СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Российские железные дороги

Цели применения волоконно-оптических систем мониторинга

✔ **Повышение безопасности.**

Непрерывный мониторинг помогает выявить количественные критерии состояния объекта, оценить последствия этих изменений, прогнозировать дальнейшее изменение состояния объектов и дает возможность заблаговременного выполнения ремонтных работ для предотвращения аварий.

✔ **Экологическая и экономическая эффективность.**

Отсутствие систем мониторинга или их несовершенство может привести к катастрофам, экономический ущерб которых просто невозможно подсчитать в разумных пределах. Техногенные катастрофы могут привести к необратимым экологическим последствиям.

✔ **Эффективность использования и управления.**

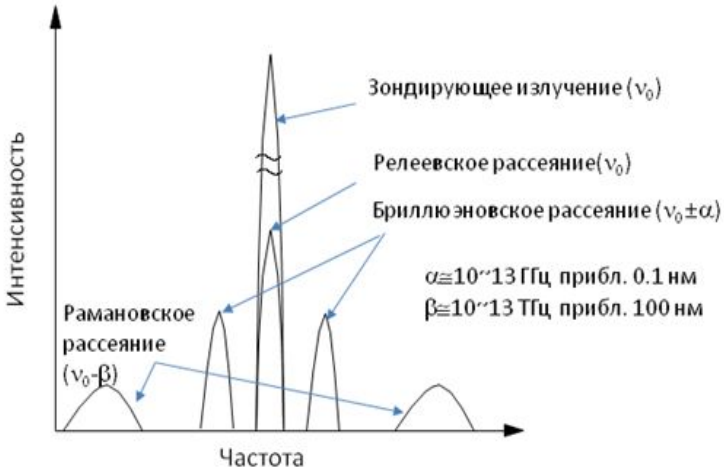
Тенденция развития АСУ ТП на различных объектах невозможна без знаний об их состоянии. Контроль состояния объекта приводит к его эффективному использованию за счет возможности перераспределения нагрузок, частоты использования и т.д. Особенно это актуально для ‘сильно’ устаревших объектов, которые требуют замены либо проведения постоянного мониторинга состояния.

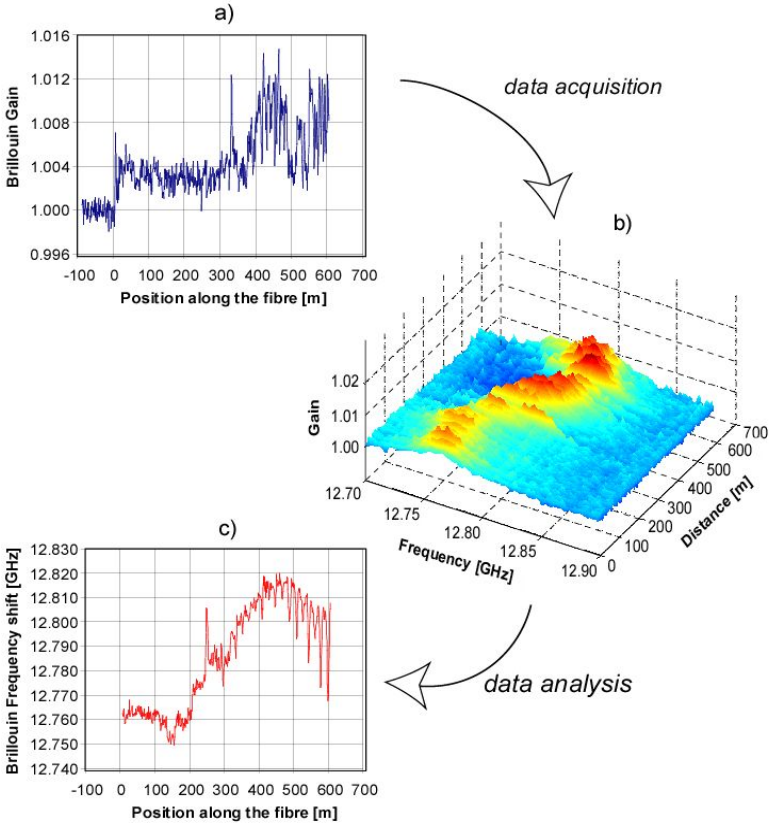
Волоконно-оптическая система геотехнического мониторинга (ВОС ГТМ)

Система мониторинга представляет собой измерительный анализатор, волоконно-оптический сенсор (ВОС) и специализированное программное обеспечение (ПО). Анализатор может располагаться в любом отапливаемом помещении либо в не отапливаемом боксе (тогда его помещают в термошкаф). Диапазон действия одного анализатора до 40 км. ВОС представляет собой непрерывный волоконно-оптический кабель различной конструкции в зависимости от назначения и условий эксплуатации. ВОС является эквивалентом огромного количества точечных датчиков (программное обеспечение позволяет разбить контролируемый участок длиной 40 км на 100 000 подучастков/датчиков) .

Оптическое волокно в сенсоре изменяет свои оптические характеристики при изменении различных параметров (температуры, сжатия/растяжения, акустического давления и т.д.). ВОС является не только чувствительным элементом системы мониторинга, но и средой для передачи информации. Он может содержать избыточное количество телекоммуникационных одномодовых волокон, которые можно использовать для нужд заказчика, не связанных с системой мониторинга.

