

Результаты проведенных исследований предназначены для оценки несущей способности поддерживающих целиков произвольного размера, оставляемых при разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000403-1), а также РФФИ и Пермского края по гранту № 19-45-590004.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ведмедев А.В. Коэффициент формы в расчётах подземных сооружений // Геотехническая механика: межведомств. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 51. – С. 250-257.
2. Беньявски З. Управление горным давлением: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 254 с.: ил.
3. Прочность и деформируемость горных пород / [Ю.М. Карташов и др.]. – М.: Недра, 1979. – 269 с.: ил.
4. Паньков И.Л., Ударцев А.А. Экспериментальные исследования влияния длины прямоугольных образцов сильвинита на коэффициент формы // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 44-48. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.8.
5. Паньков И.Л. О новом коэффициенте формы, учитывающем размеры прямоугольных образцов горных пород // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 60-63. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.10.
6. Pankov I. The strength criterion for rocks under true triaxial stress // Procedia Structural Integrity. – 2021. – V. 32. – P. 166-172. – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.024.
7. Баклашов И.В. Геомеханика: учебник для вузов. Т. 1. Основы геомеханики. – М.: МГГУ, 2004. – 208 с.
8. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.: ил.

УДК 535.92

DOI:10.7242/echo.2022.2.8

## РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ. ТЕХНОЛОГИЯ DSS

А.И. Кузнецов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье описаны лабораторные эксперименты с DSS технологией и приведена краткая информация о работе данной технологии и вариантах ее применения. Данные исследования направлены на оценку возможности использования оптического волокна для долговременного мониторинга деформаций при решении различных задач геомеханики: мониторинг оседаний земной поверхности в процессе ведения горных работ, контроль деформаций крепи шахтных стволов, контроль деформаций массивов пород вокруг выработок и т.п.

**Ключевые слова:** шахта, рудник, инженерные системы, распределенные волоконно-оптические измерения, DSS, распределенное измерение деформации (Distributed Strain Sensing), геомеханика, геофизика, безопасность рудников.

Системы распределенного волоконно-оптического мониторинга температуры (DTS – Distributed Temperature Sensing), акустики (DAS – Distributed Acoustic Sensing), деформаций (DSS – Distributed Strain Sensing) являются относительно новыми технологиями для горнорудной промышленности. Исторически перечисленные технологии впервые были разработаны и применены для решения проблем нефтегазовой отрасли, для мони-

торинга глубоких скважин. Дальнейшее развитие технологий и удешевление оборудования позволило применять данные системы мониторинга уже в более бюджетных секторах (мониторинг тоннелей, пожарная сигнализация, контроль периметра и прочее). На текущий момент распространение в горнорудной отрасли получила система DTS, которая применяется при строительстве рудников в части организации мониторинга ледопородных ограждений шахтных стволов. Технология DAS и DSS пока не получила широкого применения, но имеет большой потенциал для применения в горнорудной промышленности.

