

УДК 681.78

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ДЕФОРМОГРАФ ДЛЯ СИСТЕМ СЕЙСМОДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

О. Т. Каменев¹, Ю. С. Петров¹, А. А. Подлесных¹,
В. А. Колчинский¹, И. Н. Завестовская^{2,3}

Работа посвящена разработке оптоэлектронного деформографа для систем сейсмодеформационного мониторинга рудников и шахт. Показано, что при коэффициенте преобразования чувствительного элемента 1.64 рад/мкм разрешение деформографа составляет 6 нм. Проведены испытания прототипа деформографа на руднике. Приведены образцы зарегистрированных сигналов.

Ключевые слова: деформограф, волоконно-оптический интерферометр Маха–Цендера, разветвитель 3×3.

Подземная разработка твёрдых полезных ископаемых сопровождается проявлением опасных геодинамических явлений, в том числе – горных ударов и техногенных землетрясений, приводящих к катастрофическим последствиям. Для обеспечения безопасности проведения горных работ требуется разработка и развитие современных способов непрерывного контроля и оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород. В настоящее время на месторождениях полезных ископаемых успешно применяются автоматизированные геоакустические системы контроля горного давления, которые позволяют регистрировать и определять параметры событий акустической эмиссии в частотном диапазоне 0.5–12 кГц, а также системы микросейсмического мониторинга, позволяющие регистрировать сейсмоакустические события в частотном диапазоне от 10 до 500 Гц [1]. В то же время инструментальные средства, предназначенные для измерения характеристик деформационного поля в зоне ведения горных работ в частотном диапазоне от 0 до 100 Гц, развиты недостаточно. Стационарные длинноволновые лазерные деформографы с длиной базы от 20 до 100 м слишком дороги. Струнные

¹ Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041 Россия, Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: okamenev@mail.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

³ НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

шахтные деформометры не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к системам мониторинга. Кварцевые деформометры, хотя и отличаются высокой разрешающей способностью (до 10 нм), обладают ограниченным диапазоном измерений ± 200 мкм [2]. Оптоэлектронный деформометр МОЭД-1П, обладая достаточным диапазоном измерений, имеет недостаточную разрешающую способность порядка 5 мкм [3]. Волоконно-оптические деформометры, основанные на использовании метода контроля дополнительных потерь световой волны, обладая всеми преимуществами волоконно-оптической элементной базы, тем не менее, имеют крайне низкое разрешение порядка 0.5 мм [4].