Принцип действия





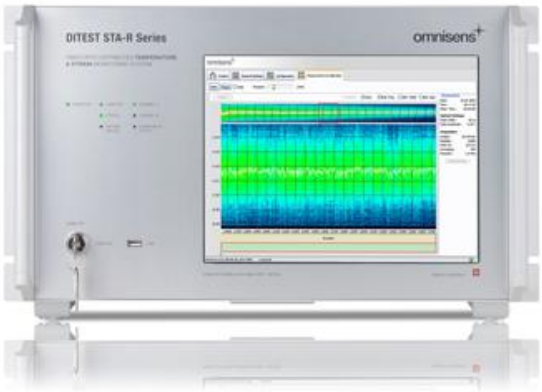
Принцип работы построен на вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна, которое возникает при распространении лазерного излучения накачки в волокне и короткого зондирующего импульса направленных навстречу друг другу с разных концов сенсора. Бриллюэновское рассеяние характеризуется сдвигом частоты рассеянного сигнала относительно начального (зондирующего) сигнала. Данный сдвиг частоты зависит от скорости звуковой волны в оптическом волокне, которая в свою очередь зависит от температуры и механического напряжения волокна. Таким образом, можно контролировать состояние любого участка оптического волокна (расстояние до конкретного участка волокна рассчитывается с помощью программного обеспечения инсталлированного в анализаторе по принципу радара, когда отраженный от того или иного участка сигнал возвращается на фотоприемник с временной задержкой относительно зондирующего сигнала, пропорциональной расстоянию до этого участка).

Методика получения информации основана на последовательной регистрации бриллюэновских взаимодействий на различных характерных частотах. Сначала составляется полная частотная характеристика оптического волокна как функция расстояния, а затем производится расчет локального бриллюэновского сдвига частоты с учетом максимального бриллюэновского взаимодействия в каждой точке оптического волокна, как показано на рисунке.

Основные технические характеристики волоконно-оптических систем мониторинга (анализатор)

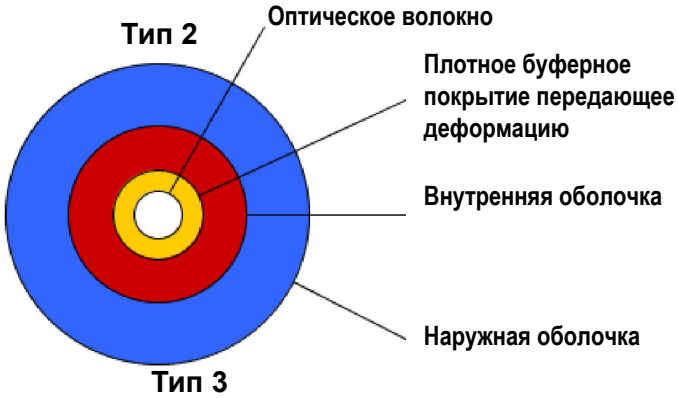
Характеристики	Количество каналов	2 независимых и переключаемых канала (стандартно). Максимальное количество каналов 20.		
	Сенсорное оптоволокно	Стандартное одномодовое оптическое волокно		
	Дальность	50 км		
	Пространственное разрешение* *Типичное*	0.5 до 20 м. (при дискретности 0.1 м) 1 м при 20 км / 2 м при 30 км / 3 м при 50 км		
	Разрешающая способность по дальности	0.1 м		
	Количество точек измерения	100 тыс.		
	Измеряемые величины	Механические деформации, Бриллюэновский сдвиг частоты, значения Температуры, коэффициент Бриллюэновского усиления и ширина полосы.		
		Брилл. сдвиг частоты	Температура	Деформации
	Разрешение	0.1 МГц	0.1°C	2 με
	Диапазоны	10 ГГц- 13 ГГц	до ограничено оптоволокном	- 3% сжатие до + 3% растяжение
	Время сбора данных	10 сек. минимальное 1- 2 мин. типичное 5-10 мин. измерения с высоким разрешением		
Технические данные	Графический интерфейс	SVGA цветной монитор (12") 1024x768		
	Обмен данными и соединения	Порты Ethernet, USB, RS232, выходные реле SPTP (сигнал тревоги и системный статус, Макс. 230 В переменного напряжения и током 1 А)		
	Хранение данных	Встроенный жесткий диск (160 ГБ или более)		
	Формат данных	База данных, текстовые файлы, MS Excel, растровый график		
	Оптические разъемы	E-2000 / APC		
	Рабочая температура	от 0 до		
	Размеры (Ш x Г x В)	449 x 500 x (стойка 19")		
	Вес			
	Питание	100-240 В; 50-60 Гц; макс. 200 Вт		
Особенности	Режимы измерения	Ручное или полностью автоматическое измерения		
	Конфигурация	Автоматическая конфигурация измерений (автоматическая настройка к различным условиям)		
	Анализ данных	Анализ измерений, Сравнение сгруппированных результатов сканирования с выбранной линией отсчета, измерение тенденций, графическое изменение масштаба и т.д.		
	Удаленный доступ	Удаленное управление, конфигурирование и обслуживание по протоколу TCP/IP		
	Система контроля (Watch dog)	Продолжительная работа 24/7 обеспечивается системой автоматического восстановления и постоянной самодиагностики		
	Сигналы и предупреждения	Автоматическое включение аварийного сигнала, настраиваемые типы аварийных сигналов (температура, деформация,…)		
	Система мониторинга	Непрерывный контроль системы, включая системный статус, качество измерений,		

Анализатор физических величин



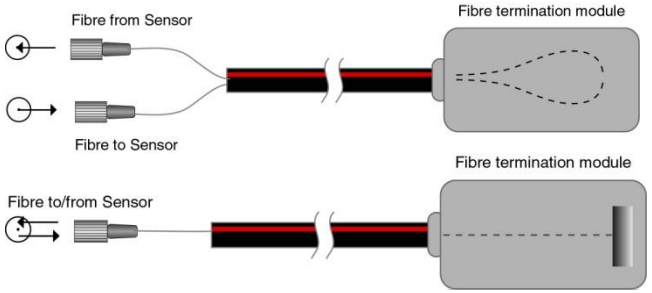
Основные технические характеристики волоконно-оптических систем мониторинга (сенсор)