### Краткая теория распределенных измерений

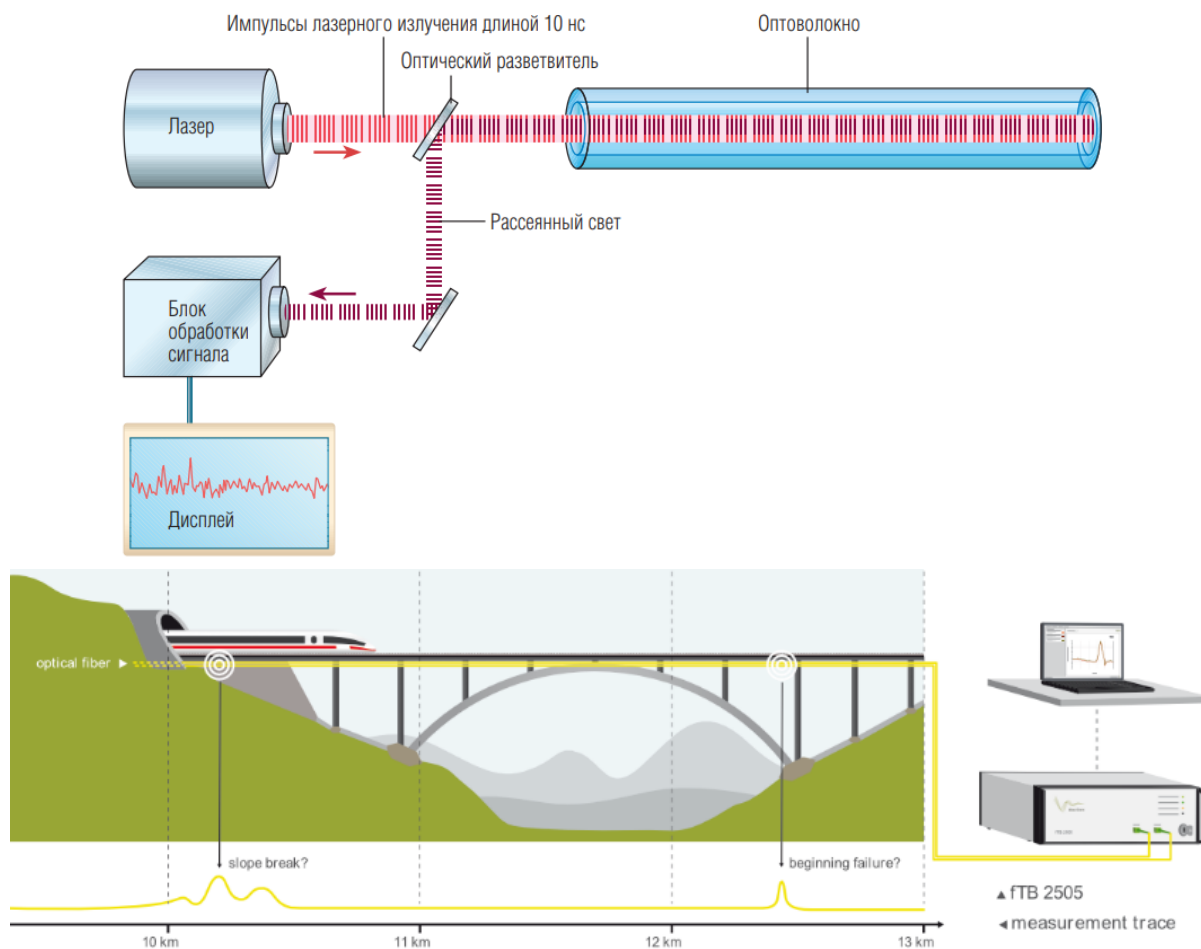


Рис. 1. Процесс волоконно-оптического распределенного измерения

Источник лазерного излучения испускает световые импульсы, проходящие по всей длине оптического волокна, при этом часть света возвращается в виде излучения обратного рассеяния. Используя времяимпульсный метод, можно рассчитать, с какого участка оптического волокна пришло обратное рассеяние. Упрощенная схема измерения приведена на рисунке 1. В процессе детектирования обратного излучения можно сравнить полученный импульс с первоначальным импульсом и выделить компоненты излучения, которые меняются при определенном физическом воздействии на оптическое волокно. Спектр обратного рассеяния приведен на рисунке 2.

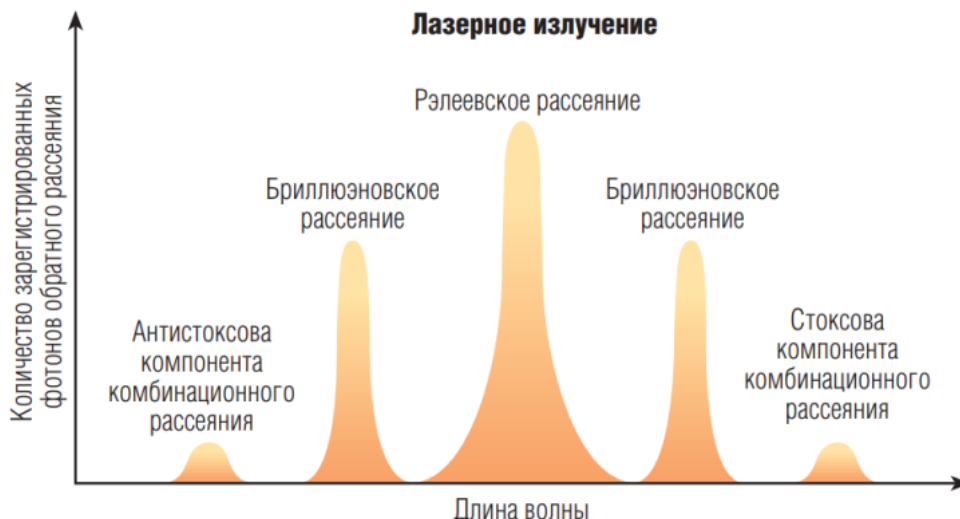


Рис. 2. Спектр обратного рассеяния

Для измерения используют следующие компоненты обратного рассеяния: Комбинационное рассеяние света (эффект Рамана) – DTS, Бриллюэновское рассеяние – DSS, Рэлеевское рассеяние – DAS.

### Технология DSS

Рассеянием Манделъштама-Бриллюэна называется рассеяние оптического излучения средами (твёрдыми телами и жидкостями) в результате его взаимодействия с собственными упругими колебаниями этих сред. Оно сопровождается изменением набора частот (длин волн), характеризующих излучение, – его спектрального состава.

