измерять смещение доли интерференционной полосы с точностью  $\lambda/2 \cdot 10^{-3}$ , где  $\lambda$  – длина волны гелий-неонового лазера.

С 1989 г. в ТОИ ДВО РАН проводятся исследования сейсмоакустических колебаний с помощью 52,5-метрового лазерного деформографа неравноплечего варианта. В 1991 г. проведены одновременные измерения на двух разнесенных лазерных деформографах неравноплечего варианта с длинами плеч 52,5 м и 10,5 м, расположенных на удалении в 250 км друг от друга. В этих деформографах применяются частотно-стабилизированные лазеры ЛГН-303, имеющие долговременную стабильность  $10^{-8}$  при медленном изменении температуры в пределах  $\pm 10$  К. При вариациях температуры в пределах 0,1 К стабильность частоты лазера улучшается на 1–2 порядка. В некоторых случаях используется лазер ЛГН-303 М со стабильностью частоты на 1 порядок выше, чем у лазера ЛГН-303. Таким образом, при вышеуказанной стабильности частоты лазеров ЛГН-303 и ЛГН-303 М, мы можем измерять смещение устоев деформографа с длиной плеча 52,5 м с точностью

$$\Delta l = -l \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 5,2 \cdot 10^{-8} \div 5,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad (18)$$

а деформографа с длиной плеча 10,5 м с точностью

$$\Delta l = -l \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 1,05 \cdot 10^{-8} \div 1,05 \cdot 10^{-9} \text{ м}. \quad (19)$$

2. Шумы фотоэлектронной аппаратуры. В процессе конструирования лазерных деформографов при установке фотоприемника необходимо делать выбор между фотоумножителем и фотодиодом. В связи с этим оценим шумы стандартного фотоумножителя и фотодиода (например, ФЭУ-77 и ФД 24К). Измерение слабого переменного оптического сигнала в лазерном интерферометре производится на фоне большой постоянной засветки. В этом случае предельный порог чувствительности определяется не темновыми шумами фотоприемника, а дробовым шумом. Отношение средней квадратической величины дробового шума фотоумножителя  $K_{\phi}$  к средней квадратической величине дробового шума фотодиода  $K_{д}$  равно

$$S = \frac{K_{\phi}}{K_{д}} = \left[ \frac{2(1 + \beta) \Delta f \hbar \nu}{P_{\phi} \eta_{д}} \right]^{1/2} \left[ \frac{2 \Delta f \hbar \nu}{P_{\phi} \eta_{д}} \right]^{1/2}, \quad (20)$$

где  $\beta$  – величина, обусловленная вторичной эмиссией электронов, обычно равна 1,5;  $\Delta f$  – полоса воспроизведения частот;  $\hbar$  – постоянная Планка;  $\nu$  – частота света;  $P_{\phi}, P_{д}$  – мощности засветки фотокатодов;  $\eta_{\phi}, \eta_{д}$  – их квантовая эффективность. При  $\eta_{д} = 0,6$ ;  $P_{д} = 10^{-2}$  Вт;  $\eta_{\phi} = 8 \cdot 10^{-3}$   $P_{\phi} = 7,3 \cdot 10^{-4}$  Вт,  $S \approx 50$ . Таким образом, выбор в качестве фотоприемника фотодиода ФД 24К в системе лазерного деформографа обусловлен вышеизложенным.

Интенсивность излучения  $I$ , попадающего на фотодиод, описывается следующим выражением:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left[ \frac{4\pi(L_2 - L_1)}{\lambda} \right], \quad (21)$$

где  $I_1, I_2$  – интенсивности интерферирующих лучей;  $L_1, L_2$  – длины плеч интерферометра;  $\lambda$  – длина волны гелий-неонового лазера. При  $I_1 = I_2$

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{2\pi l}{\lambda}, \quad (22)$$

где  $2l = 2(L_2 - L_1)$  – разность оптических путей интерферирующих лучей.