Примеры конструкций сенсоров деформации



Диапазон измерения деформации □ Долговременное измерение □ Кратковременное измерение	 от - 1% сжатие до +1% растяжение, от – 1,5% сжатие до +1,5% растяжение
Параметры измерения температуры □ Диапазон измерения, °C □ Повторяемость, °C	 от -40 до 50 1.2
Максимально допустимое усилие растяжения □ Долговременное (соотв. растяжению 1%)	470 Н (Тип 1) 27 Н (Тип 2) 3 000 Н (Тип 3)
Максимально допустимое раздавливающее усилие	>300 Н/см
Диаметр (OD)	3.2 мм (Тип 1), 2.8 мм (Тип 2), 4 мм (Тип 3)
Материал внешней оболочки	PA (полиамид)
Минимальный допустимый радиус изгиба	20 x OD (Тип 1) 15 x OD (Тип 2) 15 x OD (Тип 2)
Тип оптического волокна	Одномодовое волокно ITU-T G657
Километрическое затухание (на длине волны 1.55 мкм)	< 0.6 дБ/км (типично 0.5 дБ/км)
Диапазон температур □ Хранения □ Инсталляции **(*)** □ Эксплуатации	 от -40°C до +70°C от 0°C до +40°C от -40°C до +60°C (до 250 °C для тип 3)
Масса	10.2 кг/км (тип 1), 7.5 кг/км (тип 2), 28 кг/км (тип 3)
Строительная длинна	До 4 км

Варианты исполнения сенсоров



Варианты инсталляции сенсоров

- ✔ крепление на поверхность объекта:
  - ✔ бетон
  - ✔ металл
  - ✔ пластик
- ✔ укладка в грунт
- ✔ заливка в бетон

Преимущества распределенных волоконно-оптических датчиков

✔ Волоконно-оптические датчики (ВОД) пассивны и не требуют электропитания.
Сигнал датчика представляет собой световое излучение, которое передается по оптическому волокну.

✔ Сигнал в оптическом волокне не подвержен наводкам.
Электромагнитные возмущения - грозовые разряды, близость к линии электропередачи, импульсам тока в силовой сети и т.д. – не искажают сигнал.

✔ ВОД устойчивы к химическим и механическим воздействиям.
Коррозионно-стойкие, особенно к химическим растворителям, маслам, воде.

✔ ВОД работоспособны в широком диапазоне температур.
Стандартные ВОД имеют рабочий диапазон температур от -40^{0}С до +85^{0}С, специальные – от -270^{0}С до +700^{0}С.

✔ ВОД имеют широкое разнообразие конструкций:
-Полностью диэлектрические;
-Взрывобезопасные;
-Различная степень защиты от внешних воздействий;
-Компактные (с диаметром от 0,15 мм).

✔ ВОД могут быть установлены различными способами:
В грунт, в бетон, на поверхности конструкции, в электрический кабель.

✔ Расчетный срок службы ВОД превышает 25 лет.

✔ В ряде случаев своего применения ВОД представляет из себя стандартный телекоммуникационный волоконно-оптический кабель, который можно использовать для организации связи.

Мониторинг состояния объектов инфраструктуры РЖД

Внедрение волоконно-оптической распределенной системы объекта (мост, туннели, склоны и т.д.), позволяет:

1. **Контролировать**

- Мониторинг состояния сооружения в реальном режиме времени.
- Анализ динамики изменения напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций (статические растяжения, сжатия);
- Мониторинг подвижек грунта (оползни, сели);
- Мониторинг возникновения трещин и их локализация;
- Собственные квази-динамические колебания сооружения (~ до 1 Гц) и соответствующие им смещения элементов конструкций;
- Мониторинг фундаментов/оснований мостовых сооружений;
- Мониторинг свода туннеля;
- Контроль распределения температуры вдоль объекта (перегрев в процессе эксплуатации, возгорание, утечки, детектируемые по изменению температуры)
- Мониторинг вибрационных нагрузок на конструкцию;

2. **Прогнозировать**

- Анализ динамики изменения состояния конструкции моста за период позволяет прогнозировать его дальнейшие изменения и возникновение критических ситуаций;
- Система предварительной закладки сенсоров позволяет провести анализ движения грунтов и учесть данную информацию при проектировании объекта

3. **Предупреждать**

- Система позволяет задавать критические состояния объекта при которых происходит оповещение служб эксплуатации и безопасности;
- Система позволяет разделить критические ситуации (алармы) на уровни по степени опасности;
- Анализ данных и прогнозирование позволит предупреждать возникновения аварий и вовремя проводить профилактические работы;

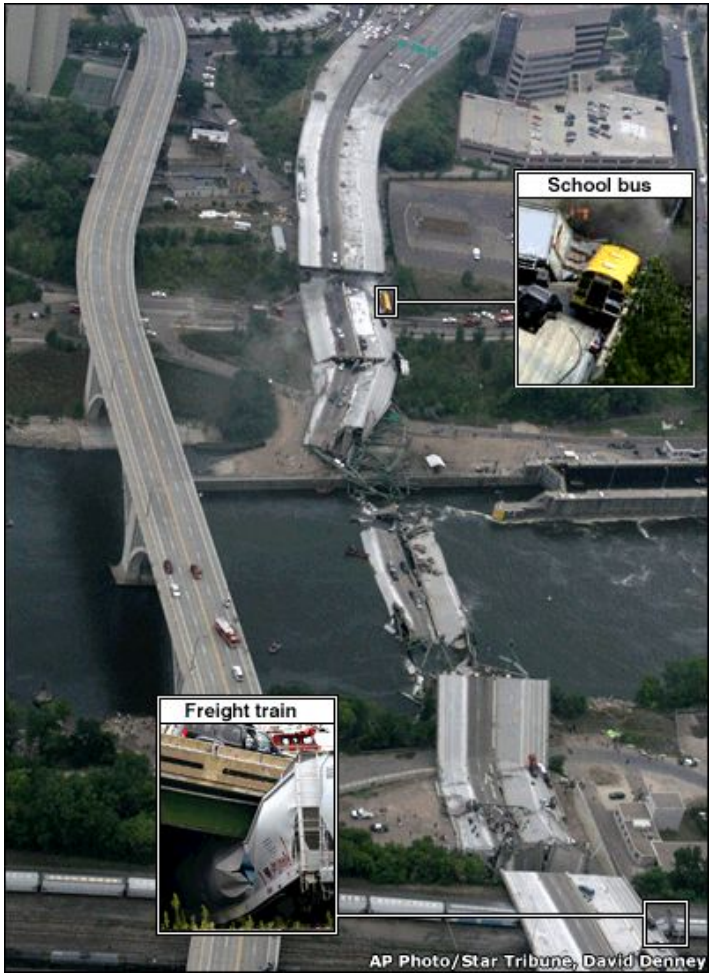
4. **Экономить**

- Система позволит увеличить межремонтные интервалы
- Система позволит предотвратить возможные возникновения аварий и нанесение ущерба собственнику объекта
- Система позволяет принимать решение о продлении срока эксплуатации объекта
- Система позволит оценивать качество строительства и проектирования сооружений

Мониторинг технического состояния мостовых сооружений

По данным американской организации FHWA (Federal Highway Administration) не менее 56% данных о состоянии мостовых сооружений, получаемых от периодического выездного обследования, дают неверную оценку состояния объекта.

