

В.М. ЗДЕЩИЦ, В.Д. СИДОРЕНКО, доктора техн. наук, проф.,
С.В. ПОВАР, канд. пед. наук, доц.,
В.В. ГЛЕБЕНКО, ассистент, Криворожский национальный университет

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ СЕЙСМОГРАФ С МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Разработан чувствительный волоконно-оптический сейсмограф на магнитной подвеске инерционной массы, которая размещается в области пересечения противоположно направленных силовых линий магнитного поля кольцевого магнита. Конструкция обеспечивает условия для равновесия чувствительного элемента сейсмического датчика без контакта с его корпусом и демпфирования при возникновении сейсмических колебаний. Основное назначение разработанного сейсмографа – дистанционное измерение микросмещений контролируемой поверхности и решения, таким образом, задачи регистрации микросейсмических колебаний. Помехоустойчивость к электромагнитным наводкам, устойчивость к радиационному излучению является достоинством разработанного волоконно-оптического сейсмографа. Это позволяет устанавливать его при необходимости в непосредственной близости от ядерной реакторной установки, а также в хранилищах радиоактивных и токсичных отходов. Волоконно-оптическая система передачи позволяет без ретрансляции доставлять аналоговую информацию на десятки километров без искажения. В работе приводится экспериментально определенная аналитическая зависимость между мощностью измеряемого отражённого светового потока и величиной смещения породы. Показано, что перпендикулярные измеряемому направлению колебания не вносят дополнительную погрешность в результаты измерений. В работе приведены также результаты метрологических испытаний опытного образца сейсмографа.

Ключевые слова: сейсмоприемник, волоконно-оптический сейсмограф, магнитная подвеска, микросейсмы, упругие волны, амплитудно-частотные характеристики.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Сейсмические датчики в настоящее время применяются для решения научных и практических задач в самых разных областях науки и производства. Так, при традиционной сейсморазведке в частотном диапазоне от 10 до 120 Гц сейсмоприемники используют для регистрации отраженных и преломленных волн. С их помощью исследуют прохождение в земной коре упругих волн с частотой в пределах 1 Гц, регистрируя волны до 2-3 кГц, определяют области залегания солей.

В последние годы возникла проблема поиска мест для захоронения радиоактивных и токсичных отходов с необходимостью контроля их долговременной устойчивости. Решение задачи прогнозирования возможных катастрофических геодинамических явлений, связанных с релаксацией горных пород в зоне хранилища, невозможно без применения сети сейсмических датчиков. Метод неразрушающего мониторинга устойчивости подземных хранилищ основан на дистанционном наблюдении кинетики накопления сейсмических событий с помощью сейсмических датчиков.

Подобные задачи решаются и в атомной промышленности. Для обеспечения аварийной остановки реактора при землетрясениях предусматривается применение помехоустойчивой системы сейсмометрического контроля с помощью регистрации колебаний на уровне подошвы здания реакторной установки, т.е. на значительном удалении от объекта повышенной опасности.

Для Кривбасса проблема прогноза опасных проявлений горного давления имеет социально-экономическое значение. В связи с переходом горных работ на более глубокие горизонты вовлечены в разработку месторождения железной руды с неблагоприятными горно-геологическими условиями, ведется выемка полезных ископаемых из целиков. В связи с чем увеличиваются нагрузки на очистной забой. Проявления горного давления отрицательно влияют на технико-экономические показатели работы шахт, повышают уровень риска обрушений в подземных выработках и провалов дневной поверхности. Решение этой проблемы во многом зависит от оперативности осуществления контроля за проявлением горного давления и размеров области мониторинга.

Применяемые в настоящее время механические (электродинамические) сейсмоприемники имеют столь высокую цену, что их применение для масштабного мониторинга нерентабельно. Разработка базовой конструкции сейсмоприемника на основе магнитного подвеса, которая явилась бы технологичной и универсальной для изготовления всех групп и типов сейсмоприемников, обладающих, в то же время, повышенной чувствительностью, точностью регистрируемых параметров и одновременно - невысокой стоимостью, является в настоящее время актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. Образование трещин в несущих целиках или развитие карстовых полостей вызывает генерацию крайне слабых сейсмических событий, минимальная магнитуда которых достигает -2 [1].