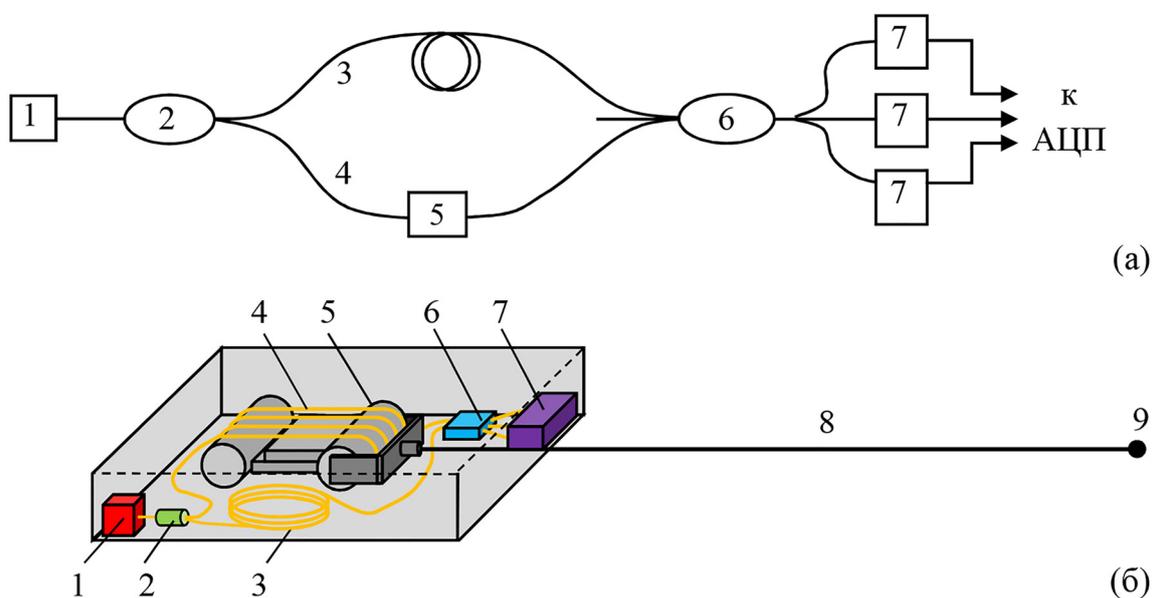


Рис. 1: Блок-схема (а) и схема размещения элементов (б) волоконно-оптического деформометра: 1 – DFB-лазер; 2 – Y-разветвитель; 3 – опорное плечо интерферометра; 4 – измерительное плечо интерферометра; 5 – многовитковый оптомеханический преобразователь; 6 – разветвитель 3 × 3; 7 – фотоприемники; 8 – трос; 9 – точка закрепления дальнего конца троса.

В настоящей работе представлены принципы построения и функционирования оптоэлектронного деформографа, предназначенного для применения в системах сейсмодинамического мониторинга состояния рудников. Основным элементом деформографа является волоконно-оптический деформометр, в котором в качестве чувствительного элемента применяется многовитковый оптомеханический преобразователь (МОП), размещенный в плече оптоволоконного интерферометра Маха–Цендера (рис. 1).

Принцип работы МОП на основе оптоволоконного интерферометра Маха–Цендера представлен в работе [5]. МОП преобразует изменение расстояния между точками закрепления корпуса деформометра и дальнего конца троса ΔL в изменение фазы оптической волны $\Delta\varphi$, распространяющейся в волоконном световоде измерительного плеча интерферометра. В преобразователе применяется одномодовый волоконный световод стандарта ITU-T 657.A с уменьшенными потерями на изгибах. Фазовая демодуляция выходного сигнала интерферометра осуществляется с использованием метода, основанного на применении волоконно-оптического разветвителя 3×3 , сигналы на трех выходах которого сдвинуты по фазе относительно друг друга на $2\pi/3$. Обработка этих сигналов по методу, представленному в работе [6], обеспечивает восстановление $\Delta\varphi$. Этот метод пассивной фазовой демодуляции отличается простотой и высокой эффективностью. Коэффициент преобразования МОП [5]

$$S = \frac{\Delta\varphi}{\Delta L} = 2\pi \frac{n}{\lambda} \frac{1}{\frac{k_f}{k_w} + \frac{1}{2N}}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления световода, λ – длина волны лазера, k_f – коэффициент упругости одного прямолинейного участка волоконного световода МОП, k_w – коэффициент упругости троса, N – количество прямолинейных участков волоконного световода МОП. При $n = 1.5$, $\lambda = 1.55$ мкм, $k_f = 8$ кН/м, $k_w = 2.1$ кН/м, $N = 16$ теоретическое значение коэффициента преобразования МОП, рассчитанное с использованием (1), $S = 1.6$ рад/мкм.

Кроме деформометра в состав деформографа входит 24-битный АЦП ZET 230, SHDSL-модем Sigrand SG-17B-121 и преобразователи напряжения (рис. 2).

Выходные сигналы деформометра оцифровываются АЦП с частотой дискретизации 5 кГц. Далее через SHDSL-модем данные поступают по защищенному кабелю в аппаратную, в которой находится компьютер, осуществляющий их обработку. По этому же кабелю для питания электронных компонентов деформографа к нему подводится напряжение 24 В. Все оборудование, входящее в состав деформографа, размещено в закрытом металлическом корпусе (подвесной шкаф).

Для апробации деформографа в условиях подземных горных выработок он был установлен на руднике “Николаевский” ОАО “ГМК Дальполиметалл”. Место расположения деформографа в шахте находилось на глубине – 420 м от уровня моря. Шкаф с деформометром и электронными блоками крепился к стене тоннеля напротив горизонтальной скважины диаметром 105 мм и глубиной 10 м. Один конец троса из кевларовых нитей

