

К.П. БЕЗРОДНЫЙ, д.т.н.,
 М.О. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н.,
 В.Г. ШТЫРОВ, к.г.-м.н.,
 (ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс»)

ОЛИМПИЙСКИЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ТОННЕЛИ: ГОРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ



This article presents a unique mining and environmental monitoring system that was used for the construction and operation of tunnels on combined (motor and railway) highway Adler — «Alpika Service». It was the first home implementation of automated mining and environmental monitoring system aimed at controlling the state of “lining-surrounding massif” system on construction and subsequent operation stages. The conclusion was that operational efficiency of existing and future monitoring systems capable to predict the behavior of the monitored system can be assured by creation of a single data processing and analysis center with a view to improve and optimize methodological and technical means.

Транспортные тоннели по Олимпийской трассе «Адлер — горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» расположены на южном склоне Центрального Кавказа в пределах долины р. Мзымты на территории Адлерского района Большого Сочи Краснодарского края РФ. Северной границей площади работ является южная граница Кавказского заповедника напротив поселка Эсто-Садок, южной — п. Форелевое хозяйство. Трасса совмещенной железной и автомобильной дороги «Адлер — горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» проходит по левому и правому берегам р. Мзымты.

По трассе построено 6 тоннельных комплексов общей протяженностью подземных выработок около 32,5 км. В их составе 6 железнодорожных, 3 автодорожных тоннеля, 3 сервисно-эвакуационные штольни и другие вспомогательные выработки для обслуживания тоннелей.

Сложность рельефа территории строительства и ее расположенность в зоне поднятия горного массива Кавказа предопределили большое разнообразие геологических процессов, которые могли негативно сказаться на обеспечении безопасности функциониру-

вания различных инженерных сооружений. Среди геологических процессов в первую очередь необходимо отметить геодинамическую активность и сейсмичность, с которой прямо или косвенно связано большинство остальных процессов. Поэтому для повышения безопасности и эффективности строительных работ, изучения инженерно-геологических условий территории строительства необходимым являлось проведение горно-экологического мониторинга.

Знание неоднородности и изменчивости инженерно-геологических условий — это не-

обходимая основа для решения прикладных задач при проектировании, строительстве и безопасной эксплуатации транспортных сооружений. Именно инженерно-геологические условия определяют сложность возведения инженерных сооружений в транспортном строительстве, и недостаточно полное изучение и учет инженерно-геологических и гидрогеологических условий района строительства могут привести к негативным последствиям.

Проходка многих участков была осложнена наличием горных пород со сложными условиями залегания, обладающих различными физико-механическими свойствами, обилием тектонических нарушений, зон повышенной трещиноватости и дробления пород мощностью от 10,0 до 150,0 м, где отмечалась различная по величине пережимаемость участков дробленных и участков разной степени трещиноватости пород. Дробленность пород часто доходила до состояния песка и песчано-глинистого материала. Эти зоны имеют сложный характер по литологическому и вещественному составу, а следовательно, и по физико-механическим свойствам слагающих ее образований.

Строительство первого тоннельного комплекса со стороны Южного портала выполнялось в глинистых известняках и мергелях казачебродской свиты, трещиноватых, участками сильнотрещиноватых и обводненных. Было встречено несколько карстовых пещер — понор. А со стороны Северного портала массив представлен слабыми известковистыми аргиллитами, которые при замачивании вызывали значительные деформации временных крепей.

Территория прохождения трассы тоннельного комплекса №3 характеризуется сложной геологической обстановкой, связанной с развитием крупных разрывных нарушений. По результатам исследований было выделено несколько участков с наиболее сложными условиями проходки: припортальные участки (оползневые склоны на северном и южном порталах тоннеля), а также участки пересечения тектонических зон, встреченных при проходке.