Сейсмологический мониторинг является общепризнанным инструментом для контроля геодинамической ситуации. Он применяется на рудниках Южной Африки, Австралии, США, Канады, Франции, Польши, Великобритании, Германии и др. [2-4]. Возможность создания информационного центра для маркшейдерско-геодезического обеспечения горных работ в Криворожском бассейне рассматривалась еще в 1997 году [5]. В настоящее время в НИГРИ ведутся интенсивные разработки геоинформационной станции непрерывного слежения за геодинамической ситуацией в регионе [6].

Как показал опыт работы на рудниках и карьерах Южной Африки и Австралии [1, 7-14], принципиальными особенностями построения систем шахтного мониторинга являются:

- большое количество пространственно распределенных сейсмодатчиков (до 20 шт/км²);
- обеспечение регистрации сейсмических событий в диапазоне магнитуд: $-2.0 < M < +5.0$;
- динамический диапазон системы мониторинга - 180 дБ;
- диапазон частот регистрируемых событий [2]

$$v_o = \frac{2,34 v_s}{2\pi} \sqrt[3]{\frac{16 \Delta \sigma}{7 \mu P}} = 0,2 \div 500 \text{ Гц}, \quad (1)$$

где v_o - угловая частота, $\Delta \sigma$ – сброс напряжения, v_s - скорость S-волн.

Обеспечить покрытие такого широкого динамического диапазона при помощи преобразователя одного типа, как показывает практика, невозможно.

Характеристики некоторых сейсмических датчиков - велосиметров, применяемых в системе микросейсмического мониторинга, приведены в табл. 1:

В качестве велосиметров чаще всего применяют электродинамические сейсмоприемники – устройства, в которых происходит преобразование сейсмических колебаний в электрические сигналы вследствие перемещения катушки в магнитном поле постоянного магнита. Другие типы

Таблица 1

Характеристики сейсмических датчиков

Датчик	Частотный диапазон, Гц	Коэффициент преобразования, В/(м/с)
СМЗ-ОС	0.02 – 10	2000
СМЗ-КВ	0.5 – 50	200
Sercel L4C-3D	1 – 70	250
ISSI G4.5	4.5 – 2000	30
GS20DX	10 – 250	20
ISSI G14HS	14 – 2000	80

Датчики ISSI G4.5, ISSI G14HS, GS20DX можно устанавливать в скважины.

Уровень собственных шумов сейсмодатчиков - порядка 10^{-7} м/с (у GS20DX, применяемого в местах с высоким уровнем микросейсмического шума - 10^{-6} м/с).

Системы сейсмологического мониторинга обычно содержат:

- сейсмические датчики;
- регистратор для приема сигналов с датчиков;
- системы передачи данных;
- системы хранения данных и представления их для обработки.

Общемировой стандарт предполагает расположение регистратора непосредственно рядом с датчиком, преобразование сигнала с датчика в цифровой вид, привязку к единому времени и передачу цифровых данных в центр сбора. Опыт эксплуатации цифровых систем регистрации показал, что практически все они обладают тремя недостатками:

- случайная потеря временной синхронизации;
- зависание по причине помех на линии связи;
- низкая помехоустойчивость по отношению к питающему напряжению.

Для преодоления трудностей, связанных со сбором данных в условиях рудников, в работе [1] преобразование непрерывного сигнала с датчика проводилось в центре сбора данных с применением многоканальных аналого-цифровых преобразователей. Сигнал с подземных датчиков

передавался в центр сбора данных посредством телеметрии. Привязка к единому времени осуществлялась при оцифровке сигнала на поверхности, причем кроме времени GPS принимались во внимание внутренние часы компьютера и АЦП. В рамках этой концепции была разработана высоконадежная телеметрическая система передачи непрерывных сигналов с сейсмодатчиков ТМЗ.

Система обеспечивает частотный диапазон $0.2 \div 200$ Гц и динамический диапазон до 90 дБ. Телеметрия характеризуется высокой устойчивостью к электрическим помехам на линии питания и большой дальностью передачи сигнала (более 15 км). Требования к качеству линии минимальны: частотный диапазон $300 \div 3000$ Гц.

