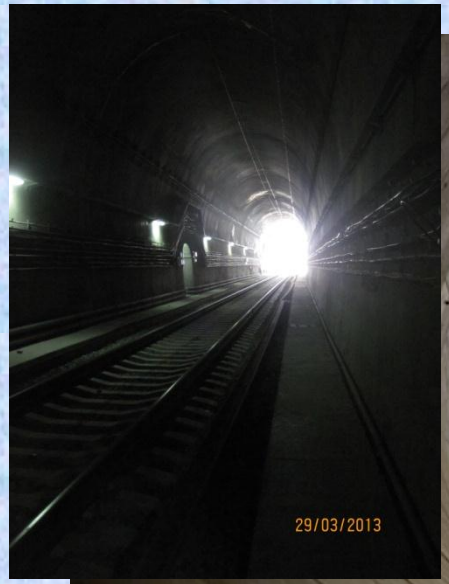
Прогноз напряженно-деформированного состояния системы «обделка – вмещающий массив» транспортных тоннелей для предотвращения природных и техногенных аварий

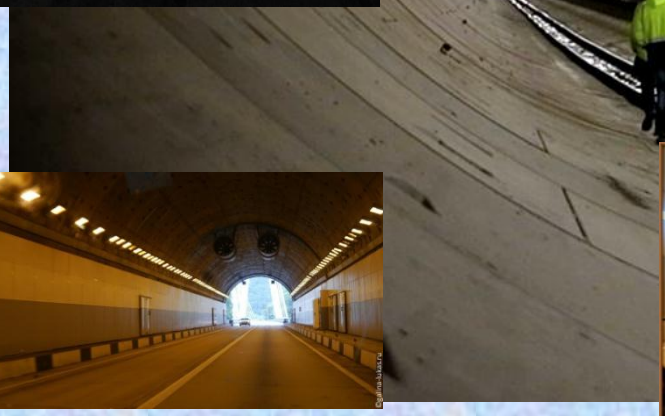
Лебедев Михаил Олегович

Заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», к.т.н., доц.

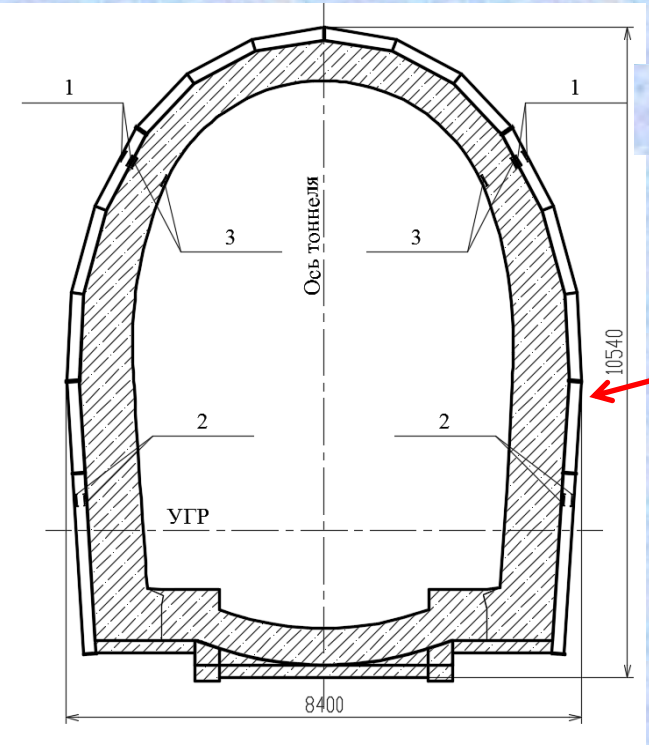
“Физические основы прогнозирования разрушения горных пород”. Программа XI всероссийской школы-семинара с международным участием **. Пермь 14-18 октября 2019 года**

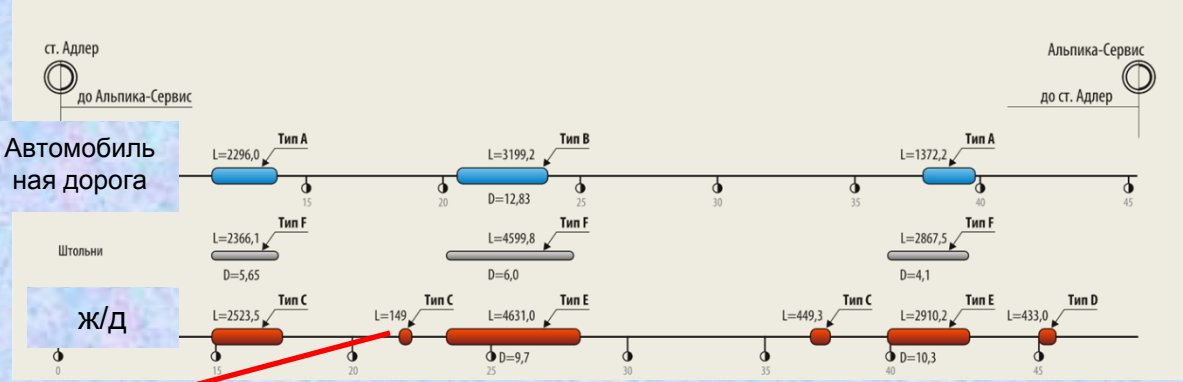
Визуальные осмотры в составе работ по надзору состояния конструкций тоннелей