Наиболее сложные инженерно-геологические условия были при строительстве тоннельных комплексов №5 и 6. Геологический разрез, который пересекают тоннельные комплексы, характеризуется большим разнообразием пород, представленных магматическими, осадочными метаморфизованными и неметаморфизованными стратифицированными образованиями мезозойского возраста. Участки тоннелей, представленные углистыми сланцами, редкими линзами аргиллитов, песчаников и

маломощными (1–5 до 60 м) телами различных порфиров, глинами, требовали значительной материалоемкости крепления. В тектонических зонах сланцы перетерты до крупнопесчаной фракции из листочков этого минерала и зерен кальцита, при воздействии воды быстро переходят в глинистое мягкопластичное состояние.

При строительстве тоннелей пятого и шестого тоннельных комплексов проявился ряд негативных факторов, среди которых:

- мощные (глубиной до 60 м и более) врезы четвертичных отложений, приуроченные к древним водоотокам, берущим начало от хребта Аибга. При большом (30–50%) содержании крупнообломочной фракции (преимущественно порфиров и метаморфизованных аргиллитов) породы, особенно на контакте с коренным склоном, легко приобретают подвижное состояние при постороннем воздействии;
- при проходке по коренному массиву — обводненные тектонические зоны, водоприток по которым достигает 20–25 м³/час;
- разрушенные аспидные сланцы, которые под воздействием воды переходят в глинистое мягкопластичное состояние.

При строительстве тоннелей были применены практически все известные в мире способы строительства, в том числе специализированные методы закрепления грунта, например технология Jet-grouting, или с использованием свай различного типа (буронабивные, забивные), набрызг-бетон, анкерное закрепление забоя и массива по периметру выработок, устройство в своде и стенах экрана из труб и др. Для разработки грунта в тоннелях щитовым способом применены несколько типов машин известных зарубежных фирм Lovat и Herrenknecht, диаметром от 3,9 до 13,2 м.

Горно-экологический мониторинг, необходимость и регламент которого определены Федеральным законом РФ от 30 декабря 2009 года №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и «Временным положением о горно-экологическом мониторинге», утвержденном в 1996 году Министерством природных ресурсов РФ, Госгортехнадзором и Госкомэкологией России, является обязательным для всех министерств, ведомств, организаций, граждан-предпринимателей, осуществляющих проектирование, строительство, реконструкцию и эксплуатацию предприятий, организаций по добыче и переработке минерального сырья, а также использующих недра в целях, не связанных с добычей полезных ископаемых на территории Российской Федерации, ее континентального шельфа и особой экономической зоны.

С целью развития этого положения было разработано «Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей», вошедшее в реестр обязательных нормативных документов Ростехнадзора.

Руководствуясь этими документами, были разработаны и реализованы проекты горно-экологических мониторингов сопровождения строительства и эксплуатации тоннелей трассы Адлер — Альпика-Сервис.

В состав геотехнического сопровождения входили:

- прогнозы инженерно- и гидрогеологических условий впереди забоев тоннелей;
- оценки устойчивости призабойных участков тоннелей;
- определения напряженно-деформированного состояния крепей и обделок;
- определения фактических деформативно-прочностных свойств вмещающего тоннель массива;
- исследования водопровявлений;
- определения деформаций земной поверхности;
- корректировка проектных решений на основании данных геотехнического мониторинга;
- оценка устойчивости оползневых склонов.

Система экологического мониторинга включала:

- источники выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух;
- источники сброса загрязняющих веществ в поверхностные воды;
- воздействие образующих отходов;
- состояние загрязнения почв;
- состояние загрязнения подземных вод.

Прогноз инженерно-гидрогеологических условий впереди забоев тоннелей осуществляется с помощью электромагнитного импульсного сверхширокополосного (ЭМИ СШП) зондирования.

Метод ЭМИ СШП зондирования является разновидностью георадиолокационного метода, основан на восстановлении изображения структуры в разрезах горного массива или инженерного сооружения по отраженному сигналу при распространении электромагнитного импульса наносекундной длительности.