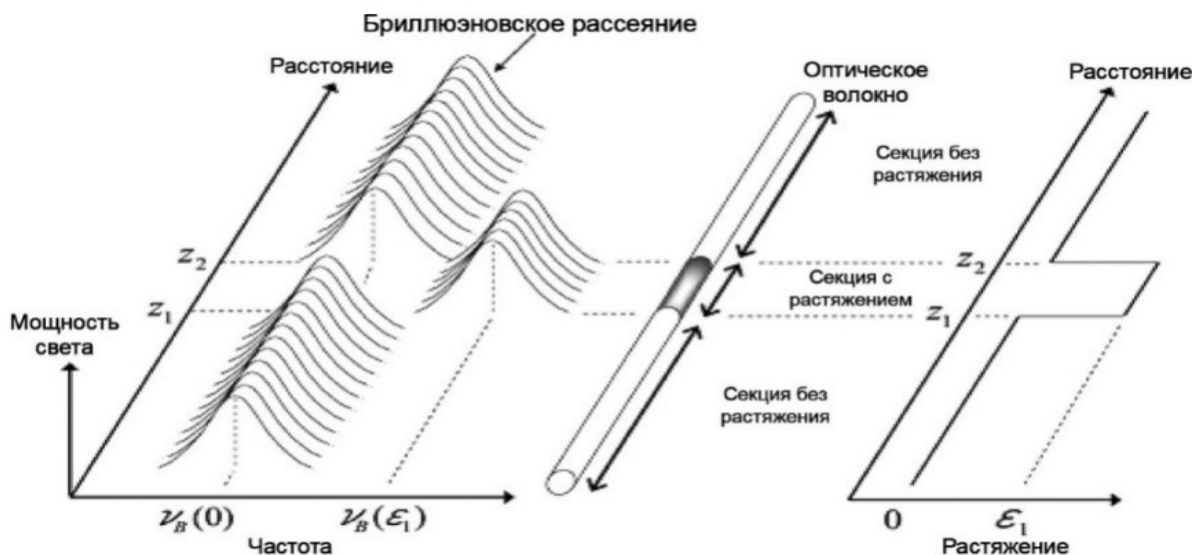


Рис. 3. Принцип действия бриллюэновского рефлектометра

Метод бриллюэновской рефлектометрии (рисунок 3) обладает двумя основными преимуществами. Во-первых, это практически единственный оптический метод, позволяющий измерить величину абсолютного натяжения волокна. Для этого достаточно измерить частоту максимального сигнала в спектре бриллюэновского

рассеяния и при этом нет необходимости подвергать волокно дополнительному растяжению. В других же известных оптических методах измеряется величина удлинения волокна, возникающего при создании в волокне дополнительного натяжения, что делает эти методы непригодными для определения натяжения волокна, уложенного в линию передачи. Во-вторых, бриллюэновское рассеяние приводит к образованию обратной волны в волокне. Поэтому зондируя волокно короткими импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов можно найти распределение вдоль волокна спектра бриллюэновского рассеяния и, соответственно, частоты максимального сигнала в этом спектре. А так как эта частота пропорциональна величине натяжения в волокне, то таким образом находится распределение этого натяжения вдоль волокна.

Спектральные компоненты, обусловленные бриллюэновским рассеянием света, обладают важным для практических применений свойством, их частота смещена на величину пропорциональную натяжению (относительному удлинению  $\varepsilon$ ) волокна:

$$f_B = f_{B0} + K\varepsilon,$$

где  $f_{B0}$  – смещение частоты в отсутствие натяжения волокна. На рисунке 4 представлен график зависимости частоты от удлинения волокна.

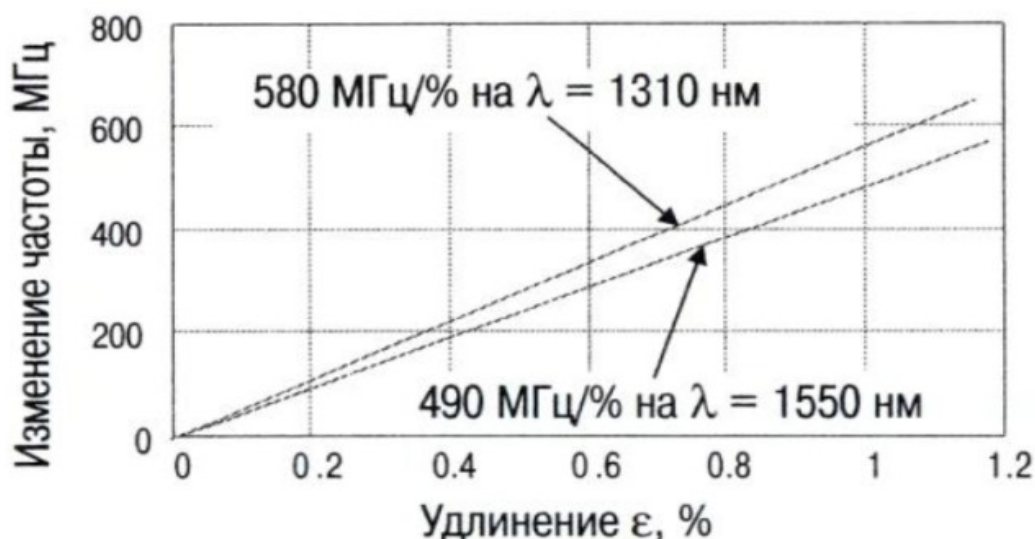


Рис. 4. Зависимость частоты рассеянного света от удлинения волокна

Относительная точность при измерении натяжения волокна ограничивается величиной отношения сигнал/шум. Абсолютная же точность ниже, так как величина  $f_B$  зависит не только от натяжения волокна, но и от степени легирования сердцевины и температуры волокна. Влияние поперечного давления и скручивания волокна незначительно. Изменение температуры волокна на  $10^\circ\text{C}$ , учитывая, что частота рассеянного света изменяется со скоростью порядка  $1 \text{ МГц}/^\circ\text{C}$  (рисунок 5), приводит к погрешности в измерении натяжения  $\sim 0.02\%$ . Изменение температуры на  $1^\circ\text{C}$  оптического волокна Corning 652D приводит к изменению частоты на  $1.05 \text{ MHz}$ .

Сочетая два выше указанных физических явления, возможно измерить на основе бриллюэновского рассеяния одним прибором и температуру, и деформацию оптической линии. Метод измерения приведен на рисунке 6.