Согласно (22), величина силы тока на выходе фотоприемника равна

$$i = i_0 \cos^2 \frac{2\pi l}{\lambda}, \quad (23)$$

где  $i_0 = 4I_0\chi$ ;  $\chi$  – чувствительность фотоприемника. Из (23) следует, что изменение силы тока будет вызываться изменением оптической разности плеч интерферометра  $l$  и изменением длины волны  $\lambda$ . Кроме того, появляются шумовые составляющие тока, связанные с шумом фотоэлектронной аппаратуры  $\Delta i_1$  и стабильностью мощности лазерного излучения  $\Delta i_2$ . Дифференцируя (23) по  $l$  и  $\lambda$  и добавляя  $\Delta i_1$  и  $\Delta i_2$  получим:

$$\Delta i = i_0 \sin\left(\frac{4\pi l}{\lambda}\right) \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} l \pm \frac{2\pi l}{\lambda^2} \Delta\lambda \right\} \pm \Delta i_1 \pm \Delta i_2. \quad (24)$$

Наибольшее значение  $\Delta i$  достигается при  $\frac{4\pi l}{\lambda} = \frac{\pi}{2}$  и

$$\Delta l = \frac{\Delta i}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi} \pm l \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \pm \frac{\Delta i_1}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi} \pm \frac{\Delta i_2}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (25)$$

где  $\frac{\Delta i}{i_0} \frac{\lambda}{2\pi}$  – сейсмоакустические колебания, а остальные слагаемые – шумы. Шумы, связанные с нестабильностью частоты лазерного излучения  $\Delta\lambda/\lambda$ , рассмотрены выше. В серийных гелий-неоновых лазерах уровень относительных флуктуаций мощности обычно составляет несколько процентов, т.е.  $\Delta i_2/i_0 \approx 10^{-2}$ . Следовательно, порог чувствительности измерения ограничивается величиной порядка  $10^{-9}$  м.

Оценим порог чувствительности, определяемый дробовым шумом фотоприемника. Предельная чувствительность к абсолютным смещениям зеркал в интерферометре Майкельсона, ограниченная только дробовым шумом фотоприемника, определяется выражением [1, 2]:

$$\Delta l_{\min} = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{\lambda \hbar c \Delta f}{q P_0} \right\}^{1/2}, \quad (26)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $P_0$  – мощность лазерного излучения;  $c$  – скорость света;  $\Delta f$  – полоса принимаемых частот;  $q$  – квантовый выход фотоприемника. Полагая  $P_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  Вт,  $q = 0,25$ ;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;  $\lambda = 0,63 \cdot 10^{-6}$  м;  $\hbar = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, имеем

$$\Delta l_{\min} = 1,78 \cdot 10^{-15} \sqrt{\Delta f} \text{ м/Гц}^{1/2}. \quad (27)$$

При  $\Delta f \sim 10^3 \div 10^4$  Гц  $\Delta l_{\min} = 1,78 \cdot 10^{-13}$  м, что не оказывает влияния на точность измерения.

3. Температурные, барические и прочие воздействия. На рис. 1 приведена блок-схема лазерного деформографа, реализация которого возможна в двух вариантах: равноплечем, когда оптические пути от полупрозрачного зеркала 8 к отражателям 1 и 2 и обратно равны; и неравноплечем, когда отражатель 2 убирается, а зеркало 10 устанавливается к зеркалу 9 под углом  $90^\circ$  и отраженный луч от зеркала 10 попадает в точку 8 полупрозрачного зеркала. Зеркала 9 и 10 прикреплены к пьезокерамическим цилиндрам. На пьезокерамику зеркала 9 подается раскачка частотой 25 кГц, а на пьезокерамике 10 замыкается обратная связь системы регистрации, т.е. подается сигнал обработки.

Плоскопараллельные зеркала 9, 10 прикреплены на пьезокерамических цилиндрах высотой  $10^{-2}$  м. Толщина зеркал –  $2 \cdot 10^{-3}$  м. Максимальная ошибка при колебаниях температуры  $\pm 0,1^\circ\text{К}$  в измерении смещения при этом составит значение  $\Delta l = \pm 0,2 \cdot 10^{-8}$  м. Ошибка в измерениях, вызванная колебаниями длины инваровой пластины, на которой укреплены зеркала 9, 10, может составлять величину  $\Delta l = \pm 0,2 \cdot 10^{-8}$  м.