Метод ЭМИ СШП зондирования позволяет дифференцировать геологические структуры до глубины исследования 100 м и более. Точность определения положения слоев в разрезах составляет порядка 1% от их истинной глубины залегания.

По результатам измерений в одной точке зондирования строится инженерно-геологическая колонка. Представительный

Прогнозное положение участков нарушенных и водонасыщенных пород на трассе штольни железнодорожного тоннеля №3 на совмещенной (автомобильной и железной) дороге Adler – горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» со стороны южного портала по данным ЭМИ СШП зондирования. Этап 41

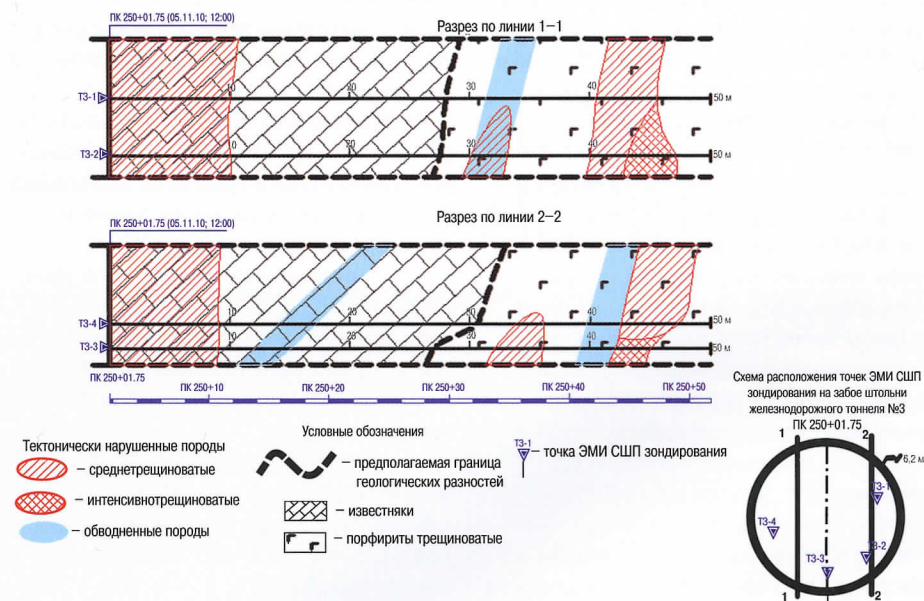


Рис. 1. Интерпретация инженерно-геологического и гидрогеологического прогноза впереди забоя тоннеля по данным СШП-георадиолокации

разрез объекта составляется на основе определенного количества точек (пунктов) зондирования. Аппаратура геофизического комплекса обеспечивает регистрацию отраженного электромагнитного сигнала от различных литологических разностей не только при измерениях на поверхности грунтов, но и при изысканиях через лед и воду, а также через чугунные и железобетонные тьюбинги обделки тоннелей.

Обработка и интерпретация сигналов, построение изображения объекта является наиболее сложной и трудоемкой процедурой метода СШП-зондирования.

Записанный отраженный сигнал подвергается математической обработке специализированной компьютерной программой. Далее обработанный сигнал сравнивается с имеющейся базой данных различных сред и проходит предварительную идентификацию компонентов, входящих в данный разрез. После идентификации производится построение двухмерного (рис. 1) или трехмерного (блок-диаграмма) отображения объекта.

Результаты интерпретации инженерно-геологических условий после оперативной обработки использовались операторами ТПМК для корректировки технических параметров ведения щитов, а при проходке тоннелей горным способом — для своевременной информации по смене литологических разностей и наличию тектонических нарушений.

Оценку устойчивости призабойного участка тоннеля осуществляли с помощью регистрации естественных импульсов электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ). По параметрам электромагнитной эмиссии определяли степень устойчивости выработки. Кроме этого, с помощью метода регистрации ЕИЭМПЗ определяли зоны нарушенных грунтов впереди забоя на расстоянии одного диаметра выработки.