Опыт использования системы в течение более десяти лет показал надежную регистрацию и интерпретацию всех локальных сейсмических явлений с магнитудой от -0.5 до $+2$. Анализ спектра сигналов от локальных сейсмических явлений показывает, что их основная энергия распределена в диапазоне от 1 до 60 Гц.

Постановка задачи. Основные проблемы, возникающие при регистрации микросейсмических событий, - это микросейсмический шум от самых разных источников и электромагнитные помехи, влияющие как на работу сейсмического датчика так и на прохождение информационного сигнала от него до записывающей аппаратуры.

Обращает внимание на себя тот факт (см. табл. 1), что для измерения микросейсмических волн повсеместно используются велосиметры-измерители скорости колебаний. Собственно сейсмографов - сейсмических датчиков, которые могут дистанционно (за десятки километров) измерить смещение горной породы с микрометрической точностью, не существует. С целью полного исключения электромагнитных помех и возможности измерения микросейсмических колебаний с амплитудой порядка 1 мкм разработана система измерения и конструкция сейсмического датчика, основанная на волоконно-оптических технологиях.

Изложение материала и результаты. Как известно [15], оптические волокна не подвержены влиянию электромагнитного поля и могут передать аналоговую информацию на сотни километров без ретрансляции.

Конструкция волоконно-оптического сейсмографа с магнитной подвеской чувствительного элемента и система передачи сейсмической информации представлена на рис. 1 (устройство перспективных сейсмо-приемников отображено в [16-19]).

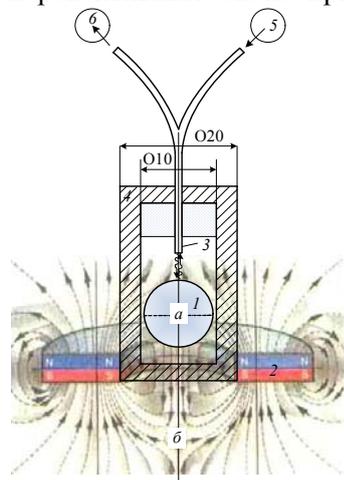


Рис. 1. Конструкция волоконно-оптического сейсмографа

Здесь цифрой 1 обозначен чувствительный элемент - железный шарик с зеркальной светоотражающей поверхностью, цифрой 2 - кольцевой постоянный магнит, 3 - оптическое волокно, 4 - корпус датчика, 5 - светоизлучающий диод (лазер) оптического тестера, 6 - фотоприемник. Железный шарик размещается в области (а или б) пересечения противоположно направленных силовых линий магнитного поля кольцевого магнита.

Принцип работы датчика заключается в измерении расстояния S между инерционной массой (шариком) свободно подвешенном в магнитном поле постоянного магнита и торцом оптического волокна, связанным с корпусом датчика. Расстояние S соответствует величине смещения ΔZ горной породы в месте установки датчика. График зависимости мощности светового излучения, падающего на фотоприемник после отражения от шарика, от величины зазора между шариком и торцом световода приведен на рис. 2.

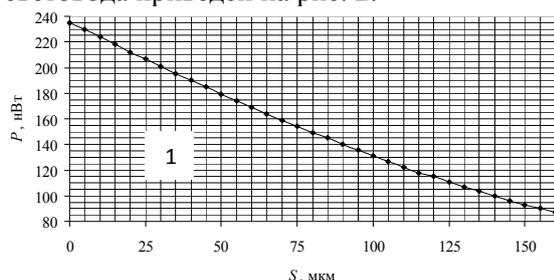


Рис. 2. Зависимость мощности светового излучения P , отраженного от шарика, от величины зазора S

Найденная зависимость мощности светового излучения с длиной волны $\lambda=0,85$ мкм, падающего на фотоприемник, квазилинейная в области $S \leq 130$ мкм (величина достоверности аппроксимации $R^2=0,9962$) и описывается выражением (при максимальной мощности $P_{\max}=231$ нВт)

$$P = P_{\max} + kS, \quad (2)$$

где $k = \frac{\Delta P}{\Delta S}$; $k = -1 \frac{\text{нВт}}{\text{мкм}}$.