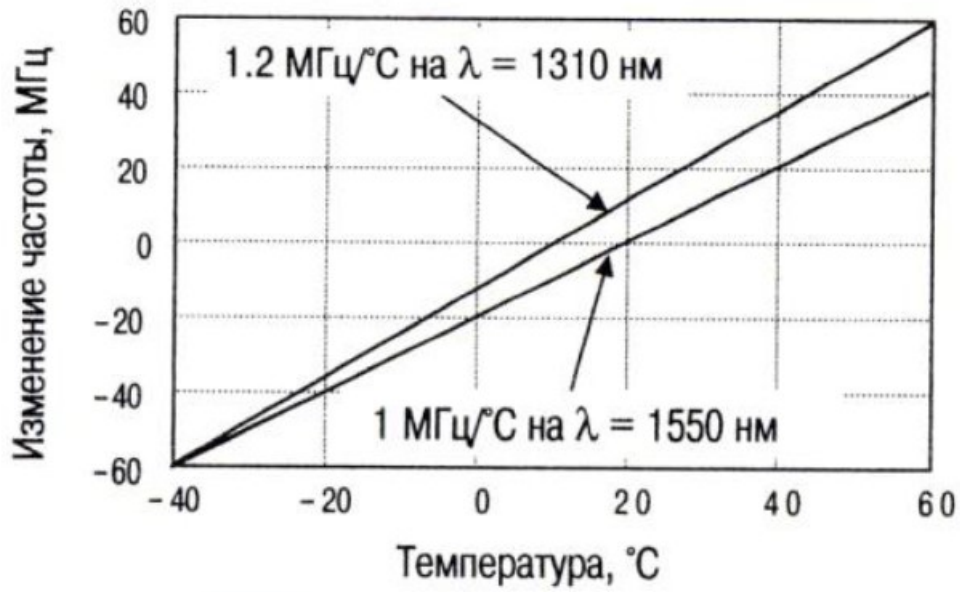


Рис. 5. Зависимость частоты рассеянного света от температуры волокна

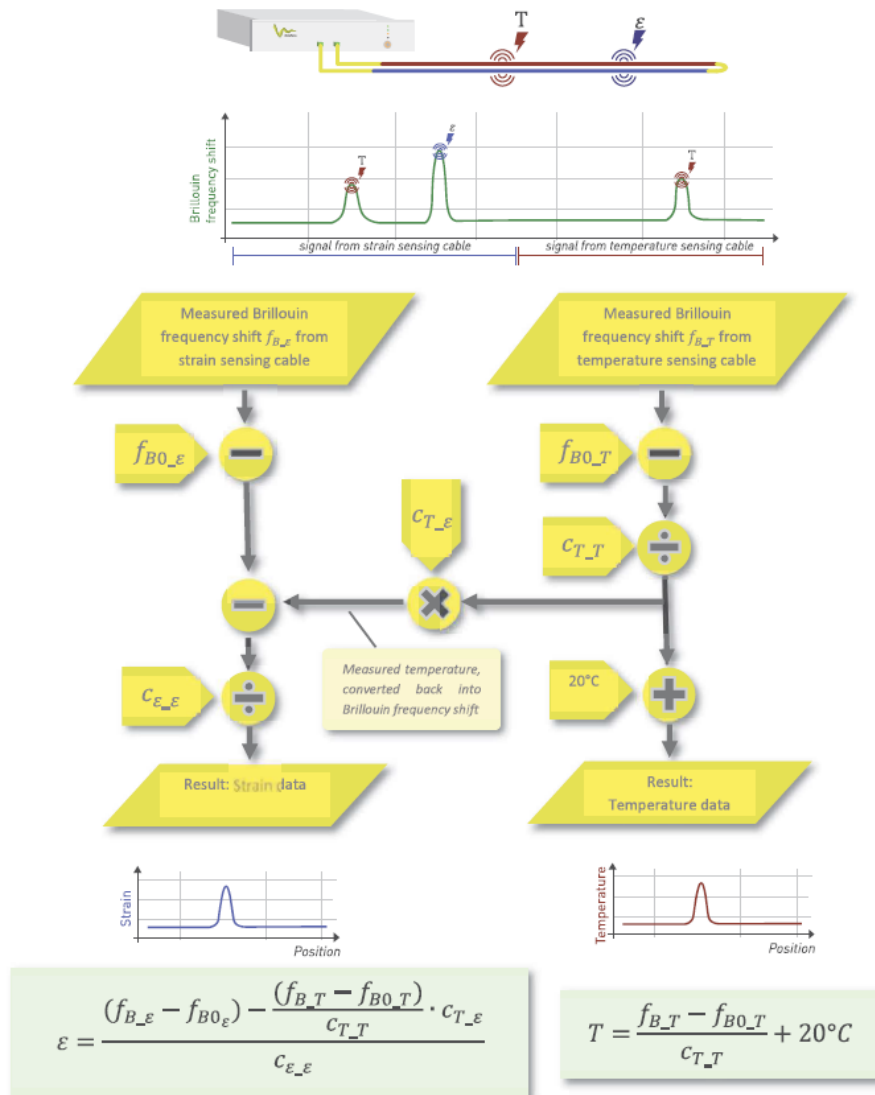


Рис. 6. Измерения деформации и температуры оптической линии

### Лабораторные работы

В ходе изучения технологии DSS были проведены испытания в лабораторных условиях с использованием измерительного прибора DSS, fTB 5020 производства компании FibrisTerre (Германия), технические характеристики прибора приведены в таблице 1. Испытания на прямое растяжение проводились на электромеханической разрывной машине Zwick Z050, дополнительное измерение удлинения при помощи видеоэкстензометра Zwick. Перед испытанием образец – оптическое волокно Corning 652D длиной 720 мм был установлен в зажимных захватах машины при помощи фрикционной ленты.

Таблица 1

Технические характеристики прибора fTB 5020

Параметр	Характеристика	Примечание
Разрешающая способность	До 2 км – 0.2м До 25 км – 0.5м До 50 км – 1.0м	Параметр характеризует локализацию участка с растяжением
Измеряемые характеристики	Стрейн < 2με, в диапазоне +/- 3% Температура < 0.1 °С, в диапазоне -200 до +1000°С. Бриллюэновская частота <100 kHz	В один момент времени возможно измерить либо температуру, либо стрейны.
Количество каналов	2 канала	Назначение второго канала – режим оптического анализатора.