Работы вели дистанционно с применением кольцевой антенны. Использование этого неразрушающего экспресс-метода оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) позволяет оперативно получать информацию о геодинамических процессах в забоях, в заобделочном пространстве и крепях тоннелей.

Оценка существующей геодинамической активности горного массива и его природного напряженно-деформированного состояния с целью прогнозирования устойчивости пород, производится профилированием с регистрацией поля естественного электромагнитного излучения горного массива. Также осуществляется регистрация вариаций поля ЕЭМИ с целью наблюдения за развитием геодинамических процессов во времени в обнаруженных ранее зонах разупрочнений. При наблюдениях за изменением поля ЕЭМИ изучается аномальное поведение магнитной составляющей естественного электромагнитного излучения горных пород в местах изменения геомеханических напряжений в результате

действия горного давления, микроподвижек по контактам блоков (поверхностям скольжения), например в зонах разломов.

На рис. 2 показаны временные графики средних значений параметра A_m поля ЕЭМИ и относительных деформаций в крепи тоннеля. Графики построены по данным одновременных измерений на замерных станциях относительных деформаций во временной крепи. Опытные участки определения напряженно-деформированного состояния (НДС) крепи в натуральных условиях оснащены струнными датчиками.

Замеры ЕЭМИ проводились у стенок тоннеля вблизи датчиков-деформометров. Стрелками показаны всплески ЕЭМИ при соответствующих значениях напряжений. Хотя ряды значений по оси времени получали через неравные интервалы времени и допускались пропуски, можно заметить, что после всплеска излучения ЕЭМИ сразу или через некоторое время происходит изменение напряжений.

Принимая за фоновые значения A_m до 50 мкВ (в данном случае), получаем, что все значения выше этого показателя могут быть связаны с деформациями и изменениями напряженного состояния. Важно, что всплески ЕЭМИ происходят одновременно или несколько раньше деформаций. Подобные прогностические свойства ЕЭМИ проявляются как при относительно небольших, так и при существенных изменениях напряженного состояния пород.

На данный момент регистрация ЕЭМИ является косвенным методом исследования НДС-крепей и с его помощью нельзя напрямую оценить величину напряжений — возможен только качественный анализ данных. В этой связи в ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» ведутся научные эксперименты по совместному исследованию геоэлектромагнитных и геомеханических процессов при строительстве транспортных тоннелей. Цель этих исследований — осуществить переход от качественного анализа НДС массива с помощью регистрации ЕЭМИ к количественным прогнозным показателям. Получение таких показателей позволяет проводить диагностику предразрушающего состояния участков массивов и контролировать динамику процессов проявления горного давления.

Приведенный пример регистрации ЕЭМИ в строящемся тоннеле показывает перспективность его применения для оперативного неразрушающего контроля и прогноза изменений НДС. Дальнейшее развитие и совершенствование аппаратуры, применение современных способов обработки данных ЕЭМИ позволяют применять регистрацию

ЕЗМИ для количественных экспресс-оценок НДС массива горных пород и обделок тоннелей.

Напряженно-деформированное состояние крепей и обделок определяют с помощью струнных датчиков, измеряя относительные деформации в месте их установки. Затем, зная относительные деформации, вычисляют напряжения. В бетонных и железобетонных конструкциях напряжения вычисляют по специальной методике с учетом загрузки бетона в раннем возрасте и его ползучести.

Наилучшее представление о формировании напряженно-деформированного состояния крепей и обделок позволяет получить комплексное применение датчиков (деформометров) внутри конструкций (рис. 3 а) и измерение деформаций внутреннего контура, начиная с момента их возведения.