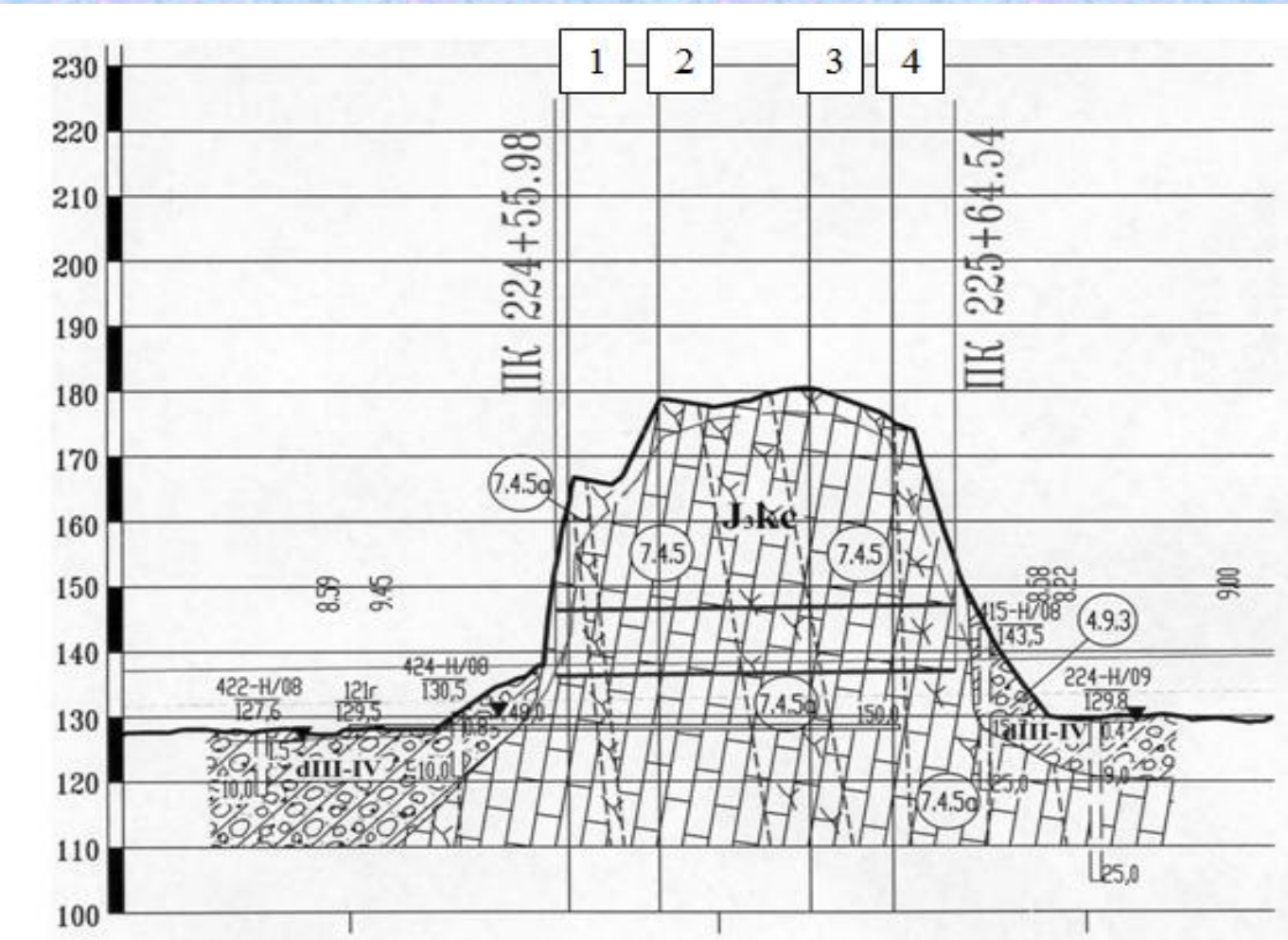
Железнодорожный тоннель по трассе «Адлер» - «Альпика-Сервис»





1 –датчики во временной крепи калоттной части; 2 – датчики во временной крепи штроссовой части; 3 – датчики в обделке

Продольный разрез тоннеля и размещение опытных участков по трассе тоннеля: 1 – ПК 224+59,5; 2 – ПК 224+84; 3 – ПК 225+25; 4 – ПК 225+47,5

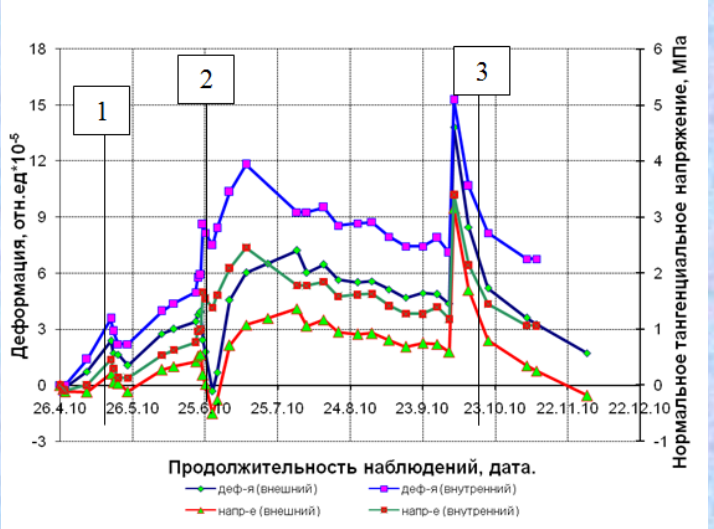


Инженерно-геологические условия строительства тоннеля

Опытный участок	ПК	Инженерно-геологическая характеристика пород				
		По данным исполнительной геологии	По данным сейсморазведки		По проекту	
			E_o, МПа **наруш./естеств.**	ν **наруш./естеств.**	E_o, МПа	ν
1	224+59,5	Окремненные известняки с примазками пластичных глин по трещинам. Слои до 30 см и более. Слаботрещиноватые. Породы устойчивые, f=6-8.	952/12014	0,38/0,31	3100	0,22
2	224+84	Известняки с примазками пластичных глин по трещинам. Слои по 10-30 см. Слаботрещиноватые. Породы устойчивые, f=6-8.	952/12014	0,38/0,31	3100	0,22
3	225+25	Известняки с примазками пластичных глин по трещинам. Слои по 10-30 см. Слаботрещиноватые. Породы устойчивые, f=6-8.	952/4120	0,38/0,33	1670(тектоническая зона)	0,3
4	225+47,5	Известняки с примазками пластичных глин по трещинам. Слои по 10-15 см. Слаботрещиноватые. Породы устойчивые, f=6-8.	952/4120	0,38/0,33	3100	0,22