Недостаточность периодических (выездных) обследований сложных мостовых сооружений наглядно демонстрирует пример катастрофического разрушения моста в г. Миннеаполис, США, произошедшее в августе 2007 года. Данный арочный железобетонный мост проходил до этого инспектирование состояния в 2006 г. и получил положительное заключение экспертов.

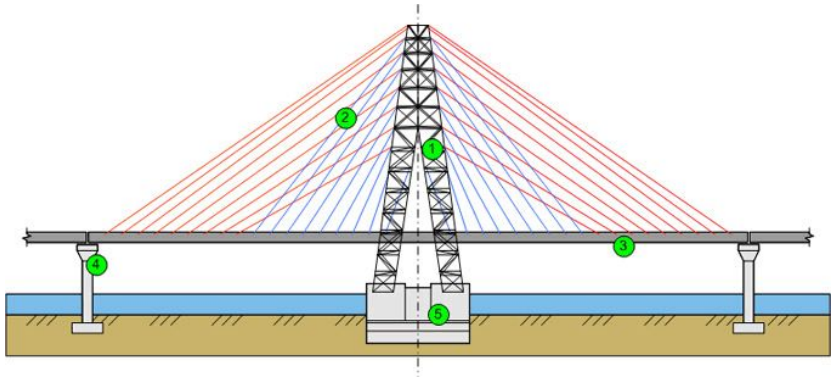


Мониторинг состояния мостов

Причинами мостовых деформаций могут быть как медленные, но постоянные процессы (почвенные процессы в области фундамента моста, старение и коррозия материалов и т.д.), так и быстрые, но периодические процессы (ветровая нагрузка, температурные градиенты, движение транспорта по мосту (распределение масс) и т.д.). Поэтому в зависимости от конструкции моста (висячий, балочный, арочный, пилонный, консольный и т.д.; длины пролетов и т.д.), вида применяемых материалов (преднапряженный либо обычный бетон, цельнометаллическая конструкция и т.д.), особенностей местности (состояние почв, климатические условия) и условий эксплуатации (транспортный трафик) определяются критические элементы моста и по каким параметрам эти элементы крайне желательно контролировать.

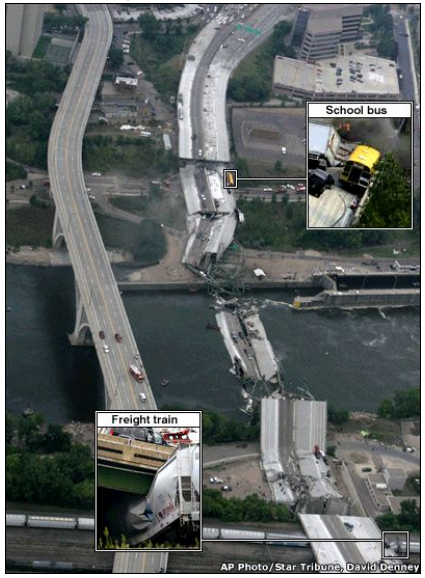
Контроль элементов конструкции мостового сооружения:

1 – арочный пилон;
2 – вантовая система;
3 – несущие балки моста в вантовом и балочных пролетах;
4 – опоры балочных пролетов;
5 – опоры арочного пилона.



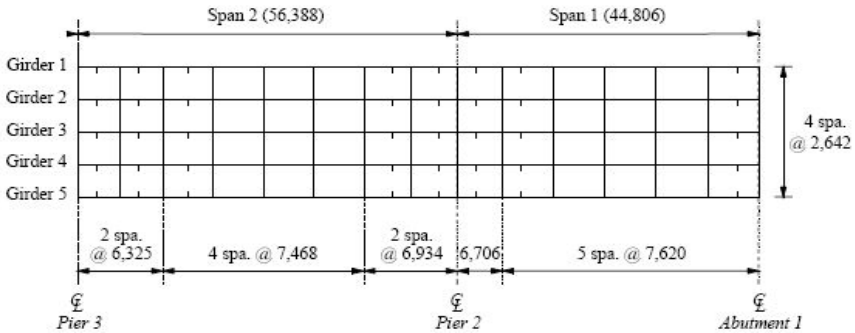
По данным американской организации FHWA (Federal Highway Administration) не менее 56% данных о состоянии мостовых сооружений, получаемых от периодического выездного обследования, дают неверную оценку состояния объекта.

Недостаточность периодических (выездных) обследований сложных мостовых сооружений наглядно демонстрирует пример катастрофического разрушения моста в г. Миннеаполис, США, произошедшее в августе 2007 года. Данный арочный железобетонный мост проходил до этого инспектирование состояния в 2006 г. и получил положительное заключение экспертов.



Мировой опыт. Мониторинг состояния мостов.

Мост A6358, расположен на реке Осейдж в штате Миссури, США. Конструкция моста симметрична и представляет собой пять непрерывных пролетов шириной 12,4 м и общей длиной 263 м, при этом длина центрального пролета 61 м, по 2 одинаковых пролета длиной 45 м и 56 м.