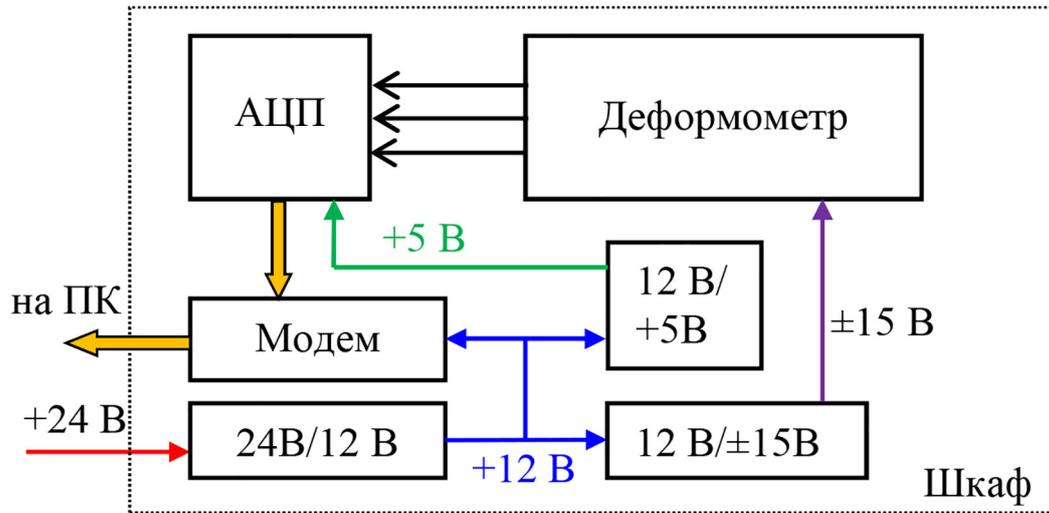


Рис. 2: Блок-схема деформографа.

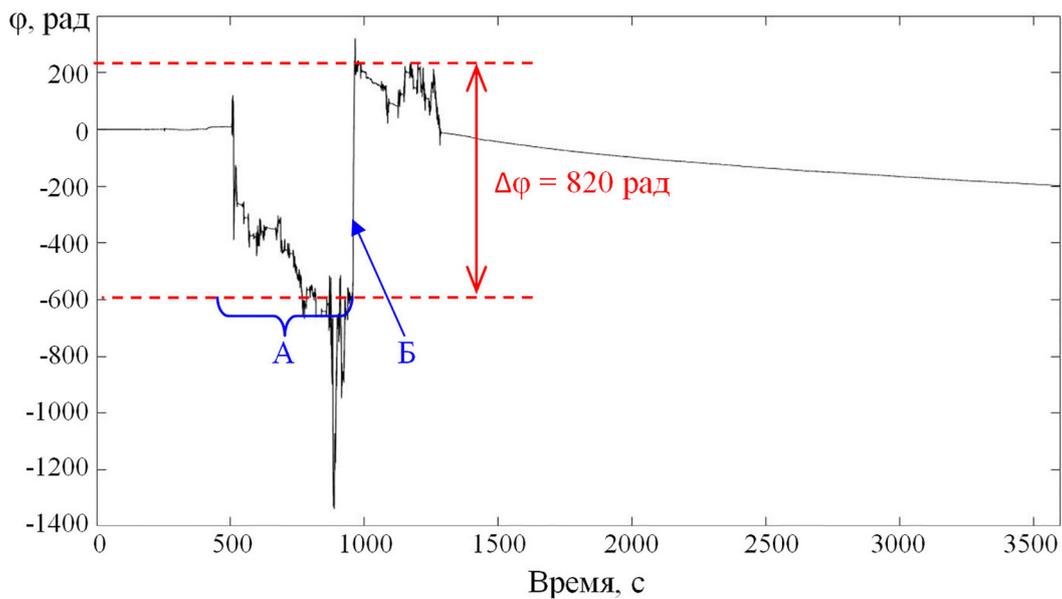


Рис. 3: Выходной сигнал деформографа после обработки, зарегистрированный на этапах регулировки натяжения троса (А) и калибровки (Б).

закреплялся в скважине, а другой крепился к подвижной части МОП. Деформометр был установлен на линейном трансляторе, который обеспечивает регулировку натяжения троса. Натяжение выбиралось таким образом, чтобы рабочая точка деформометра оказалась на середине линейного участка передаточной характеристики. После этого для определения коэффициента преобразования МОП осуществлялась калибровка

деформометра. Используя транслятор, оператор изменял расстояние между корпусом деформометра и дальним концом троса на заданную величину ΔL , регистрируя изменение фазы $\Delta\varphi$.

На рис. 3 представлен выходной сигнал установленного на руднике деформографа, зарегистрированный на этапах регулировки (участок А) и калибровки (участок Б). Калибровочная деформация $\Delta L = 500$ мкм. Как видно из рис. 3, соответствующее приращение фазы составляет $\Delta\varphi = 820$ рад, откуда следует, что $\Delta\varphi/\Delta L = 1.6$ рад/мкм. Таким образом, экспериментально определенное значение коэффициента преобразования МОП соответствует теоретическому. При разрешении регистратора 10^{-5} рад общее разрешение деформографа составляет 6 пм. Диапазон измерения деформаций ± 3 мм.