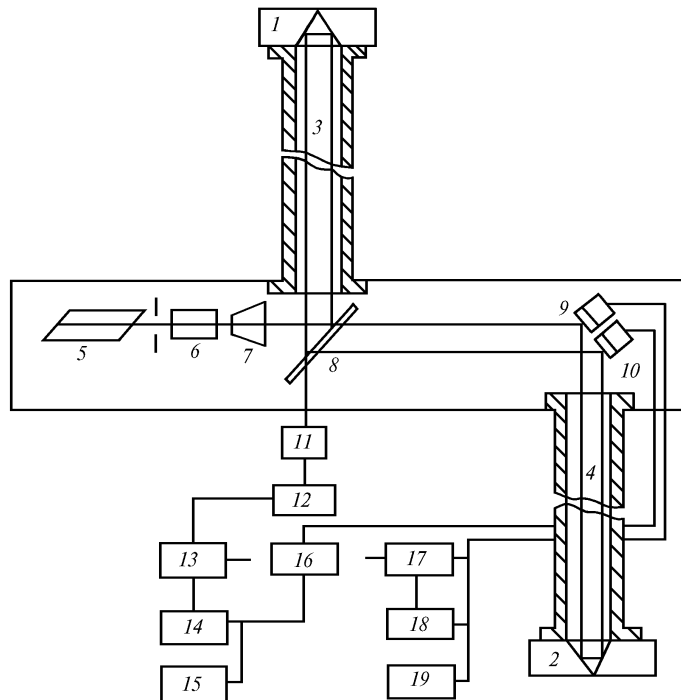


Рис. 1. Блок-схема лазерного деформографа: 1, 2 – уголкового отражатели; 3, 4 – стальной световод; 5 – лазер; 6 – оптический затвор; 7 – коллиматор; 8 – полупрозрачная пластинка; 9, 10 – плоско-параллельные зеркала; 11 – фотодиод; 12 – резонансный усилитель; 13 – синхронный детектор; 14 – линия задержки; 15 – генератор опорной частоты; 16 – усилитель мощности; 17 – дифференциальный интегральный усилитель; 18 – система сброса уровня; 9 – регистрирующая аппаратура

Суммарная ошибка, обусловленная изменением температуры, давления, влажности в воздушных промежутках интерферометра, равна  $\Delta l = \pm 1,1 \cdot 10^{-9}$  м. При работе на любом деформографе с воздушнонаполненным либо откачанным трубопроводом необходимо поддерживать давление в трубе с точностью  $\Delta P = 2 \cdot 10^{-10} / 0,4 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-4}$  мм. рт. ст. для обеспечения чувствительности  $\Delta l/l \sim 2 \cdot 10^{-10}$ . Вариации давления в трубе ( $10^{-4}$  мм рт. ст.) с запасом обеспечивают необходимую точность измерений. Оценим температуру, которая не будет влиять на точность измерений при  $P = 10^{-4}$  мм рт. ст. и  $\varepsilon = \delta l/l = 2 \cdot 10^{-10}$ ;  $\delta l/l = \alpha n_T = 2 \cdot 10^{-10} \Delta T$ ;  $\Delta T = \delta l / (l \cdot 2 \cdot 10^{-6}) = 1$  град. Сохранение температуры, равной  $\text{const} \pm 0,1^\circ\text{K}$ , дает возможность исключить влияние этой ошибки на точность измерений.

При использовании вакуумированного трубопровода изменение длины трубы, которая служит вакуумной камерой, вследствие колебаний температуры также приводит к изменению длины оптического пути, поскольку при удлинении трубы некоторый отрезок пути в воздухе заменяется таким же отрезком в вакууме. Изменение температуры на  $10^{-2}$  град приводит к изменению длины оптического пути на  $\Delta l = \Delta l_0(n - n_0)$ , где  $\Delta l$  – изменение длины трубы (если труба из нержавеющей стали  $\delta l_0 = \alpha l \Delta T = 5,5 \cdot 10^{-6}$  м), а  $(n - n_0)$  – разность показателей преломления воздуха и вакуума. Это означает, что изменение  $\Delta l$  длины оптического пути составляет  $5,5 \cdot 10^{-10}$  м. Как видно, и эта помеха не влияет на точность измерений.

Изменение длины трубы вследствие изменения атмосферного давления будет

$$\Delta l = \Delta F / AY, \quad (28)$$

где  $\Delta F$  – изменение силы атмосферного давления на конце трубы, обусловленное изменением атмосферного давления;  $l$  – длина трубы (52,5 и 10,5 м);  $A$  – площадь сечения стенок трубы;  $\Delta F = \pi r^2 \Delta P$ ,  $r$  – радиус трубы,  $\Delta P$  – изменение атмосферного давления. Поскольку  $\Delta F = 3,14 \cdot 10^6$  дин,  $l = 5 \cdot 10^3$  см (или  $1 \cdot 10^3$  см),  $A = 19$  см<sup>2</sup>,  $Y = 2 \cdot 10^{11}$  н/м<sup>2</sup>, то  $\Delta l = \pi r^2 \Delta P / AY$  и, следовательно,  $\Delta l = 5,7 \cdot 10^{-10}$  м (или  $\Delta l = 1,1 \cdot 10^{-10}$  м).