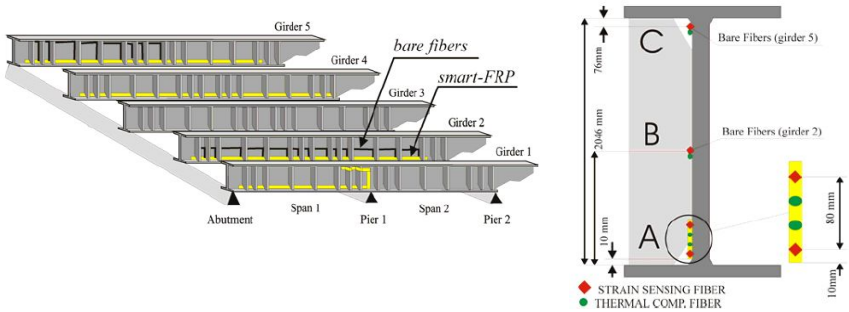


Схема расположения сенсоров деформации.

Мост Götaälvbron в Стокгольме длиной 1000 м. В течении нескольких лет проводились работы по техническому обслуживанию моста, которые выявили множество трещин в железобетонной конструкции.

Целями долгосрочного мониторинга с помощью распределенной волоконно-оптической системы мониторинга моста Götaälvbron:

(1) Обнаружение и локализация новых трещин, которые могут возникнуть из-за усталости материалов конструкции
(2) Обнаружение необычных краткосрочных и долгосрочных изменений деформации
(3) Обнаружение трещин и необычных изменений деформации по всей длине пяти балок, в общей сложности 5 км
(4) Время проведения нового измерения каждые два часа
(5) Выполнение самодиагностики системы мониторинга для обнаружения неисправности самой системы
(6) Удобная и понятная визуализации данных измерений
(7) Автоматическая выдача сигналов тревоги ответственным лицам
(8) Срок службы системы мониторинга не менее 15 лет

В случае обнаружения трещин, выявления необычных изменений деформаций или обнаружения неисправности системы предупреждения направляются ответственным лицам в виде электронной почты, SMS и голосовых сообщений.

Мониторинг состояния мостов

Риски	Бетонный балочный мост	Стальной балочный мост	Бетонный консольный мост	Арочный мост	Вантовый мост	Висячий мост
Соответствие между конечно-элементной моделью и реальным состоянием моста	**	**	**	**	*	*
Динамическая деформация, обусловленная интенсивностью движения транспорта, ветра, землетрясения,		***		*	***	***
Медленные деформации, ослабление предварительного напряжения	***		***			
Изменения мощности кабеля					**	**
Соответствие между подсчитанным режимом (типом) колебаний и реальным состоянием моста	*	*	*	*	*	*
Неработающие опоры и расширительные швы	**	**	**		**	*
Образование трещин в бетоне или стали	*	*	*	*	*	*
Изменения температуры и температурных градиентов в несущей конструкции	***	***	***	***	***	***
Неоднородная осадка опор или оснований моста	*	*	**	**		
Изменения уровня воды или порового давления воды вокруг основания моста	*	*	*	*	*	*
Устойчивость откоса вокруг основания и концевой опоры моста	*	*	*	*		
Изменение химической среды бетона: карбонизация, реакция между щелочами и кремнеземом, хлорирование	***	*	***	**	**	**
Условия окружающей среды				*	***	***

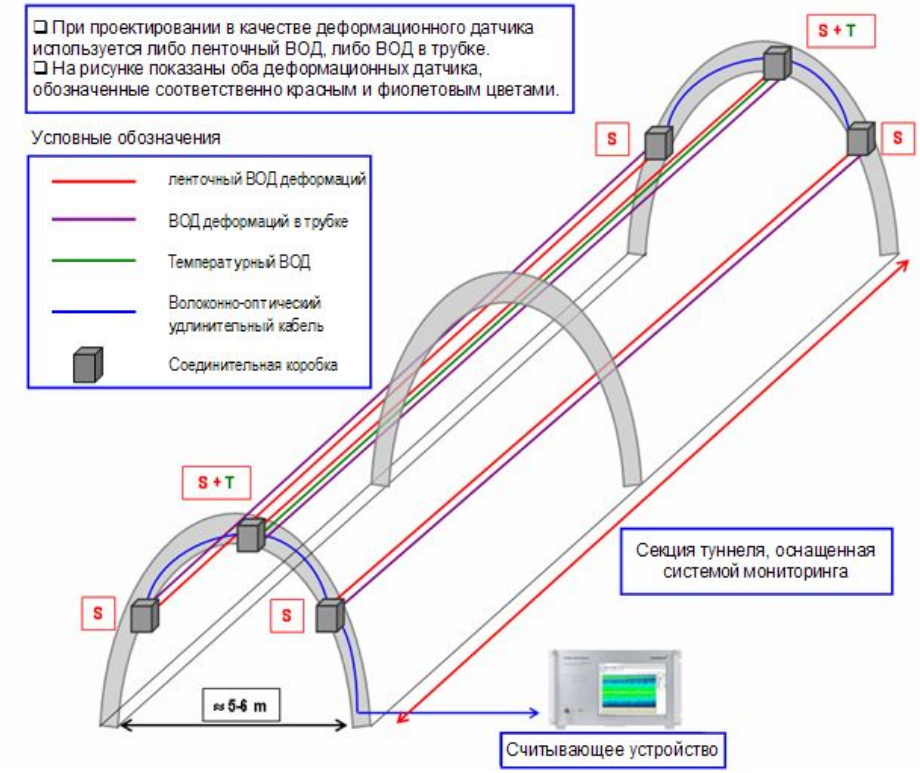
**** - показывают уровень риска (* - риск минимален, ** - средний риск, *** - риск максимален, пусто – риск отсутствует)**