Первая серия испытаний заключалась в ступенчатом нагружении образца по схеме, представленной на рис. 7. Значения абсолютного удлинения образца составляли 1,8 мм, 3,6 мм и 5,4 мм на I, II и III ступенях соответственно, что соответствует величинам относительной деформации 0,25%, 0,50% и 0,75%. При этом предельное значение деформации для упругой зоны волокна составляет 1%. На каждой ступени в течение 7 мин производилась выдержка образца под нагрузкой. За это время интеррогатором выполнялись измерения оптических параметров волокна.

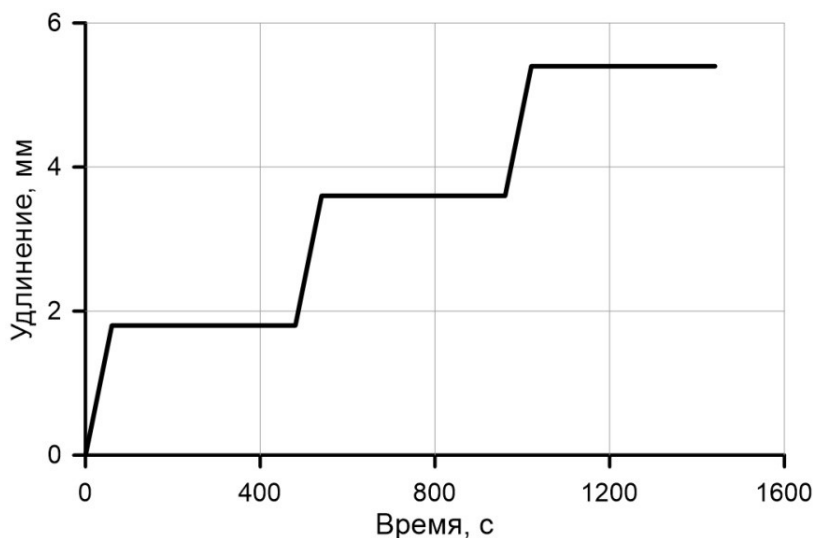


Рис. 7. Схема ступенчатого нагружения оптического волокна

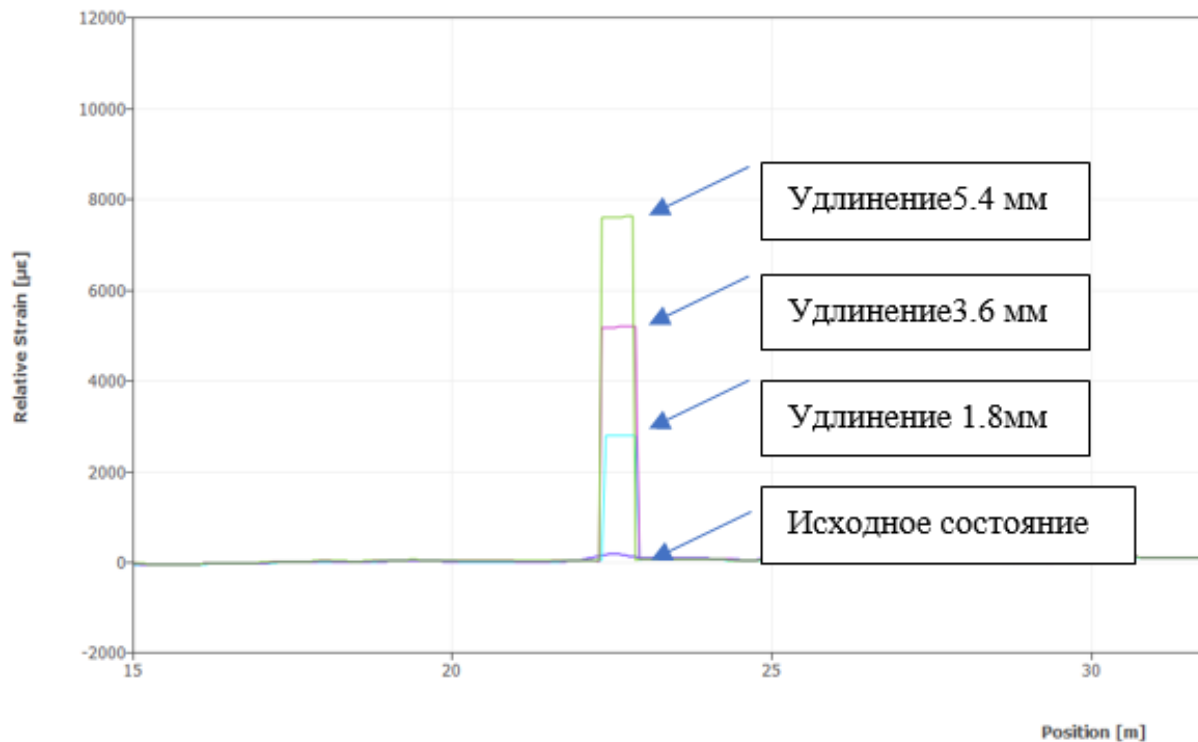


Рис. 8. Результаты измерений оптической линии из ПО прибора fТВ 5020 в процессе выполнения 1-й серии испытаний

Таблица 2

Сравнение результатов измерения деформации волокна в 1-й серии испытаний на растяжение

Удлинение	1,8 мм	3,6 мм	5,4 мм
Расчетная деформация на базе 720 мм	0,25 %	0,50 %	0,75 %
fТВ 5020	2777,7 µε	5168,0 µε	7598,0 µε
Удлинение $\Delta L_{расч}$	1,998 мм	3,720 мм	5,470 мм
Видеоэкстензометр	0,22 %	0,45 %	0,70 %

*Выводы по результатам 1-й серии испытаний на растяжение:*

Полученные характеристики с прибора fТВ 5020 очень близки к значениям, заданным на испытательной машине. Погрешность измерения в целом в большей степени связана с недостаточной точностью измерения участка волокна (720 мм получили при измерении металлической линейкой) и процессами микропроскальзывания волокна в зажимах испытательной машины в момент первичного нагружения (максимальная погрешность наблюдается при удлинении 1,8 мм).