С учетом технологии строительства можно контролировать качественное и количественное изменение напряженно-деформированного состояния крепи на всех этапах раскрытия тоннеля на полное сечение (рис. 3 б). Сопоставление величин напряжений в крепи с деформациями внутреннего контура для конкретного сечения позволяет с меньшими затратами оценить несущую способность на остальных участках тоннеля, ограничиваясь только контролем деформаций внутреннего контура. Для достоверного и достаточного определения несущей способности крепи по трассе тоннеля данным способом датчиками необходимо оснащать все литологические разности, пересекаемые тоннелем, а также тектонически нарушенные участки.

Практика проходки тоннелей в условиях Северного Кавказа свидетельствует о значительном влиянии геологического строения массива на их устойчивость. Наибольшую сложность на проходку оказывает горный массив, представленный аргиллитами. При его замачивании происходит снижение сцепления между слоями пород (грунта), что приводит к смещению значительных грунтовых масс и дополнительным контактным напряжениям. Подобные факторы проявились при проходке железнодорожного тоннеля №1 со стороны северного портала. На рис. 3 б отчетливо видна реологическая составляющая формирования напряженного состояния крепи для этого участка, а именно незатухающее приращение напряжений и деформаций вплоть до возведения постоянной обделки. Раскрытие тоннеля на полное сечение (после разработки штроссовой части) значительно увеличило скорость приращения напряжений и деформаций внутреннего контура