При уравнивании длин плеч равноплечего лазерного деформографа с точностью  $10^{-2}$  м, что достигается механическими и электронно-оптическими методами, общая ошибка составит величину  $\Delta l = 0,7 \cdot 10^{-8}$  м при промежутках измерения порядка 100 часов. А общая ошибка неравноплечих приборов с длиной плеча 52,5 и 10,5 м составит соответственно  $0,8 \cdot 10^{-8}$  м. Необходимо заметить, что вариации температуры в термоизолированных камерах меньше 0,1 К и вызваны, в основном, многосуточными температурными колебаниями. При изучении сейсмоакустических колебаний в диапазоне  $10^{-4} \div 10^3$  Гц ошибка измерений на 1–2 порядка меньше и точность измерения, соответственно, увеличивается.

4. Специфика конструкции и установки деформографа. Рассмотрим отклик среды, в которой расположен лазерный деформограф, на распространяющуюся в ней сейсмоакустическую волну. Для деформографа равноплечего и неравноплечего вариантов, плечи которых направлены вдоль оси  $z$ , измеряемое смещение равно

$$\Delta U = 2U^{(2)} - U^{(1)} - U^{(3)}, \quad (29)$$

где  $U^{(1)} = A e^{-i\alpha_1 z} e^{i(\xi x - \omega t)}$ ;  $U^{(2)} = A e^{-i\alpha_2(z+L^*)} e^{i(\xi x - \omega t)}$ ;  $U^{(3)} = A e^{-i\alpha_2(z+L^*+L)} e^{i(\xi x - \omega t)}$ ;  $\alpha_i = k_i \cos \theta_i$ ,  $k_i = 2\pi/\lambda_i$ , ( $i = 1, 2, 3$ );  $L^* \ll L$  – в случае деформографа неравноплечего варианта;  $\theta_i$  – угол падения;  $\lambda_i$  – длина волны в среде;  $\xi = k_1 \sin \theta_1 = k_2 \sin \theta_2 = k_3 \sin \theta_3$ . Ниже сравним деформограф равноплечего ( $L = L^* = 50$  м) и неравноплечего ( $L^* = 0,1$  м;  $L = 50$  м) вариантов в различных средах.

Рассмотрим однородную среду. В этом случае  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$ ;  $k_1 = k_2 = k_3$ ;  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$ ;  $c_1 = c_2 = c_3 = 3$  км/с. Как видно из уравнения (29), для деформографов равноплечего и неравноплечего вариантов, расположенных на одной однородной среде, измеряемые смещения сильно различны в низкочастотном диапазоне ( $f > 1$  Гц) при одной и той же падающей волне. То есть чувствительность лазерного деформографа неравноплечего варианта значительно выше чувствительности деформографа равноплечего варианта на частотах  $10^{-2} \div 10^{-4}$  Гц. В высокочастотном же диапазоне чувствительность соизмерима или чуть меньше чувствительности лазерного деформографа равноплечего типа.

Далее, в соответствии с [3], рассмотрим два граничащих упругих пространства с различными плотностями ( $\rho_1$  и  $\rho_2$ ) и скоростями продольных ( $c_1$  и  $c_2$ ) и поперечных ( $b_1$  и  $b_2$ ) волн. Пусть в упругом полупространстве с большими  $\rho$  и  $c$  распространяется волна под некоторым углом  $\theta$  к границе раздела. Ось  $z$  направим перпендикулярно границе навстречу падающей волне, а ось  $x$  – вдоль границы. Тогда согласно [3] имеем систему уравнений для потенциалов продольных ( $\phi$ ) и поперечных ( $\psi$ ) волн в полупространствах 1 и 2:

$$\begin{cases} \phi = \phi' e^{-i\alpha z} e^{i(\xi x - \omega t)} + \phi'' e^{-i\alpha z} e^{i(\xi x - \omega t)}, \\ \psi = \psi' e^{-i\beta z} e^{i(\xi x - \omega t)}, \end{cases} \quad (30)$$

$$\begin{cases} \phi_1 = \phi_1'' e^{-i\alpha_1 z} e^{i(\xi x - \omega t)}, \\ \psi_1 = \psi_1'' e^{-i\beta_1 z} e^{i(\xi x - \omega t)}. \end{cases} \quad (31)$$