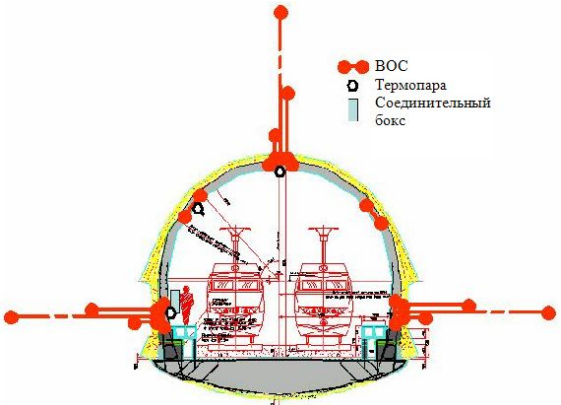
Мониторинг состояния туннелей

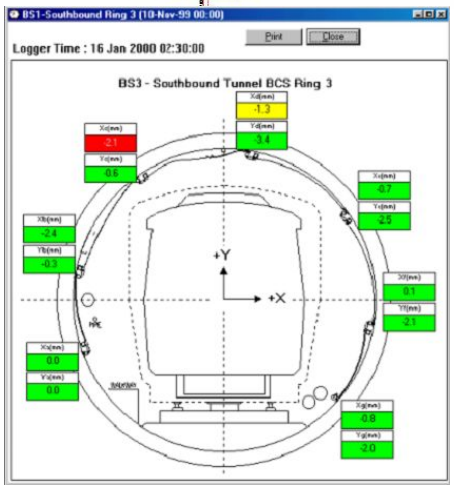
Выделяют основные задачи решаемые системами мониторинга:

1. Мониторинг в период строительства – активные переходные процессы смещения грунтовых масс, вызванных изъятием грунта.
2. Мониторинг строительных работ, производимых рядом с объектом (актуально в городских условиях и рядом с крупномасштабным строительством).
3. Долговременный мониторинг – необходим в связи с проявлениями усталости материалов свода туннеля, размыванием грунтовыми водами околотуннельных почвенных масс, а так же влиянием движений грунтов на конструкцию туннеля.
4. Мониторинг вибрационных нагрузок на конструкцию туннеля проходящими составами.

Пример организации системы комплексного мониторинга туннеля на базе волоконно-оптических сенсоров



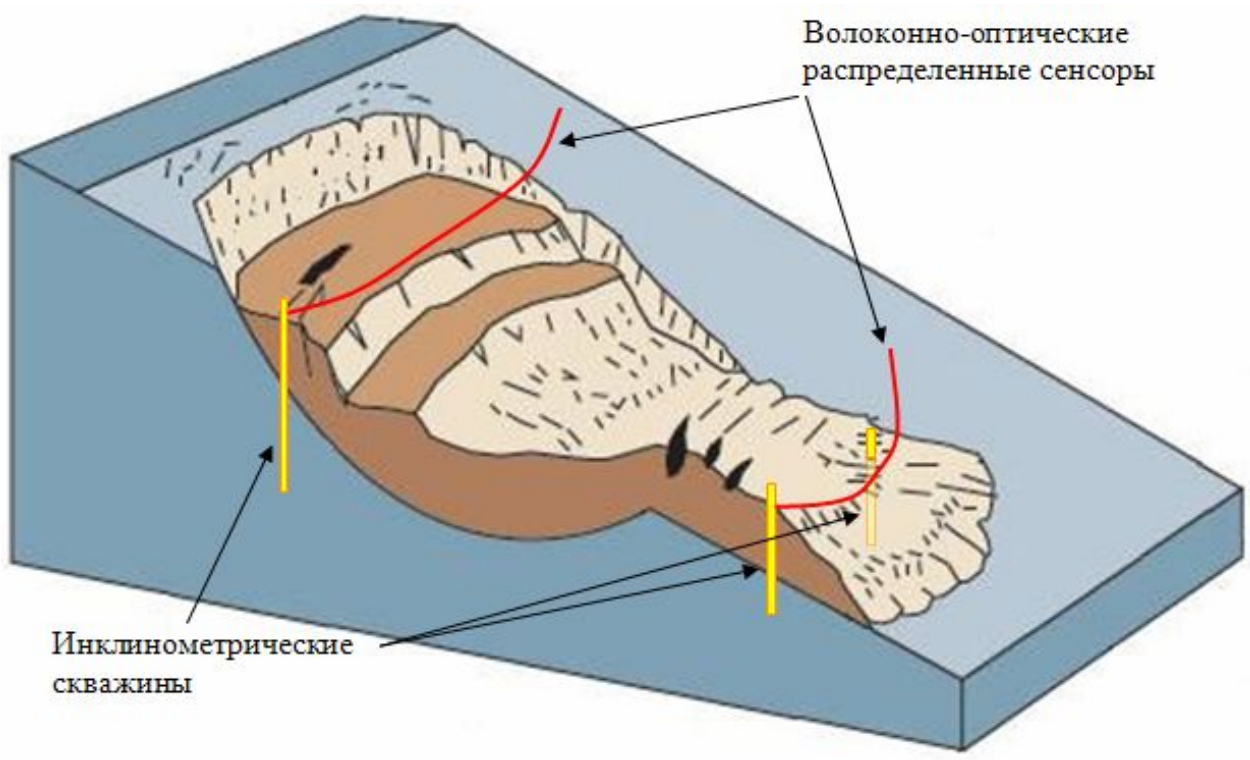




Мониторинг подвижек грунта

Наибольшую опасность в сейсмоустойчивых районах среди почвенных процессов для целостности железных дорог представляют оползневые склоновые процессы и эрозия почвы. В свою очередь эрозия почвы наблюдается в следующих условиях:

- на болотных участках;
- на участках с высоким уровнем подземных вод;
- на переходах через русла рек
- в горных районах
- в северных районах с мерзлыми грунтами



Мониторинг подвижек грунта

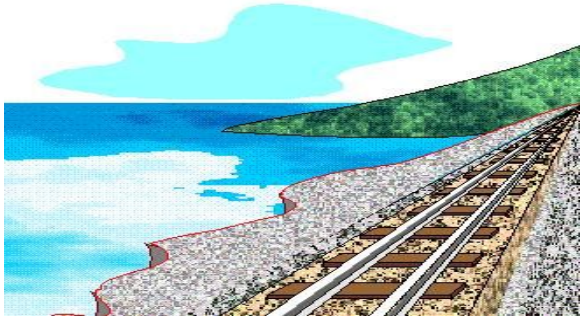
Варианты применения волоконно-оптических систем мониторинга:

- На этапе проектно-изыскательский работ, для определения движений грунтов и обеспечении надежности будущей конструкции еще на этапе проектирования
- Контроль оползневых участков. Система позволяет определить не только движение и скорость движения грунтов, но так же и границы оползня, что в настоящее время не может решить не одна система с высокой точностью.