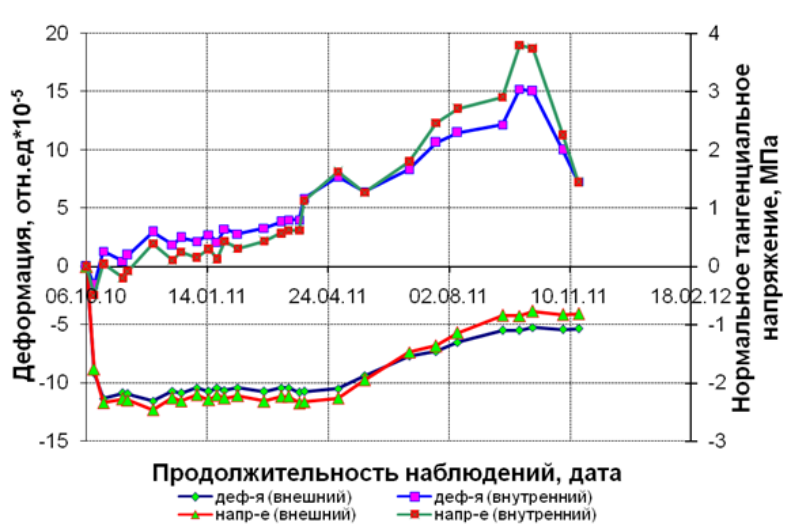
Натурные исследования напряженно-деформированного состояния крепи и обделки при строительстве

Нормальная сила в крепи 396 kN



Кривые развития относительных деформаций и нормальных тангенциальных напряжений в бетоне временной крепи на ПК 225+25: 1 - доработка калотты на полное сечение; 2 - разработка штроссовой части; 3 – возведение постоянной обделки

Нормальная сила в обделке 650 kN



Кривые развития деформаций и нормальных тангенциальных напряжений в бетоне постоянной обделки на ПК 225+25

Позволяет контролировать качественное и количественное изменение напряженно-деформированного состояния крепи и обделки на всех этапах раскрытия тоннеля на полное сечение

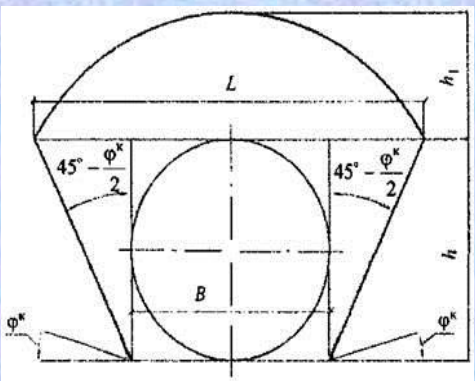
Результаты натурных исследований напряженно-деформированного состояния крепи и обделки на опытных участках

Опытный участок	Глубина заложения (до шелыги), м	Нормальные тангенциальные напряжения, МПа (на внешнем контуре/на внутреннем контуре)			
		В крепи калоттной части		В обделке, через один год после возведения	В обделке, через восемь лет после возведения
		После разработки калотты	В калотте после разработки штроссы		
ПК 4+59,5	20,0	5,0/5,8	6,3/7,5	2,2/2,0	9,2/11,0
ПК 4+84	32,0	1,3/0,8	2,3/1,0	-1,0/3,0	8,3/8,5
ПК 5+25	32,0	0,6/1,0	1,3/2,3	-1,0/3,0	0,5/8,4
ПК 5+47,5	28,0	1,6/2,0	2,0/2,6	-1,0/1,2	6,2/4,0

Примечание: знак «-» - растяжение.

Методы расчета напряженно-деформированного состояния крепей и обделок транспортных тоннелей

- Теория сводообразования
- Эмпирические методы
- Аналитические методы механики сплошной среды
- Численные методы

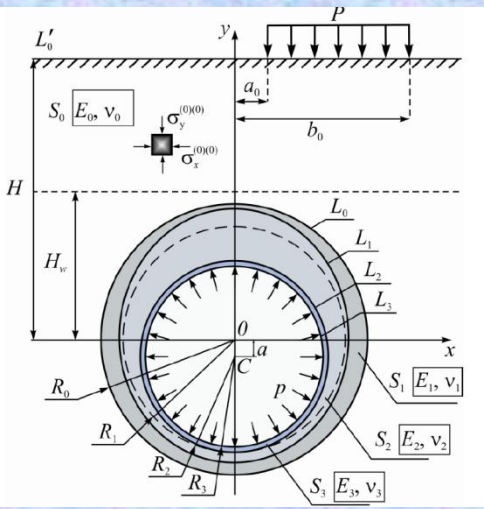


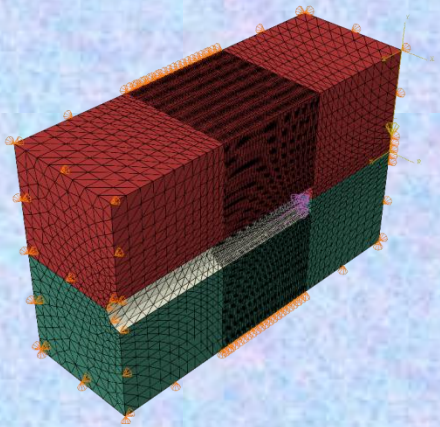
$$p_{в} = \frac{7.5B^{0.1}H^{0.5} - RMR}{20RMR}\,(\text{МПа})$$

$$p_{в} = \frac{0.2}{J_r}\frac{1}{\sqrt[3]{Q}}\,(\text{МПа}),$$

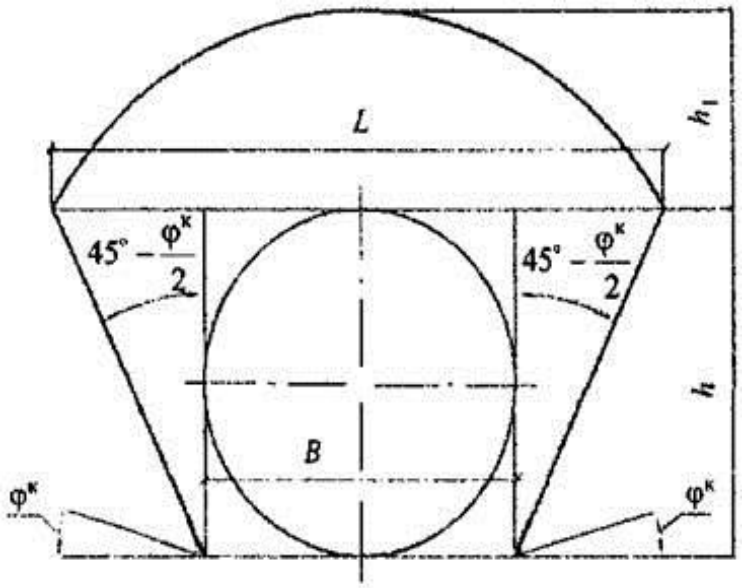
$$p_{в.мг}(\text{МПа}) = \frac{0.2}{J_r}\frac{1}{Q^{\frac{1}{3}}} f \cdot f'.$$

$$p_{в.мг}(\text{МПа}) = \frac{f(N)}{30}\,10^{\left(\frac{H^{0.6}a^{0.1}}{50N^{0.33}}\right)};$$





Расчеты крепи и обделки.
Метод заданных нагрузок (Метрогипротранса).