Деформограф в течение нескольких месяцев осуществлял регистрацию сейсмодформационных событий в зоне его установки. На рис. 4 представлена деформация ΔL , регистрируемая в течение 160 часов.

Как видно из рис. 4, период плавной деформации до 200 мкм, длившийся 120 часов, сменяется периодом значительных деформаций, которые доходят до 1200 мкм. После частичной разгрузки среды общая деформация остается на уровне 800 мкм.

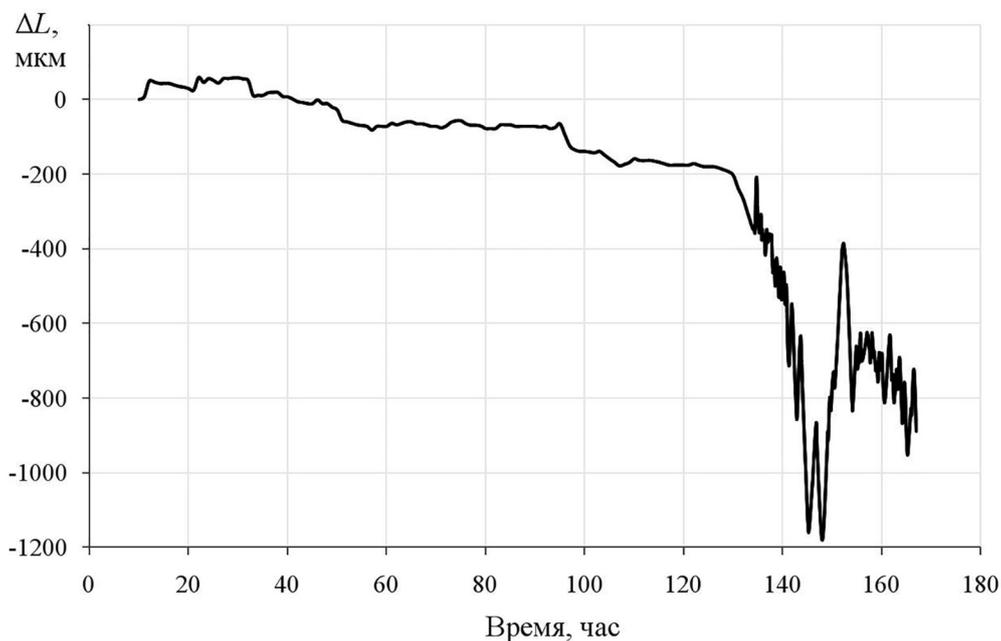


Рис. 4: Деформация, зарегистрированная деформометром в течение 160 часов.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил оценить точность измерений в диапазоне частот 0.1–100 Гц, которая составляет 0.3 нм.

Следует отметить, что стабильность работы деформографа в настоящей работе не рассматривается. Основное влияние на стабильность оказывает изменение температуры, которое в условиях подземного рудника незначительно. При других условиях работы влияние температуры следует учитывать.

Таким образом, в работе предложен и апробирован в условиях рудника деформограф на основе волоконно-оптического деформометра, в котором в качестве чувствительного элемента применяется многовитковый оптомеханический преобразователь, размещенный в плече волоконно-оптического интерферометра Маха–Цендера. Экспериментально продемонстрирована возможность регистрации деформаций среды в условиях рудника.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] И. Ю. Рассказов, Г. И. Долгих, В. А. Петров и др., Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 6, 29 (2016). DOI: 10.1134/S1062739116061599.
- [2] И. М. Алёшин, С. Д. Иванов, К. И. Холодков и др., Вопросы инженерной сейсмологии **46**(1), 39 (2019). DOI: 10.3103/S0747923919050013.
- [3] В. В. Адушкин, В. Н. Опарин, Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 2, 3 (2013). DOI: 10.1134/S1062739149020019.
- [4] А. Д. Мехтиев, А. В. Юрченко, В. А. Калытка и др., Письма в ЖТФ **48**(15), 30 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.08.55116.19200.
- [5] A. A. Podlesnykh, O. T. Kamenev, Yu. S. Petrov, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics **86**(S1), S175 (2022). DOI: 10.3103/S1062873822700630.
- [6] D. A. Brown, C. B. Cameron, R. M. Keolian, et al., Proc. SPIE **1584**, 328 (1991). DOI: 10.1117/12.50954.

Поступила в редакцию 2 июля 2023 г.

После доработки 28 сентября 2023 г.

Принята к публикации 29 сентября 2023 г.