ПОДЗЕМНЫЕ ГОРИЗОНТЫ №4. Март/2014

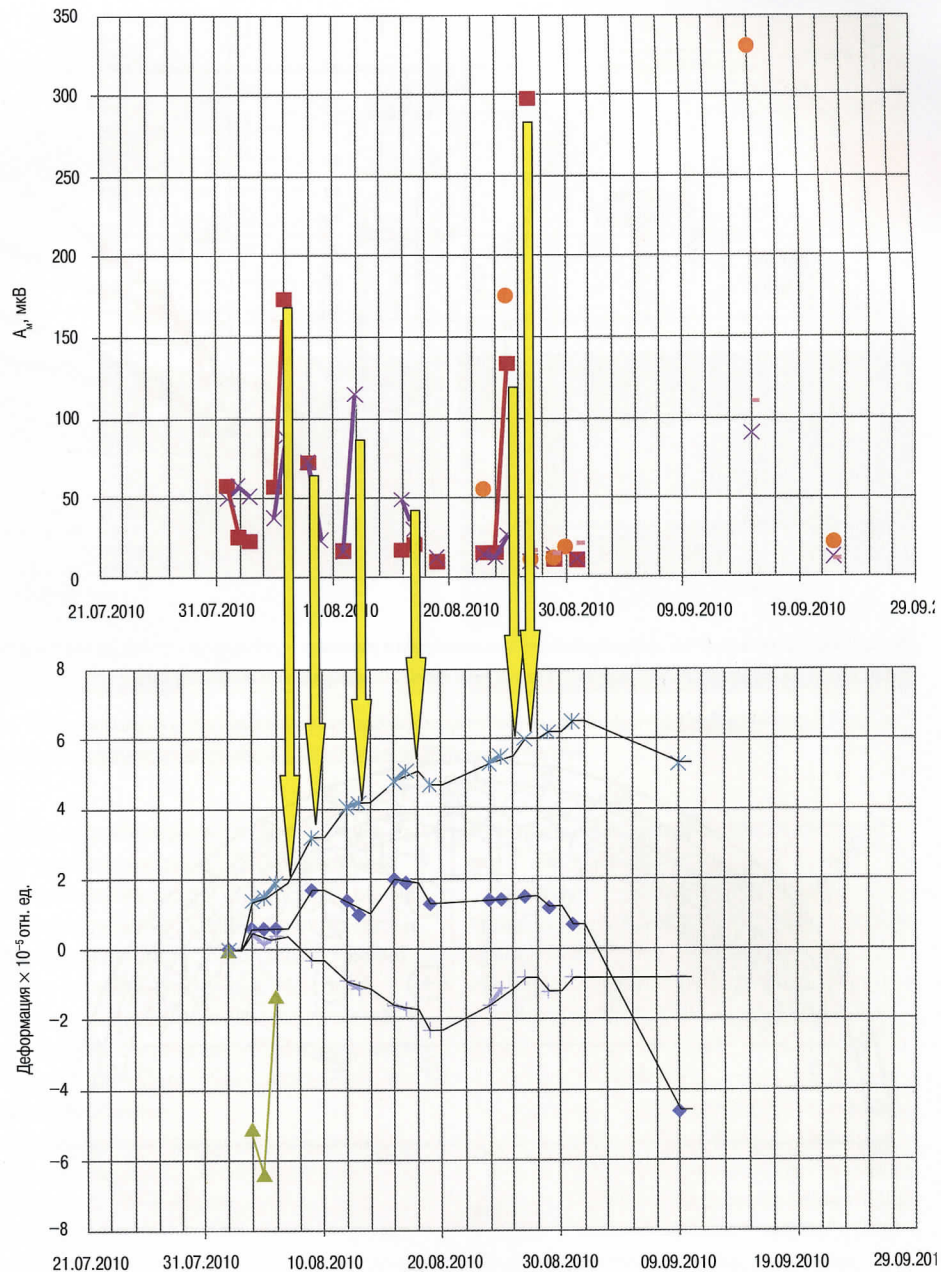


Рис. 2. Результаты одновременных определений параметров поля ЕЗМИ и относительных деформаций в крепи

(смещения достигали 100 мм). Разработка проекта усиления набрызг-бетонной крепи с арматурными арками дополнительной анкерной крепью, представленной самозабуривающимися анкерами MAI SDA фирмы Atlas Сорсо позволила значительно уменьшить смещения крепи и обеспечить проектное сечение тоннеля к моменту возведения постоянной обделки.

На другом тоннеле участка Адлер — Альпика-Сервис строительство велось в массиве, представленном аргиллитами, но уже блочной структуры и полускального состояния. Напряженное состояние тяжелой аркобетонной крепи, возводимой с отставанием от забоя, после ее возведения

практически не изменялось. Максимальная величина сжимающих напряжений в бетоне не превышала 1 МПа. Разработка штроссовой части также не оказала изменений на напряженное состояние крепи. Для таких условий аркобетонная крепь оказалась неэффективной при принятой технологии строительства — нанесение на призабойном участке набрызг-бетона и установка анкерной крепи, а с отставанием — возведение аркобетонной крепи. Поэтому были разработаны рекомендации по облегчению ее конструкции.

Как уже говорилось ранее, наиболее неблагоприятные условия строительства были встречены на тоннельных комплексах №5 и