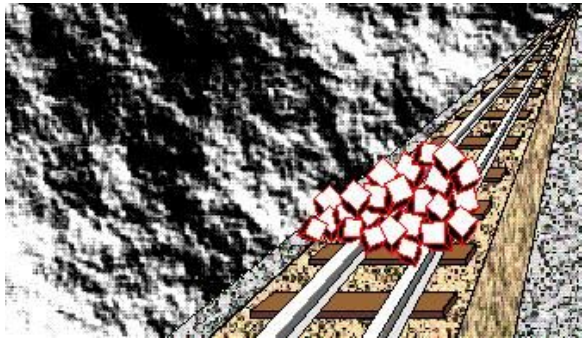
Для повышения точности и надежности применяемой системы разработан специализированный кабель с якорем. Якорь обеспечивает как более точную передачу движений грунтов сенсору, так и его сохранность (отстегивается при превышении установленной нагрузки).

Сенсор с якорем

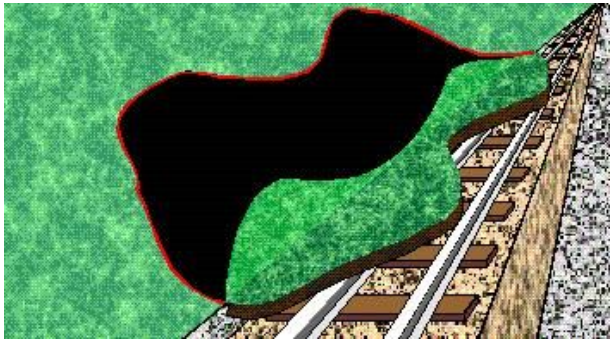
Подмыв



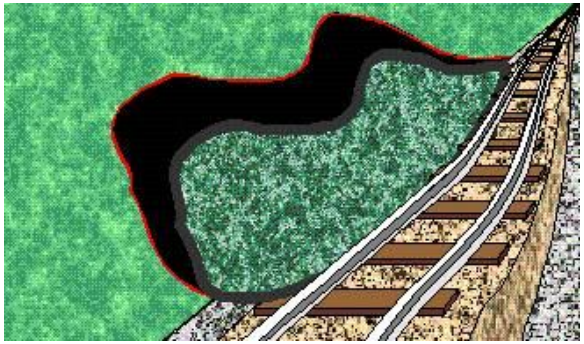
Обвал



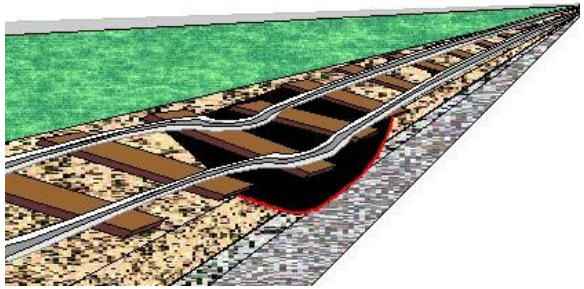
Сплыв



Оплозень



Провал



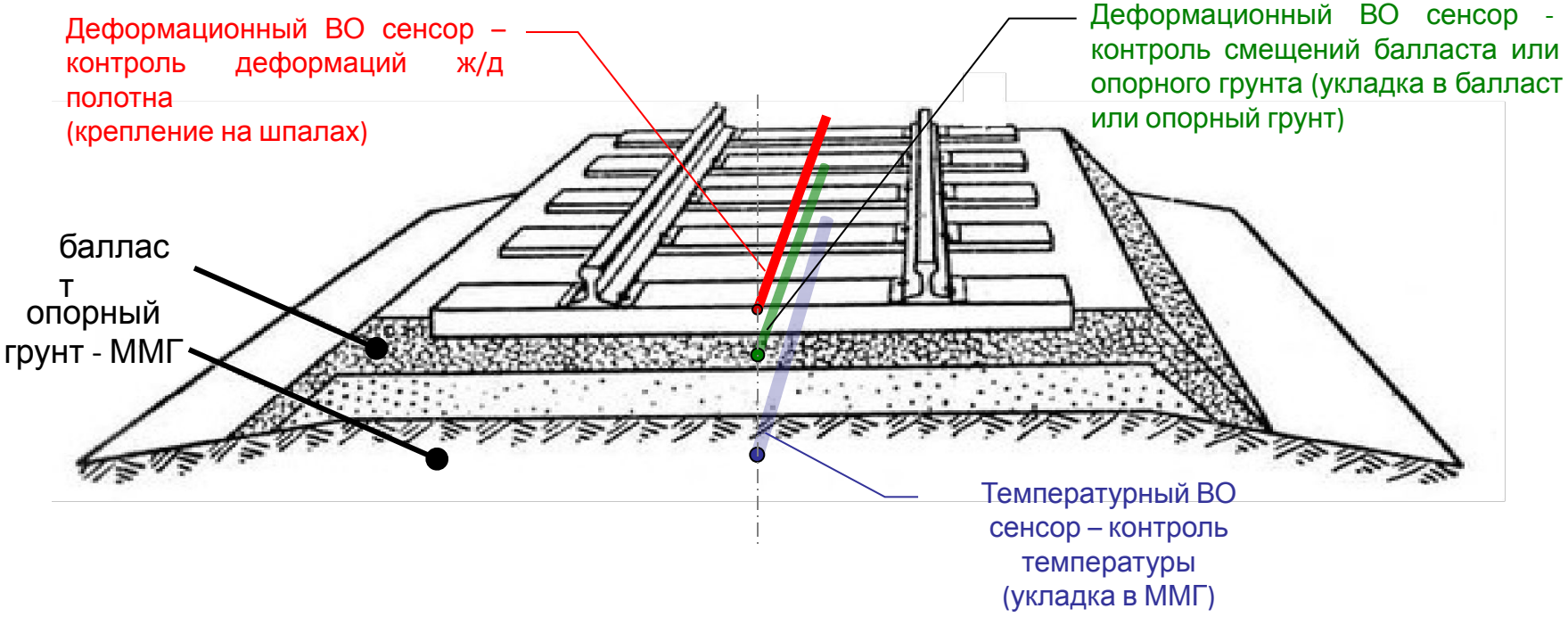
Мониторинг ж/д полотна

На схеме ниже приведены варианты возможного размещения протяженных ВОД вдоль ж/д полотна при мониторинге:

А) Синий кабель – мониторинг температуры опорного грунта

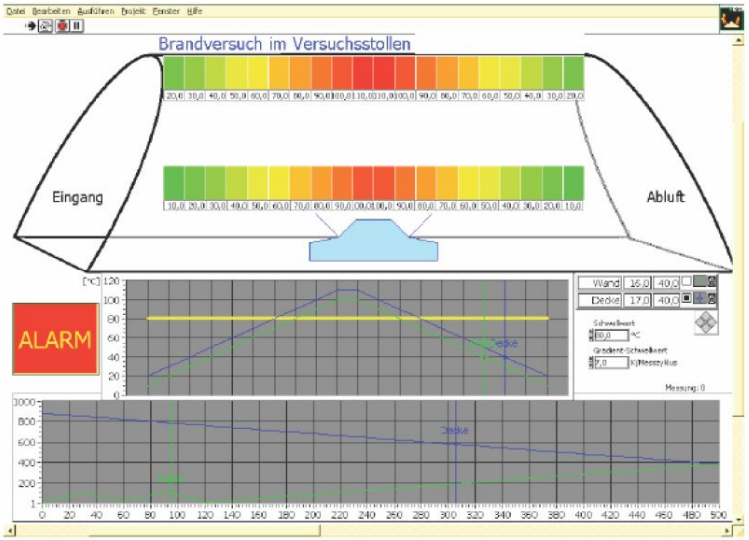
Б) Зеленый кабель – мониторинг подвижек балласта или опорного грунта (оптимальный вариант; применим для вновь строящихся участков ж/д)

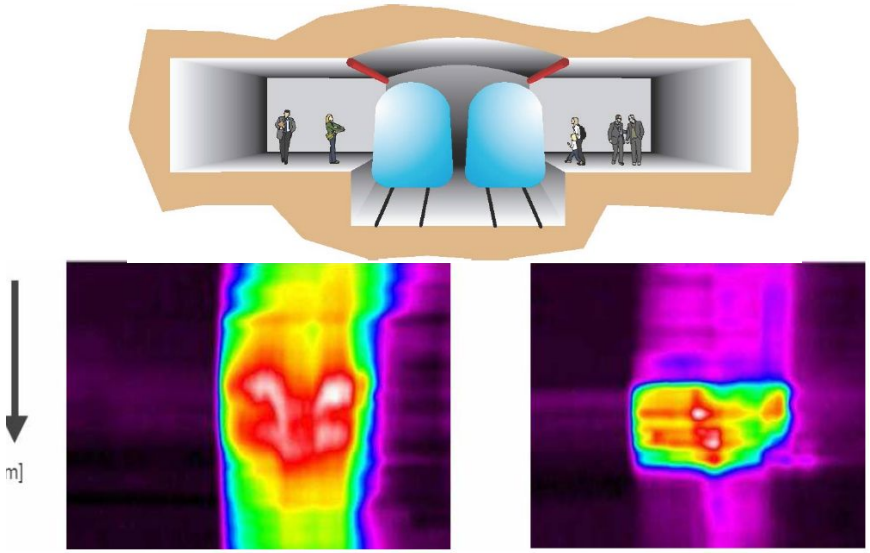
В) Красный кабель – мониторинг деформаций ж/д полотна (более сложный и менее защищенный вариант; можно использовать на уже построенном участке ж/д).



Мониторинг возгораний

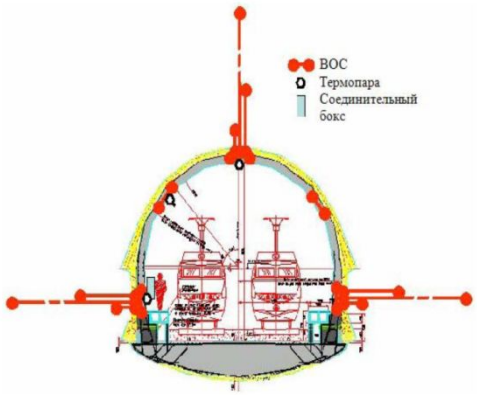
Для детектирования локального повышения температуры и возгорания вдоль всего объекта прокладывается непрерывный волоконно-оптический сенсор, представляющий обычный телекоммуникационный кабель. Система позволяет в непрерывном режиме следить за температурным состоянием объекта, показывает распределение температурного профиля по всей длине объекта, выдает автоматически предупреждения (alarm-ы) о превышении заданных пороговых значений температуры (участок может быть разбит на большое количество подучастков со своими пороговыми значениями).





Выше показан профиль распространения пожара (искусственно созданное возгорание), получаемый после обработки данных с потолочного (слева) и настенного (справа) сенсоров.

Опыт внедрения волоконно-оптических систем мониторинга в мире



Тоннель Soumagne, Бельгия.
Тоннель является частью высокоскоростной бельгийской железной дороги из Брюсселя через Льеж в Кельн. Инсталлирована волоконно-оптическая система мониторинга, измеряющая деформации и температуру свода тоннеля.

Тоннель Virgolo, г. Bolzano, Италия
Длина 887 м, два двухполосных тоннеля, по одному в каждом направлении. Используется волоконно-оптическая система мониторинга с непрерывным телекоммуникационным кабелем специальной конструкции в качестве сенсора.

Метрополитен г. Сеул, Южная Корея.
На участке метрополитена установлена система из 10 волоконно-оптических сенсоров, предназначенная для постоянного мониторинга искривления, деформаций и напряжений потолочной части конструкции.