Отсюда

$$S = k_1(P - P_{\max}), \quad (3)$$

где $k_1 = \frac{1}{k} \approx -1 \frac{\text{мкм}}{\text{нВт}}$.

Таким образом, открывается возможность по измеренной величине мощности света, отраженного от шарика, определять величину изменения зазора ΔS , что равнозначно смещению горной породы на ΔZ .

Как видно из графика, смещение корпуса датчика относительно инерционной массы на 1 мкм приводит к уменьшению световой мощности примерно на 1 нВт. Абсолютная погрешность измерения мощности светового излучения современными оптическими тестерами составляет величину $\Delta P = \pm 0,2$ нВт, что, безусловно, обеспечивает измерение смещений не хуже 1 мкм: $\Delta S = \frac{\Delta P}{k} = \mp 0,2$ мкм.

Рассмотрим принцип действия измерительной системы. Свет от источника светового излучения 5 по одному из рукавов волоконно-оптического разветвителя 3 достигает объединенного торца, выходит в зазор и, отразившись от поверхности шарика, попадает по другому рукаву разветвителя на фотоприемник 6, электрический сигнал с которого проходит в блок усиления и регистрации.

Как видно из графика (рис. 2), положение инерционной массы по отношению к торцу световода определяется однозначно. Изменение величины зазора S при колебаниях приведет к соответствующей модуляции потока отраженного от шарика света, измерив который мы получим зависимость смещения горной породы от времени.

На рис. 3 приведена зависимость интенсивности отраженного светового потока от ортогонального смещения шарика относительно оси световода на величину x . Диаметр шарика 0,5; 1; 2 мм проставлен возле каждого графика.

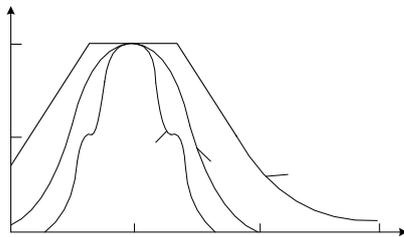


Рис. 3. График зависимости мощности светового потока от ортогонального смещения шарика

Как видно, увеличение радиуса шаровой поверхности приводит к уменьшению влияния ортогональных смещений шарика на измерение величины зазора и для диаметра 10 мм это влияние можно не учитывать.

Опытный образец разработанного волоконно-оптического сейсмографа (рис.4) прошел испытания в паре с метрологически аттестованным велосиметром СВ-10Ц и пьезоэлектрическим датчиком.

Рис. 4. Волоконно-оптический сейсмограф

паре с метрологически аттестованным



Результаты испытаний приведены на рис. 5.

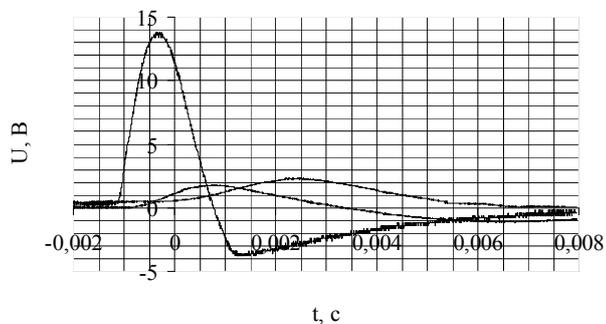


Рис. 5. Оциллограммы колебаний, зарегистрированные пьезодатчиком (1), волоконно-оптическим сейсмографом (2), закрепленных на корпусе велосиметра СВ-10Ц (3)

При длительности фронта ударной нагрузки 1 мс реакция волоконно-оптического сейсмографа наблюдается через 0,5 мс со сдвигом по фазе относительно велосиметра, чего и следует ожидать с физической точки зрения.

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработанный волоконно-оптический сейсмограф соответствует своему предназначению, а именно дистанционному измерению слабых сейсмических сигналов.

Помехоустойчивость к электромагнитным наводкам, устойчивость к радиационному излучению также является его достоинством.

Дальнейшие исследования необходимо провести в плане изучения влияния переменных электромагнитных полей на стабильность рабочей точки и чувствительность сейсмографа.