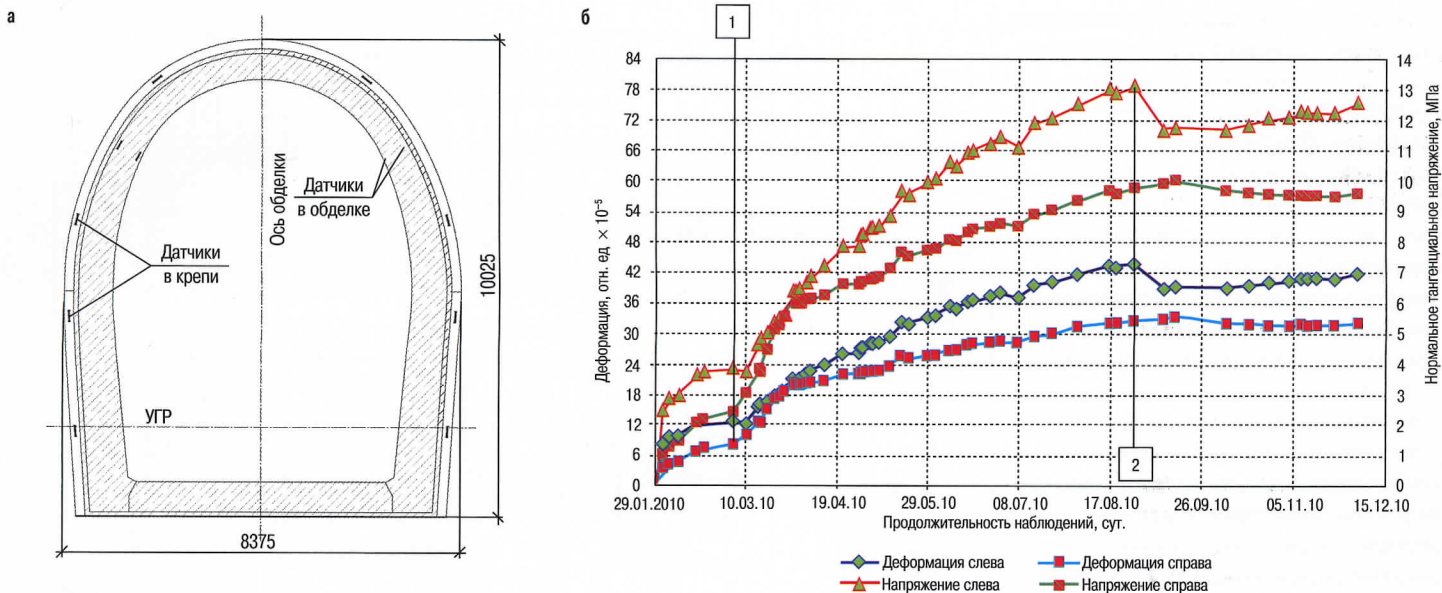


Рис. 3. Определение напряженно-деформированного состояния крепи и обделки: а – размещение струнных датчиков в крепи и обделке; б – формирование напряженного состояния крепи с учетом технологии строительства; 1 – разработка штроссовой части; 2 – возведение постоянной обделки

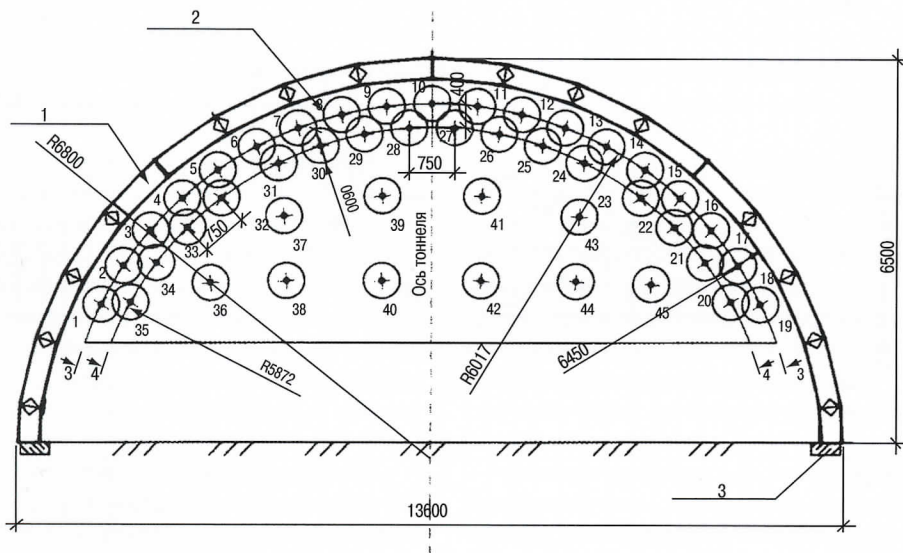


Рис. 4. Схема устройства грунто-цементных свай: 1 – арка из двутавра №35; 2 – скважины опережающего крепления по технологии Jet-Grouting; 3 – опорная ж/б плита под пятку арки