Вторая серия испытаний состояла в растяжении образца волокна на 1,8 мм и выдержке при данном значении удлинения в течение 20 мин (рис. 9). В это время производился нагрев недеформированного участка волокна до 50°C при помощи строительного фена. Измерения оптических параметров волокна осуществлялись до и в процессе нагрева. Результаты измерений интеррогатором представлены на рисунке 10.

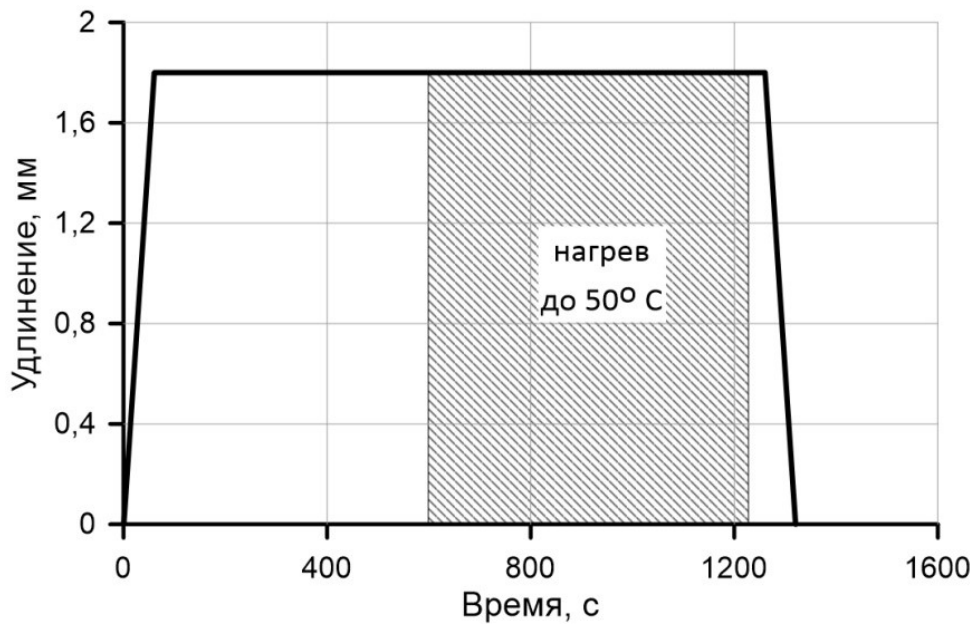


Рис. 9. Схема нагружения оптического волокна с нагревом

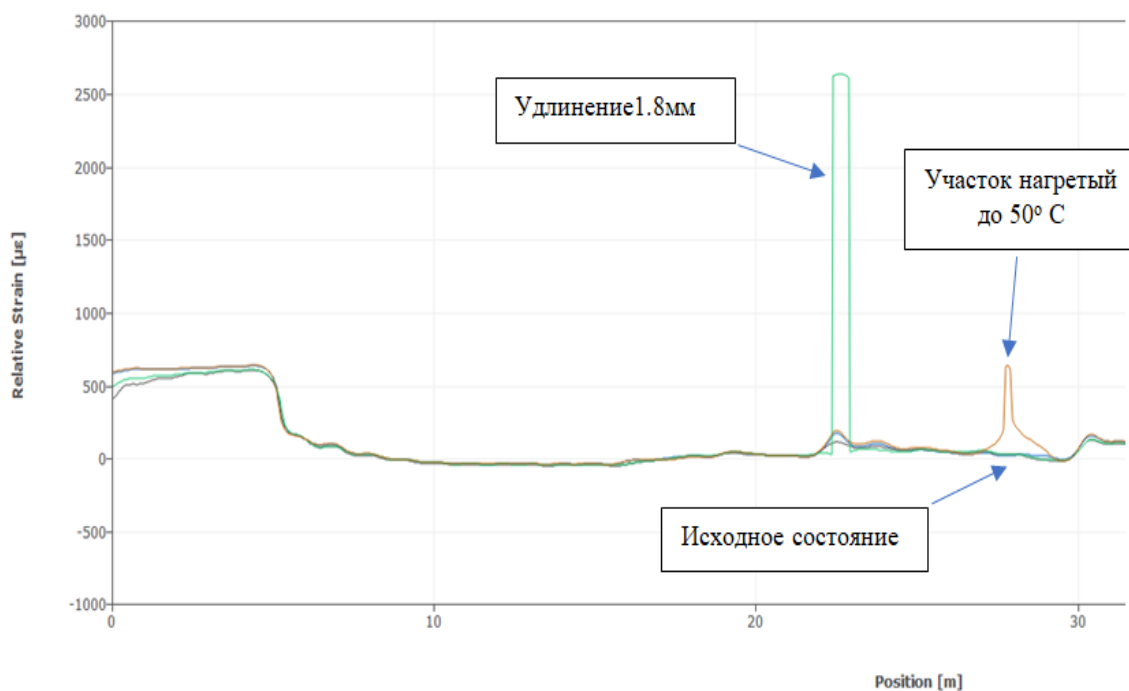


Рис. 10. Результаты измерений оптической линии из ПО прибора fTB 5020 в процессе выполнения серии испытаний

На полученном графике отчетливо видно, что бриллюэновская частота участков волокна изменяется под воздействием деформации и температуры.