Решение проводим с граничными условиями  $[z_z] = 0$ ,  $[z_x] = 0$ ,  $[U_x] = 0$ ,  $[U_z] = 0$ , где  $z_z$ ,  $z_x$  – компоненты тензора напряжений. В общем случае смещение  $\mathbf{U}$  можем найти из соотношения, связывающего скалярный  $\phi$  и векторный  $\psi$  потенциалы

$$\mathbf{U} = \text{grad } \phi + \text{rot } \psi. \quad (32)$$

Из решения уравнений (30)–(32) с граничными условиями имеем для отношения смещений вдоль оси  $z$  в первой и второй средах соотношение

$$\frac{U^{(1)}}{U^{(2)}} = \frac{c_1}{c W_{11}}. \quad (33)$$

При решении уравнений (30)–(33) находим соотношения, связывающие  $\varphi'$ ,  $\varphi''$ ,  $\psi'$ ,  $\varphi_1''$ ,  $\psi_1''$ . Рассмотрим среды со следующими характеристиками:  $\rho_1 = 2,7 \text{ г/см}^3$ ;  $c_1 = 6 \text{ км/с}$ ;  $\rho_2 = 1,5 \text{ г/см}^3$ ;  $c_2 = 1,5 \text{ км/с}$ ;  $b_1 = 3,5 \text{ км/с}$ ;  $b_2 = 0,875 \text{ км/с}$ . Для деформографа неравноплечего варианта ( $L_1=50 \text{ м}$ ,  $L_2^*=0,1 \text{ м}$ ) и угле падения волны  $\theta = 0^\circ$  (два устоя, расстояние между которыми  $L^* = 0,1 \text{ м}$ , опираются на среду с характеристиками  $\rho_1$ ,  $c_1$ ,  $b_1$ , а третий – на среду с характеристиками  $\rho_2$ ,  $c_2$ ,  $b_2$ , на расстоянии  $L = 50 \text{ м}$ ). Из (29) и решения уравнений (30)–(33) имеем:  $\Delta U = 2 \cdot 10^{-5}$  для  $f = 10^{-4} \text{ Гц}$  и  $\Delta U = 2 \cdot 10^3$  для  $f = 10^{-2} \text{ Гц}$  ( $A = 1$ ); при угле падения  $\theta = 30^\circ$ ,  $\Delta U = 7,4 \cdot 10^{-1}$  для  $f = 10^{-4} \text{ Гц}$  и  $\Delta U = 6 \cdot 10^{-1}$  для  $f = 10^{-2} \text{ Гц}$ . Для деформографа равноплечего варианта ( $L = L^* = 50 \text{ м}$ ) при угле падения волны  $\theta = 0^\circ$  (два устоя деформографа опираются на среду с характеристиками  $\rho_1$ ,  $c_1$ ,  $b_1$ , а третий – на среду с параметрами  $\rho_2$ ,  $c_2$ ,  $b_2$ ) имеем из (29) и из решения уравнений (30)–(33):  $\Delta U = 1 \cdot 10^{-7}$  для  $f = 10^{-4} \text{ Гц}$  и  $\Delta U = 4,4 \cdot 10^{-5}$  для  $f = 10^{-2} \text{ Гц}$ ; при угле падения  $\theta = 30^\circ$  и  $\Delta U = -7,4 \cdot 10^{-1}$  для  $f = 10^{-4} \text{ Гц}$  и  $\Delta U = -6 \cdot 10^{-1}$  для  $f = 10^{-2} \text{ Гц}$  ( $A = 1$ ).

Далее, рассмотрим неоднородную, слоистую среду. Согласно [4] выражение для смещения опор принимает следующий вид:

$$U_i^{(n)} = \frac{ik_j}{\omega^2 \rho(n)} T_{ij} e^{-ik_L z_L^{(n)}}, \quad (34)$$

где  $n = 1, 2, 3$ ;  $z_L^{(n)}$  – соответствующие координаты местоположения опор;  $T_{ij}$  – амплитуда волны тензора упругости. Рассмотрим соотношения  $U_i^{(2)}/U_i^{(1)}$  и  $U_i^{(3)}/U_i^{(1)}$  для деформографов равноплечего и неравноплечего вариантов, расположенных так, как было описано выше. Для деформографа равноплечего варианта, когда первые два устоя прибора расположены на средах с плотностью  $\rho_1 = 2,7 \text{ г/см}^3$ , а третий – на среде с плотностью  $\rho_2 = 1,5 \text{ г/см}^3$ , имеем:

$$\frac{U_i^{(2)}}{U_i^{(1)}} \cong e^{-ik_L L}; \quad \frac{U_i^{(3)}}{U_i^{(1)}} \cong \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} e^{-i_2 k_L L}. \quad (35)$$

Для очень низких частот  $k_L L \ll 1$  имеем:  $U_i^{(2)}/U_i^{(1)} \sim 1$ ;  $U_i^{(3)}/U_i^{(1)} \sim 7,2$ . Общая величина относительно смещения устоев деформографа равноплечего и неравноплечего вариантов практически определяется величиной смещения устоев деформографа, смонтированных на среде с параметрами  $\rho_2$ ,  $c_2$ ,  $b_2$ .