Пролет свода обрушения: $L = B + tg\left(45^0 - \frac{\varphi_к}{2}\right)$.

Высота свода обрушения при $H_1 \leq 45$ м: $h_1 = \frac{L}{2f}$.

Нормативная вертикальная нагрузка: $q_н = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i * h_i$.

Нормативная горизонтальная нагрузка: $p_н = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i * h_i * tg^2\left(45 - \frac{\varphi_к}{2}\right)$.

Нагрузка от собственного веса обделки: $q_{св} = \frac{G}{B}$.

Расчетные нагрузки: $q^р = K_1 * q^н + K_2 * q^н_{св}$; $p_р = K_3 * p_н$.

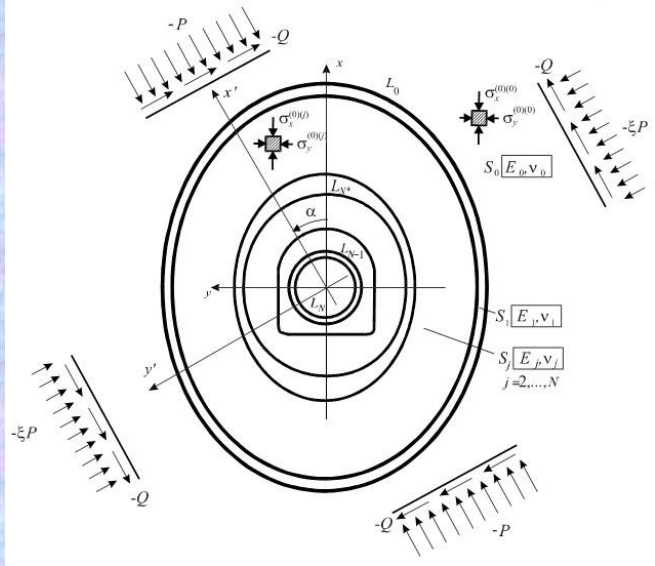
Коэффициент упругого отпора: $K = \frac{10^5 K_0}{0{,}5B}$.

Результаты расчета усилий в крепи методом заданных нагрузок

Расчетный параметр	Усилия в калоттной части крепи*		Обделка*
	После разработки калотты	После разработки штроссы	
Изгибающий момент, кНм	10	23	39
Нормальная сила, кН	495	1040	650

Примечание: * - усилия показаны для узлов крепи и обделки, где были размещены датчики.

Расчеты крепи и обделки.
Расчет аналитическим методом.



Фотиева Н.Н. (1974). Расчет обделок тоннелей некругового поперечного сечения, Москва

Указанный метод основан на исследовании взаимодействия подземных конструкций и окружающего грунтового массива как элементов единой деформируемой системы и базируется на аналитических решениях соответствующих плоских контактных задач теории упругости для кольца произвольной формы (с одной осью симметрии), подкрепляющего отверстие в линейно - деформируемой среде, моделирующей грунтовый массив

$$\alpha^* = e^{-1.3\frac{l_0}{R}}$$

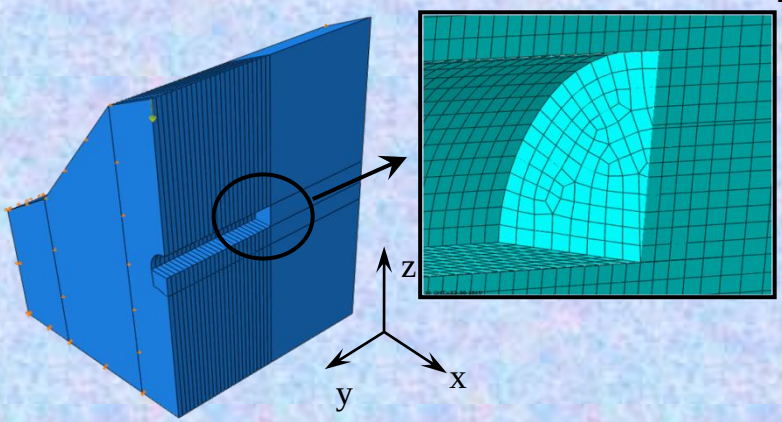
Булычев Н.С. (1994). Механика подземных сооружений: Учебник для Вузов. -2-е изд., Москва.

Результаты расчета усилий в крепи аналитическим методом

Расчетный параметр	Усилия в калоттной части крепи*		Обделка*
	После разработки калотты	После разработки штроссы	
Нормальное тангенциальное напряжение, МПа (на внешнем контуре/на внутреннем контуре)	3,5/3,2	6,3/6,7	1,0/2,39
Изгибающий момент, кНм	1,0	1,6	0,5
Нормальная сила, кН	710	1340	1110

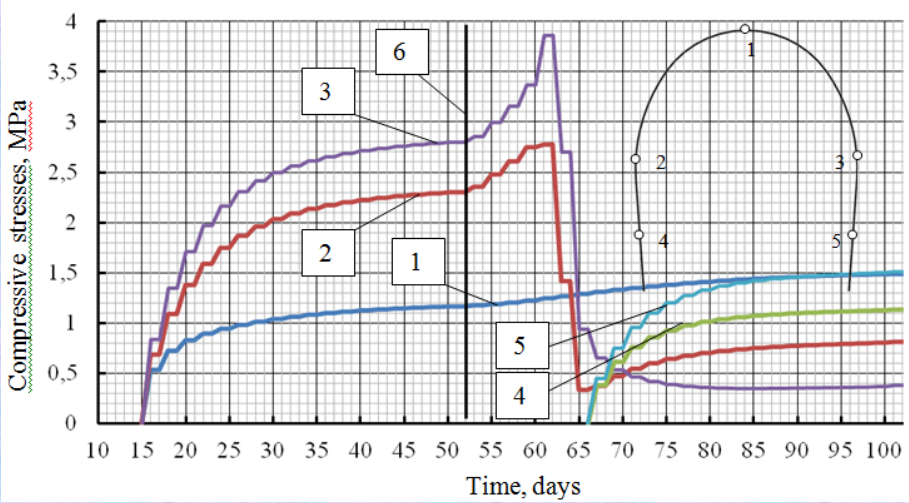
Примечание: * - усилия показаны для узлов крепи и обделки, где были размещены датчики.