#### *Выводы по результатам 2-й серии испытаний*

Для достоверной идентификации события, происходящего на измерительной оптической линии, и нивелирования температурной составляющей необходимо предварительно измерять температуру свободно уложенных оптических волокон (не подверженных деформации) в DSS кабеле, либо использовать метод измерения, приведенный на рисунке 6.



### DSS кабели



Рис. 11. Конструкция волоконно-оптического кабеля

Конструкция кабеля определяется его назначением и местом прокладки. Для обычных телекоммуникационных кабелей применяется конструкция со свободно уложенным оптическим волокном в оптическом модуле (см. рисунок 11), для защиты волокна от растяжения и изгиба кабеля. Для измерения распределенной деформации необходимы кабели с жесткой фиксацией внешней изоляции и оптического волокна для передачи растягивающего усилия на оптическое волокно (см. рисунок 12). Также существуют варианты комбинированных кабелей DTS, DSS, DAS. Для этого предусматривают различные волокна – многомодовые, одномодовые и различные способы укладки волокна в кабель – в центре оптический модуль со свободно уложенными волокнами (для DTS, DAS), по краям волокна, склеенные с внешней изоляцией кабеля (для DSS).

В зависимости от способа и условий монтажа, а также условий работы производители кабельной продукции, предлагают следующие решения:

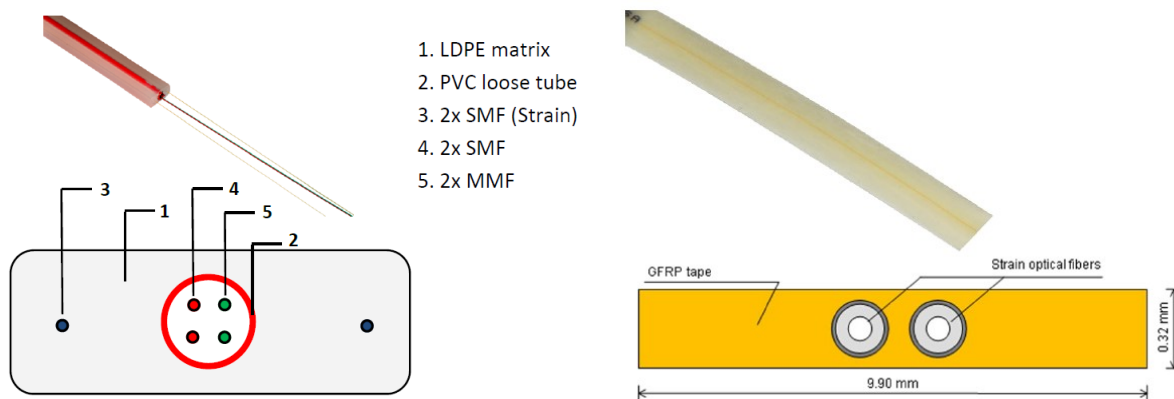


Рис. 12. Плоский кабель DSS.

Слева комбинированный кабель, справа кабель только с волокнами для DSS

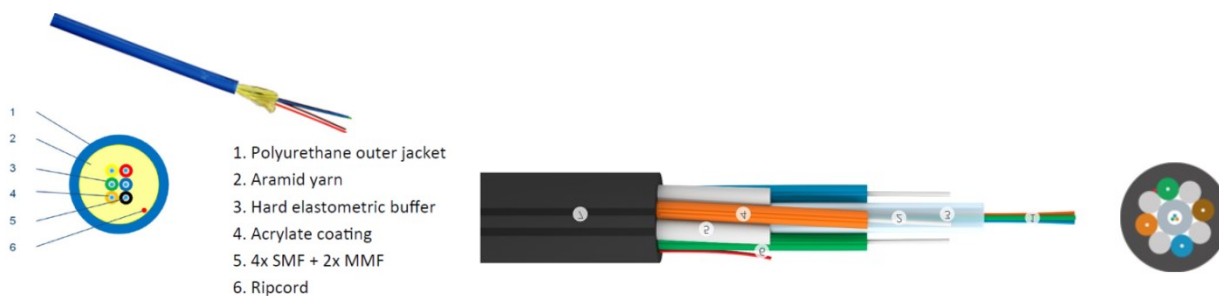


Рис. 13. Круглые кабели, комбинированные. Волокна для DSS измерений и волокна для DTS, DAS

### Варианты применения DSS технологии

На данный момент технологию DSS применяют для применения при мониторинге – мостов, дамб, плотин, тоннелей, присадки грунтов и т.п. Оптические кабели возможно закладывать в конструкцию сооружения уже на этапе строительства, что позволяет получить объект с интегрированной системой мониторинга деформации. На рисунке 14 приведен вариант расположения кабеля DSS на арматуре железобетонной конструкции перед заливкой бетоном.