Таким образом, для повышения чувствительности лазерных деформографов равноплечего и неравноплечего вариантов необходимо их опоры устанавливать на среды с различными характеристиками. В идеальном, модельном, случае относительное смещение устоев деформографа равноплечего варианта равно относительному смещению устоев деформографа неравноплечего варианта.

Для повышения чувствительности лазерного деформографа в высокочастотном диапазоне на отражатель устанавливается физический маятник с периодом колебаний  $T = 3 \text{ с}$  (или  $f_0 = 0,3 \text{ Гц}$ ). На частотах  $f \gg f_0$  отражатель, расположенный на маятнике, не подвергался практически смещению. При этом величина измеряемого смещения определяется смещением центрального блока деформографа и другого отражателя (в случае деформографа равноплечего варианта). Для частот, близких к  $f_0$ , величина измеряемого смещения определяется, в основном, величиной смещения отражателя, расположенного на маятнике.

## Результаты измерений

В данном разделе приведем некоторые сравнительные результаты измерений, полученные на равноплечем и неравноплечем лазерных деформографах (с длиной плеча 52,5 м). Данные деформографы были смонтированы на мысе Шульц в одном и том же подземном сооружении и на одних и тех же устоях. Измерения на этих приборах были проведены в различное время. Для анализа выбирали записи с одинаковым уровнем шума ( $P_0$ ). В таблице приведены некоторые сравнительные результаты, полученные при обработке данных деформографа неравно-



плечевого типа (15.09.85–16.09.85, 24.09.86–27.09.86) и деформографа неравноплечевого типа (22.08.91–23.08.91, 01.09.91–02.09.91). Гармонический анализ вышеуказанных рядов осуществлялся с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ) после оценки и устранения линейного тренда.

Тон СКЗ	По данным работ [5, 6]	Деформограф равноплечевого типа				Деформограф неравноплечевого типа			
		1985 г.		1986 г.		август 1991 г.		сентябрь 1991 г.	
		Период (мин)	lg(P/P <sub>0</sub> ) (дБ)	Период (мин)	lg(P/P <sub>0</sub> ) (дБ)	Период (мин)	lg(P/P <sub>0</sub> ) (дБ)	Период (мин)	lg(P/P <sub>0</sub> ) (дБ)
<sub>0</sub> S <sub>0</sub>	20,46	20,5	5,1	20,6	8,3	21,3	14,8	20,5	12,9
<sub>0</sub> S <sub>2</sub>	53,89	53,2	3,6	53,9	9,4	53,9	16,4	53,9	12,5
<sub>0</sub> S <sub>3</sub>	35,68	36,2	6,7	35,9	8,3	35,6	8,7	35,3	13,7
<sub>0</sub> S <sub>4</sub>	25,79	26,0	5,7	26,0	4,9	26,2	11,6	24,4	9,8

Поскольку в интересующих нас диапазонах частот присутствуют спектральные максимумы различной интенсивности, то для подавления боковых лепестков наиболее интенсивных сигналов использовалось взвешивание сегмента данных 4-членным окном Блэкмана-Хэрриса:

$$W(n) = 0,35875 - 0,48829 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + 0,14128 \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right) - 0,01168 \cos\left(\frac{6\pi n}{N}\right),$$

$$y(n) = W(n)x(n). \quad (36)$$

Здесь  $x(n)$ —исходные данные,  $y(n)$ —обработанные данные. Это окно хорошо подавляет боковые лепестки, так что уровень их составляет не более 74 дБ от уровня основного максимума. Поэтому в спектрах, полученных с применением такого окна, никакие максимумы с уровнем больше 70 дБ не могут быть приписаны боковым лепесткам. Программа БПФ обрабатывает ряд из 1024 точек. Если исходный ряд имеет меньшую длину (интервал дискретизации составляет 1 мин и 0,5 мин), то после вычитания тренда и обработки данных с помощью окна он дополняется нулями до 1024 точки.