Расчеты крепи и обделки.
Расчет численным методом.

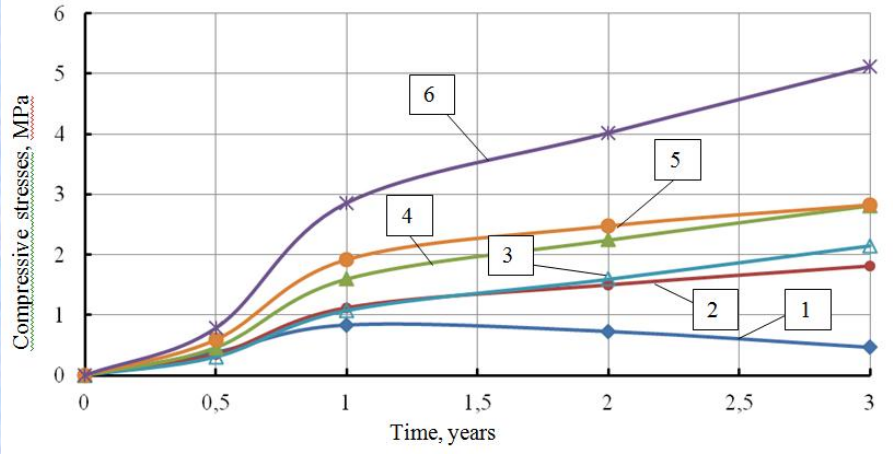


Решение задачи выполнено в объемной постановке. Вмещающий массив рассматривался в двух постановках – линейной и упругопластической (с условием пластичности в виде закона Кулона-Мора) Начальное поле распределения напряжений задавалось с учетом геостатического закона согласно гипотезе Динника.

Кривые развития сжимающих напряжений в бетоне временной крепи на ПК 225+25: 1 – 5 – Точки на контуре тоннеля, для которых построены графики; 6 – влияние разработки штроссовой части.



Развитие сжимающих напряжений на внешнем контуре постоянной обделки: 1 – 5 – Точки на контуре тоннеля соответствуют рисунку 5; 6 – в лотке обратного свода



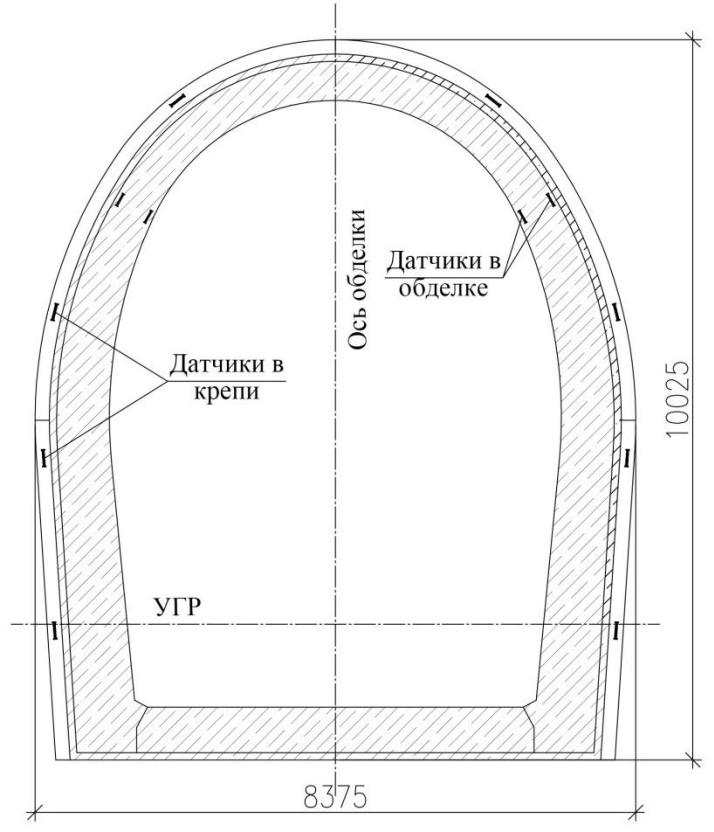
Опыт строительства транспортных тоннелей показывает, что идеальной схемой для контроля напряженно-деформированного состояния обделки, является оснащение обделки контрольно-измерительной аппаратурой в составе горно-экологического мониторинга при строительстве тоннелей с последующей передачей смонтированного оборудования эксплуатирующей организации.

Самой масштабной работой в РФ по реализации горно-экологического мониторинга при строительстве транспортных тоннелей является «Олимпийская» трасса на участке Адлер – «Альпика-Сервис», на которой было построено 6 железнодорожных и 3 автодорожных тоннеля общей протяженностью подземных выработок около 32,5км.

В состав горно-экологического мониторинга входили:

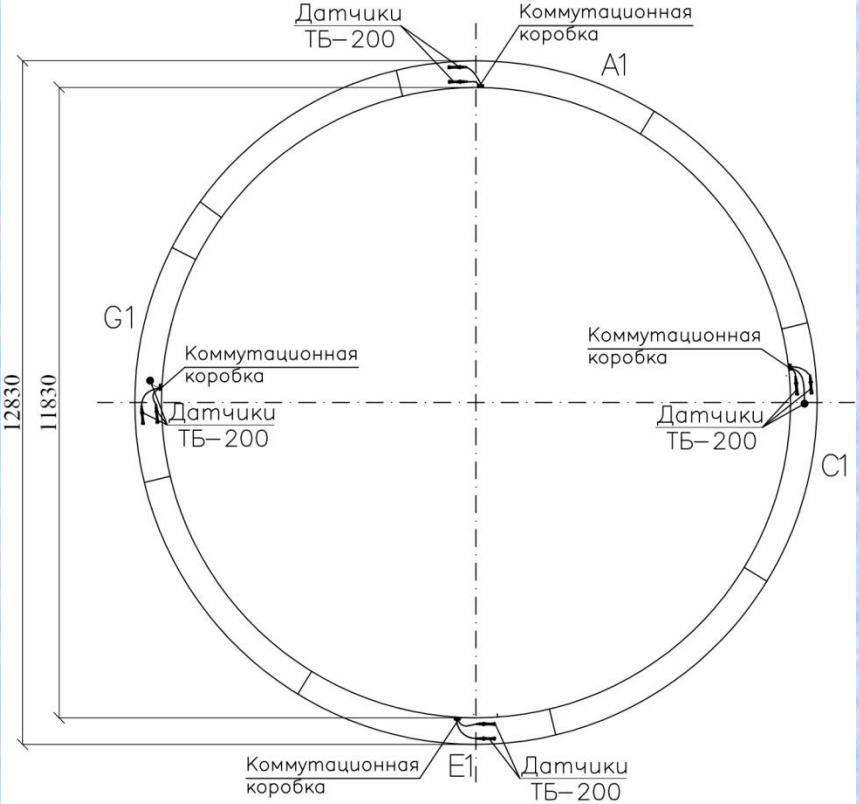
- геодезическо-маркшейдерские наблюдения;
- сейсмологические наблюдения;
- сейсмометрические исследования;
- геофизические исследования;
- геомеханические исследования;
- гидрогеологические наблюдения;
- оценка устойчивости оползневых склонов;
- система экологического мониторинга.

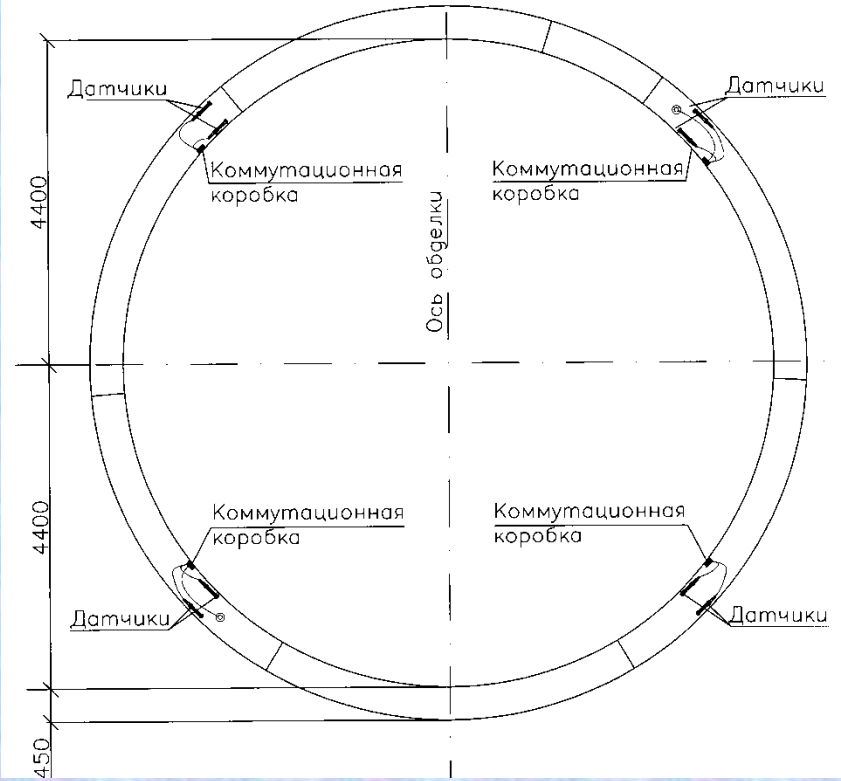
Определение напряженно-деформированного состояния крепей и обделок



Расположение датчиков в крепи и обделке транспортных тоннелей

Определение напряженно-деформированного состояния обделок





Расположение датчиков в обделке транспортных тоннелей пройденных ТПМК

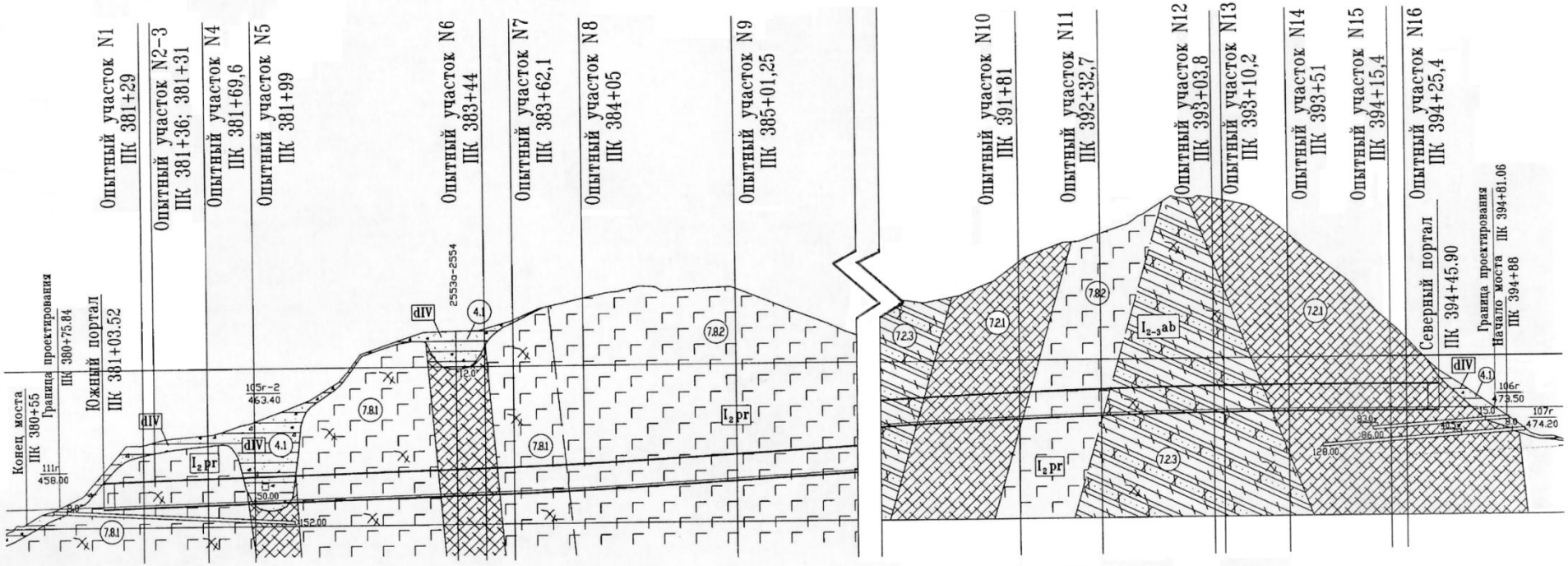
Определение напряженно-деформированного состояния крепей и обделок