Список литературы

1. **Бутырин П.Г.** Разработка многоуровневой системы сейсмологического мониторинга на территории Верхнекамского месторождения калийных солей / П.Г. Бутырин. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2012. – 23с.
 2. **Mendecki A.J.** Seismic monitoring in mines. – Cambridge: Chapman and Hall, 1997. – 270 с.
 3. **Маловичко Д.А., Линч Р.Э.** Микросейсмический мониторинг бортов карьеров / Вестник МГТУ, том 12, №4, 2009. с. 644-653.
 4. **Lynch R.A., Wuite, R., Smith B.S., Cichowicz A.** Micro-seismic monitoring of open pit slopes // Proc. of the 6th Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, ed. Y.Potvin and M.Hudyma. – ACG: Perth, 2005. – pp.581-592.
 5. **Сидоренко В.Д.** О создании информационного центра для маркшейдерско-геодезического обеспечения горных работ / В.Д.Сидоренко // Проблемы горнодобывающей промышленности металлургического комплекса Украины: сб. научн. тр. – Кривой Рог: НИГРИ, 1997. – С. 56–59.
 6. **Вилкул Ю. Г., Ступник Н. И., Бабец Е.К., Сова А. А.** Создание региональной системы геомеханического мониторинга состояния массивов горных пород в зонах влияния пустот. Горный журнал. М., 2013. С. 98-101.
 7. **Иванова Ю.В.** Опыт исследования строения верхней части земной коры по низкочастотным микросейсам // Восьмая Уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2007. С. 107-110.
 8. **Куксенко В.С.** Модель перехода от микро- к макроразрушению твердых тел // Физика прочности и пластичности. JL, 1986. С. 36-41.
 9. **Машатков Б.Ц., Мансуров В.А., Куксенко В.С., Савельев В.Н.** Связь между накоплением микротрещин и макродеформацией при одноосном сжатии горных пород. Физика и механика разрушения горных пород, Фрунзе, Илим, 1983, С.77-84.
 10. **Mansurov V. A.** Prediction of Rockbursts by Analysis of Induced Seismicity Data // Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sci., 2001. Vol. 38, №. 6. P. 893-901.
 11. **Hardy H.R.,** Application of AE technique to rock and rock structure, in: Acoustic Emission in Geotechnical Engineering Practice, (1981), pp4-92
 12. **Ma Zonglin, Fu Zhengxiang, Zhang Yingzhen et al.** Earthquake prediction. B. etc. Seismol. Press: Springer, 1989, 332 p
 13. **Wyss M., Habennann R.E.** Precursory seismic quiescence. PAGEOPH. 1988.Vol. 126. N2/4. P.319-332.
 14. **Th. Förster,** Experimentale und theoretische Untersuchung des zwischenmolekularen Ubergangs von Elektronenanregungsenergie. Z. Naturforsch. Abf. A, (1949), Bd 4, S. 321-327
 15. **Окоти Т.** и др. Волоконно-оптические датчики – Л.:Энергоатомиздат, 1990 - 256с.
 16. **Андреев А.Г., Ермаков В.С., Петров Ю.П.** Построение перспективного класса сейсмоприемников на основе бесконтактных подвесов // Приборы и Системы. Управление. Контроль. Диагностика. № 11. М.: Науч.-техлитиздат, 2000. С. 46-49.
 17. А.С. 1436079 СССР, МКИ G 01 V 1/16. Сейсмоприемник / **Петров Ю.П., Мифтахутдинов Р.К., Новоселицкий В.М., Орлов Л.К., Петрова Л.С., Рочев С.С.** // Открытия. Изобретения. № 41. 1988. С. 186.
 18. **Башилов И.П., Волосов С.Г., Зубко Ю.Н., Королёв С.А., Николаев А.В.** Автономный портативный сейсмоприёмник с цифровой регистрацией для сейсмологических исследований // Вестник НЯЦ РК. Вып.3 (39). Курчатov: НЯЦ РК, 2009. С. 29-32.
 19. **Башилов И.П., Волосов С.Г., Зубко Ю.Н., Королёв С.А., Солдатенков А.М.** Приборы для исследований микросейсмического волнового поля в геосистемах. // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС, 2010. С. 249-255.
- Рукопись поступила в редакцию 20.03.15