Проблема выбора продолжительности временного ряда для БПФ сводится к следующему: если ряд стационарен, то точность определения амплитуд и частот спектральных максимумов возрастает с увеличением продолжительности измерений. На практике, однако, выясняется, что сейсмоакустические процессы в существенной мере не удовлетворяют требованиям стационарности. Это приводит к тому, что увеличение продолжительности записи выше определенного предела (различного для разных частот) оказывается бесполезным, а иногда даже ухудшает точность определения частоты и амплитуды интересующего нас спектрального пика. Это происходит тогда, когда исследуемый сигнал модулирован по амплитуде, либо когда изменяется его частота или фаза. В связи с этим, чтобы исследовать динамику изменяющихся во времени спектральных пиков, необходимо ограничивать продолжительность сегментов данных для анализа до длины, меньшей характерного времени изменения частоты, амплитуды и фазы. Поэтому для анализа использовались сегменты данных продолжительностью по 8–14 часов. В таблице приведены некоторые обработанные участки записей.

Из таблицы записей видно, что амплитуда пиков на низких частотах, полученных при обработке данных деформографа неравноплечевого типа, в 2–3 раза больше амплитуды аналогичных пиков, полученных при обработке записей деформографа равноплечевого типа. В отдельные промежутки времени амплитуды максимумов на некоторых частотах сравнимы для деформографов равноплечевого и неравноплечевого типов. Для анализа брались данные с малым уровнем сейсмоакустического фона, при полном отсутствии местных землетрясений и удаленных землетрясений большой мощности (в период измерений происходили землетрясения (удаленные) с магнитудой  $M \sim 5$ ).

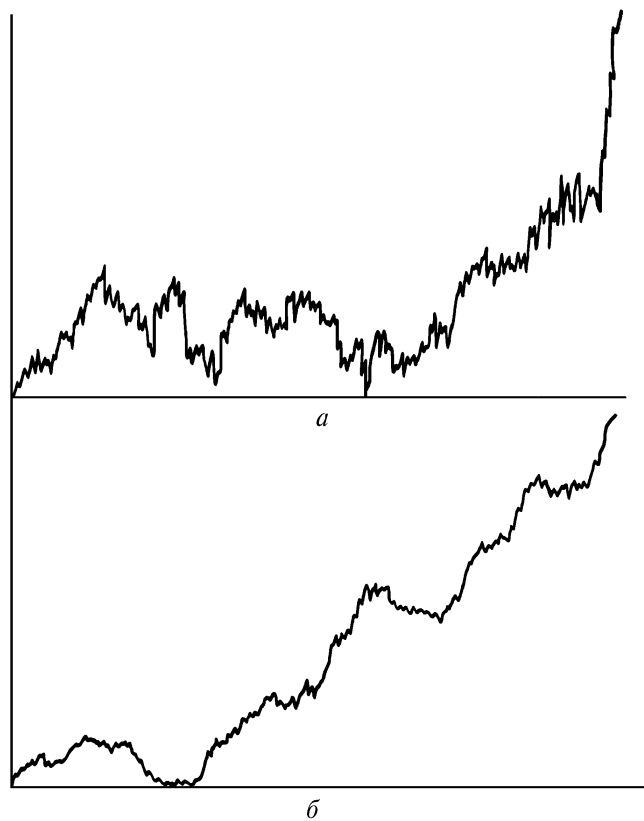


Рис. 2. Синхронные участки записей деформографов, расположенных вблизи с. Корниловка (а) и на м. Шульц (б). Длина участка 4 ч 16 мин