Датчики в набрызгбетонной крепи

Датчики в аркобетонной крепи

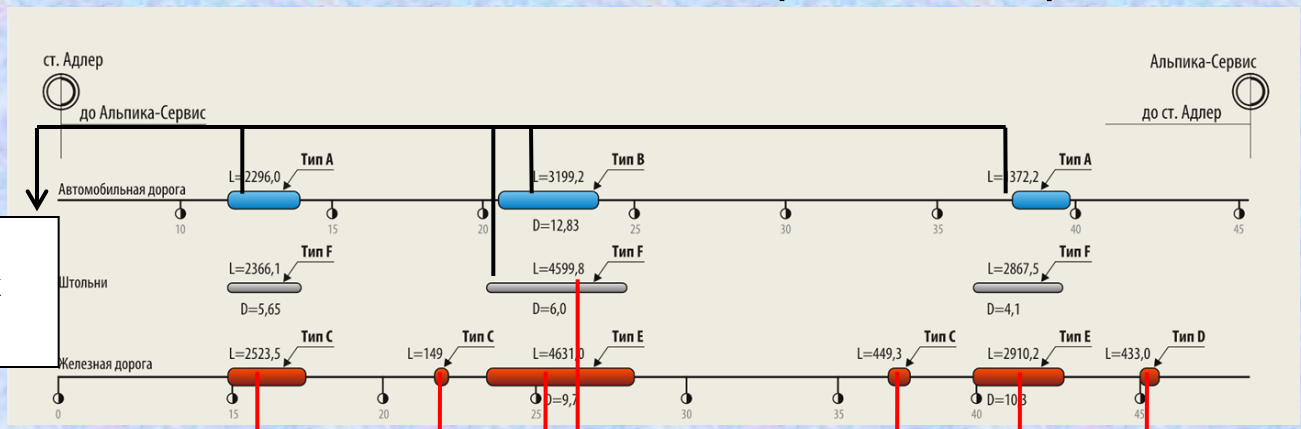
Датчики в постоянной монолитной железобетонной обделке

Размещение контрольно-измерительной аппаратуры для определения НДС крепей и обделок на одном из тоннелей



Датчиками оснащены крепи и обелки, располагаемые во всех литологических разностях, тектонически нарушенных зонах и, в частности, на границах таких зон

Комплекс тоннелей на трассе «Адлер – Альпика Сервис» Геотехнический мониторинг в составе АСУ ТП. Схема передачи с систем мониторинга в Диспетчерский центр



ДПУ автодорожных тоннелей

Сервер в ДПУ железнодорожных тоннелей

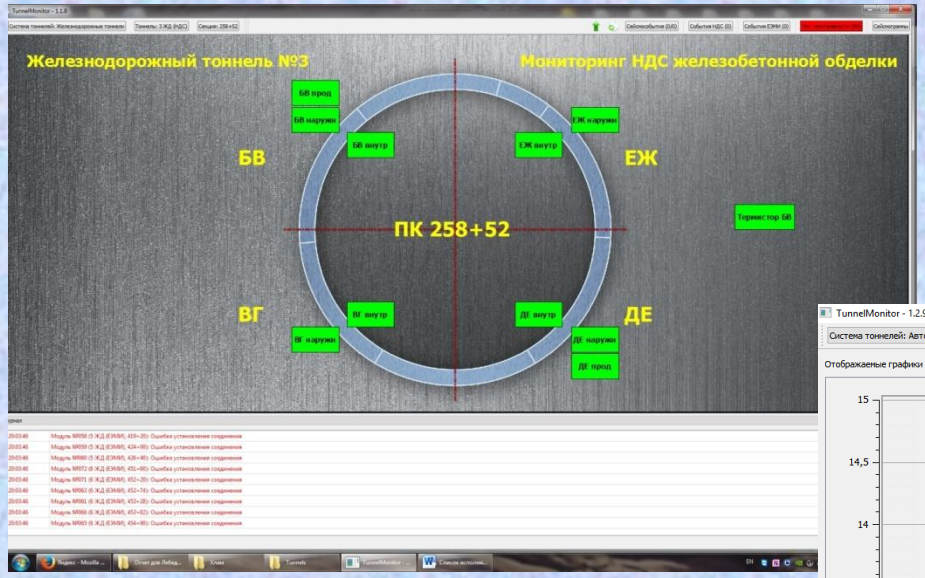
Вся контрольно-измерительная аппаратура, размещенная в обделках "Олимпийских" тоннелей подключена к автоматизированной системе геотехнического мониторинга, позволяющей контролировать напряженно-деформированное состояние обделки в режиме реального времени.

Геотехнический мониторинг в составе АСУ ТП эксплуатации транспортных тоннелей на участке «Адлер – горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» состоит из:

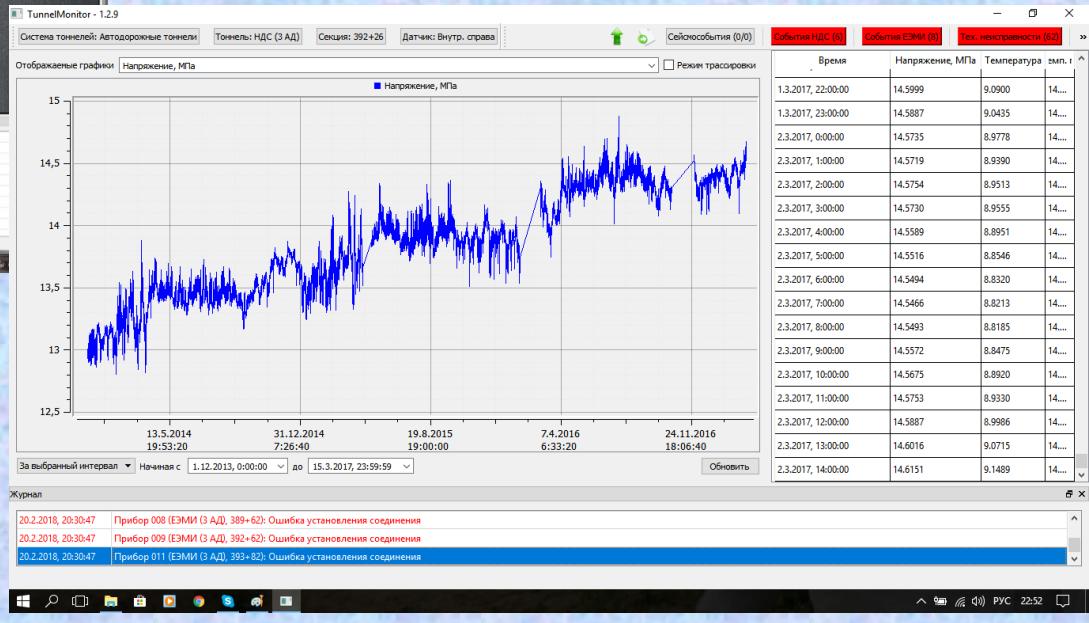
- контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) обделок;
- оценки устойчивости системы «обделка – массив» методом ЕЭМИ;
- сейсмомониторинга.

Информация с контрольно-измерительной аппаратуры 9 (девяти) тоннелей в режиме реального времени поступает на серверы мониторинга в здание диспетчерской по автомобильной дороге и в здание диспетчерской по железной дороге. После обработки поступающих данных информация визуализируется на отдельном АРМе, расположенном на столе перед диспетчером, осуществляющего контроль всех автоматизированных систем безопасной эксплуатации тоннелей

Контроль напряженно-деформированного состояния обделок. Определяются величины нормальных тангенциальных напряжений в обделке и сопоставляются с расчетными величинами



Графический интерфейс программы. Схема измерительного сечения с индикаторами датчиков



Вузуализация нормальных тангенциальных напряжений

Результаты контроля напряженно-деформированного состояния обделки при эксплуатации железнодорожного тоннеля №2

а)

б)

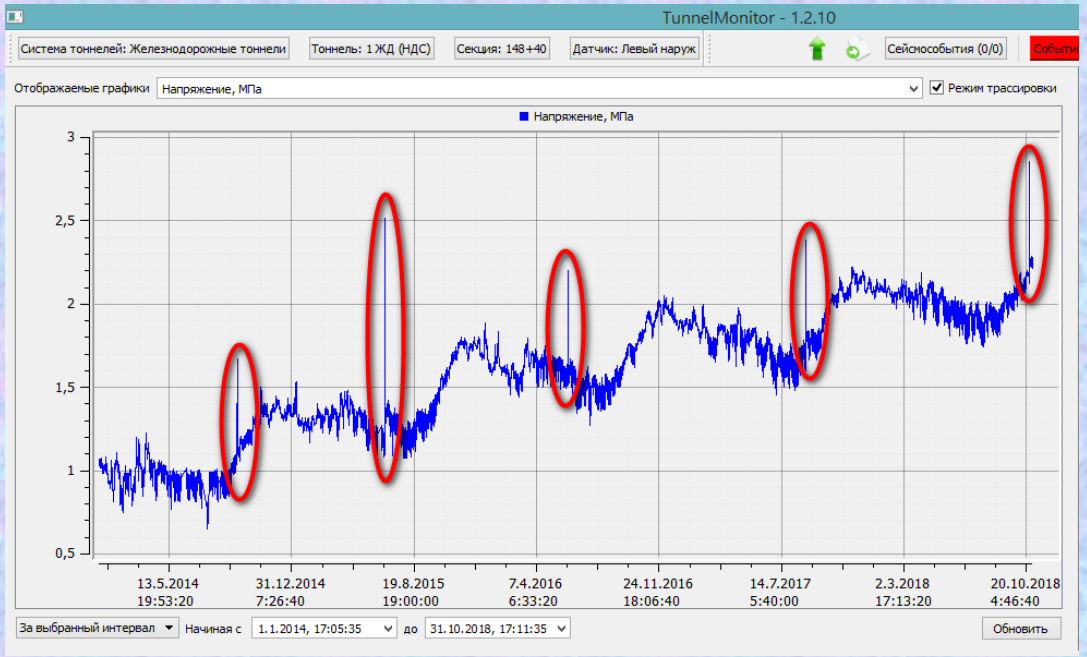
в)

г)

Кривые развития нормальных тангенциальных напряжений в бетоне постоянной обделки с левой стороны на внешнем контуре: а) на ПК 4+59 б) на ПК 4+89; в) на ПК 5+25; г) на ПК 5+48,5

В составе прогноза состояния системы «обделка – вмещающий массив» по данным автоматизированного геотехнического мониторинга могут решаться такие важные задачи, как:

- оценка работоспособности дренажных устройств;
- назначение визуального осмотра обделок;
- оценка текущего технического состояния обделок и его прогноз;
- заключение о достаточности несущей способности обделок.



Увеличение напряженно-деформированного состояния обделки в моменты изменения гидростатического давления (периоды обильных атмосферных осадков)

Геотехнический мониторинг при эксплуатации транспортных тоннелей:

- направлен на безопасную эксплуатацию подземных сооружений, фиксирования негативных (техногенных и природных) воздействий на сооружения и определение качественных и количественных показателей их влияния на обделку.
- Наиболее ценным в реализованной системе геотехнического мониторинга с точки зрения эксплуатации является возможность прогноза технического состояния обделки тоннеля на основе автоматически формируемой базы данных.
- В обделке тоннелей рассматриваемой трассы размещены сотни датчиков для контроля ее напряженно-деформированного состояния во всех литологических разностях. При их установке учитывались все тектонические нарушения и разломы, выявляемые при проходке. Впервые созданная в РФ в сейсмически опасном районе, автоматизированная система контроля НДС обделки тоннелей в сочетании с системой контроля напряженного состояния вмещающего массива (ЕЭМИ) и системой сейсмомониторинга, способны контролировать и прогнозировать техническое состояние системы «обделка - вмещающий массив» на всем протяжении тоннелей