Рис. 14. DSS кабель в железобетонной конструкции

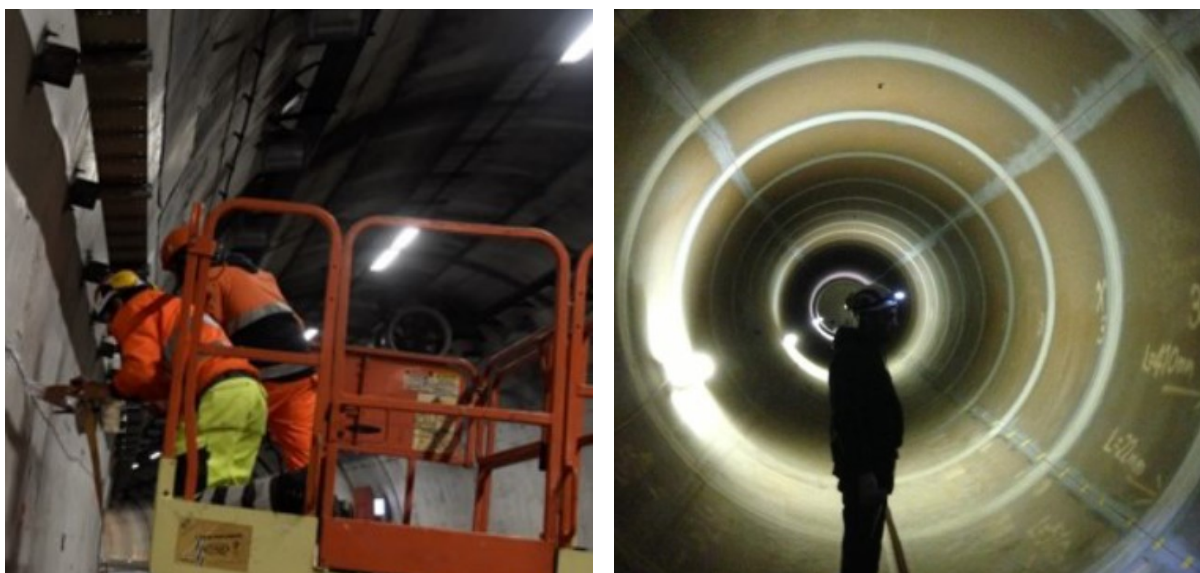


Рис. 15. Монтаж кабеля в тоннелях

Также возможно оснастить уже существующий объект системой распределенного мониторинга. На рисунке 15 приведены варианты монтажа кабеля в тоннелях при помощи специального клеевого состава или специальных крепежных элементов.

В заключение хотелось бы отметить, что для мониторинга горно-капитальных сооружений возможно комплексировать измерения DSS дополнительными измерениями DTS и DAS, что позволит получать дополнительную информацию об объекте мониторинга. Например, возможно использовать систему распределенного измерения для мониторинга деформации в шахтных стволах, при комплексировании DSS системой DAS возможно получать информацию о деформации и акустической эмиссии в структуре бетона, а также при помощи DTS получать информацию о температурном расширении материала.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 121111800053-1).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005. – 208 с.: ил.
2. Matta F., Bastianini F., Galati N., Casadei P., Nanni A. Distributed strain measurement in steel bridge with Fiber optic sensors: Validation through diagnostic load test // Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2008. – V. 22, № 4. – P. 264-273.
3. Minardo A., Bernini R., Amato L., Zeni L. Bridge monitoring using Brillouin fiber-optic sensors // IEEE Sensors journal. – 2012. – V. 12, № 1. – P. 145-150.
4. Regier R., Houlst N.A. Distributed strain behavior of a reinforced concrete bridge: Case Study // Journal of Bridge Engineering. – 2014. V. 19, № 12. – номер статьи 05014007.
5. Moser F., Lienhart W., Woschitz H., Schuller H. Long-term monitoring of reinforced earth structures using distributed fiber optic sensing // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2016. – V. 6, № 3. – P. 321-327.
6. Feng X., Han Y., Wang Z., Liu H. Structural performance monitoring of buried pipelines using distributed fiber optic sensors // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2018. – V. 8, № 3. – P 509-516.
7. Buchmayer F., Monsberger C.M., Lienhart W. Advantages of tunnel monitoring using distributed fibre optic sensing // Journal of Applied Geodesy. – 2021. – V. 15, № 1. – номер статьи 0065. – DOI: 10.1515/jag-2019-0065.
8. Billon A., Hénault J.M., Quiertant M., Taillade F., Khadour A., Martin R.P., Benzarti K. Qualification of a distributed optical fiber sensor bonded to the surface of a concrete structure: A methodology to obtain quantitative strain measurements // Smart Materials and Structures. – 2015. – V. 24, № 11. – номер статьи 115001.
9. Fischer O., Thoma S., Crepez S. Distributed fiber optic sensing for crack detection in concrete structures // Beton-und Stahlbetonbau. – 2019. – V. 114, № 3. – P. 150-159. – DOI: 10.1002/best.201800089.

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2022.2.9

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРИ СДВИГЕ СКАЛЬНЫХ ПОРОД ПО ТРЕЩИНАМ

В.С. Кузьминых

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Проведены испытания образцов скальных пород месторождения Саяк IV (республика Казахстан) в режиме сдвиг со сжатием по трещинам. Испытания проводились по многоступенчатой схеме нагружения на сдвиговой сервогидравлической испытательной установке MTS 816 при вертикальных нагрузках – 0,5, 1,0 и 2,0 МПа. По результатам испытаний получены сдвиговые паспорта прочности, а также зависимости изменения жесткости сдвига по трещине от величины нормального напряжения.

**Ключевые слова:** скальная порода, трещина, сдвиговой паспорт прочности, жесткость сдвига.