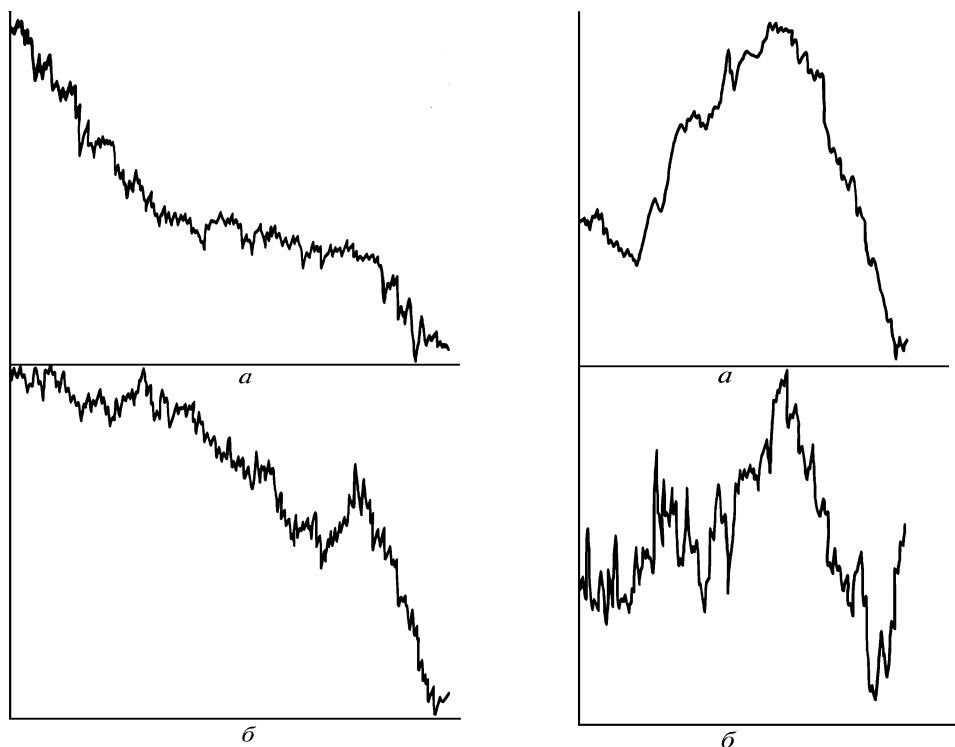


Рис. 3. Синхронные участки записей деформографов, расположенных вблизи с. Корниловка (а) и на м. Шульц (б). Длина участка 1 ч 06 мин

Рис. 4. Синхронные участки записей деформографов, расположенных вблизи с. Корниловка (б) и на м. Шульц (а). Длина участка 52 мин

Из анализа многочисленных записей деформографов равноплечего и неравноплечего типов следует, что чувствительность деформографа равноплечего варианта в 2–3 раза меньше чувствительности деформографа неравноплечего типа в низкочастотном диапазоне и сравнима в высокочастотном диапазоне. Значительное повышение чувствительности деформографа равноплечего типа было достигнуто за счет использования дифференциальных свойств среды при установке прибора.

В заключение приведем данные, полученные при проведении коррелированных измерений на двух разнесенных лазерных деформографах неравноплечего типа. Один лазерный деформограф с длиной плеча 52,5 м расположен на мысе Шульц в подземном бетонном сооружении. Другой лазерный деформограф был установлен на удалении 250 км от мыса Шульц (с. Корниловка Анучинского района Приморского края) в поверхностном варианте с длиной плеча 10,5 м и с частичным использованием термоизоляционных сооружений. На рис. 2–4 приведены, для примера, коррелированные записи в отдельные промежутки времени с различным временем дискретизации. Из сравнения записей деформографов, расположенных на мысе Шульц и с. Корниловка, следует:

- 1) значительное сходство в поведении низкочастотных деформационных процессов вышеуказанных регионов;
- 2) записи 10,5-метрового деформографа имеют более мощные сигналы в высокочастотном диапазоне из-за поверхностного расположения прибора и большего воздействия шумов антропогенного типа.

1. В и т у ш к и н Л. Ф., И в а н о в с к а я М. И., К о л о с н и ц ы н Н. И. // Проблемы теории гравитации и элементарных частиц. М.: 1981. N 12. С. 102–111.
2. В и т у ш к и н Л. Ф., С м и р н о в М. З. // Измер. техника. 1984. Т.11. С.19–20.
3. Б р е х о в с к и х Л. М. . Волны в слоистых средах. М.: Наука. 1973. 343 с.
4. Р е ш е ц к и й В. И. . // Тез. докл. школы-семинара <Применение длиннобазовых лазерных интерферометров в геофизике>. Владивосток, 1987. с. 64–67.
5. D z i e w o n s k i А. М., G i l b e r t F. // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1972. V. 27. P. 393–446.
6. D e r r J. S. // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 5202.

Тихоокеанский океанологический институт  
Дальневосточного отделения РАН

Поступила в редакцию  
18 марта 1993 г.

**A. V. Davydov, G. I. Dolgikh. Study of Seismo-Acoustic Processes by the Laser Deformographer.**

This paper deals with estimation of the sensitivity of laser deformographers, of their various modifications of an equal arms and unequal arms versions. The estimation is made with the account for measurement errors caused by 1) laser radiation frequency instability; 2) temperature, humidity, and pressure variations; and 3) by noises of the photoelectronic devices. It is shown, both theoretically and experimentally that in order to increase the sensitivity of deformographers their supports should be mounted on media with different characteristics and using pendulum systems. Some results of coordinated measurements made with two laser deformographers spaced by 250 km are presented.