б. Контроль напряженно-деформированного состояния крепей (аркобетонная крепь с применением двутавров I27 и I30 с дополнительной установкой двух арматурных арок между стальных арок) автодорожного тоннеля №3 (в составе тоннельного комплекса №5) показал, что сжимающие нормальные тангенциальные напряжения в бетоне калоттной части достигали 27 МПа, а в штроссовой части — 11 МПа. На достаточно протяженном участке тоннеля со стороны северного портала зафиксированы значительные растягивающие напряжения (до 7 МПа) на внутреннем контуре с нагорной стороны. Такое распределение напряжений указывает на существенную величину бокового давления с нагорной стороны при достаточном

отпоре с противоположной стороны, что было подтверждено распределением величин деформаций внутреннего контура крепи. После раскрытия калоттной части деформации на отдельных участках достигали 150–200 мм, а после проходки штроссовой части увеличивались до 350 мм, что требовало последующего «перекрепления».

Практика проходки рассматриваемого тоннеля с креплением аркобетоном свидетельствует о значительном влиянии геологического строения массива на устойчивость тоннеля. Особенности геологического строения таковы, что представленный углисто-глинистыми сланцами массив является слоистым и при попадании воды в такой массив происходит снижение сце-

пления между слоями пород (грунта), что в сочетании с ползучестью грунтов приводит к смещению значительных грунтовых масс и, соответственно, дополнительному нагружению временной крепи.

Применение спецспособов (рис. 4) обеспечило устойчивость призабойной зоны и безопасность собственно проходческих работ, а незначительная устойчивость массива в целом (на отдельных интервалах тоннеля) повлияла на формирование больших величин напряженно-деформированного состояния крепи.

Определение фактических деформационно-прочностных свойств массива осуществлялось на пройденных участках тоннелей, где еще не возведена постоянная обделка. С помощью сейсмопрофилирования определяли скорости прохождения продольных и поперечных волн, зная их, определяли деформационные свойства литологических разностей и коррекционно — прочность грунтов. Интегральная характеристика деформационно-прочностных свойств грунтов позволила сопоставить реальные условия строительства с проектными данными и выполнить поверочные расчеты конструкций постоянных обделок.

Для определения деформаций земной поверхности в пределах проектной мульды оседаний устанавливались реперные точки и марки, по которым с помощью специального сканера определяли смещения. В случае необходимости для определения сдвижений в толще массива над сооружаемыми подземными выработками в скважинах устанавливали глубинные реперы (экстензометры).

Изменения напряженного состояния водонасыщенного массива исследовали путем установки в скважинах датчиков гидростатического давления. Так, при строительстве железнодорожного тоннеля №3 в оползневом склоне со стороны северного портала были пробурены наклонные скважины, оснащенные датчиками наклона (стационарные датчики для выполнения инклинометрии), и скважины для контроля порового давления. Данный вид мониторинга позволил контролировать напряженное состояние оползневого склона.

Оценку устойчивости оползневых склонов дополнительно осуществляли с помощью традиционных геодезических методов и регистрацией изменения электромагнитной эмиссии.

При несоответствии проектным инженерно-геологическим, гидрогеологическим условиям, напряженно-деформированному состоянию системы «массив — крепь», деформационно-прочностным характеристикам, полученным в результате проведения мониторинга, осуществляется корректировка технологии проходки, конструкций крепи и обделки.

В состав АСУ ТП эксплуатации транспортных тоннелей на участке «Адлер — горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» входит система горно-экологического мониторинга, состоящая из:

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

Информация с контрольно-измерительной аппаратуры 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 (рис. 5), осуществляющем контроль всех автоматизированных систем безопасной эксплуатации тоннелей.

Впервые в России на участке «Адлер — горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» создана автоматизированная система горно-экологического мониторинга транспортных тоннелей для контроля состояния системы «обделка — вмещающий массив» при строительстве и эксплуатации.

Контроль напряженно-деформированного состояния обделок выполняет определение величин нормальных тангенциальных напряжений в обделке и их сопоставление с расчетными величинами.

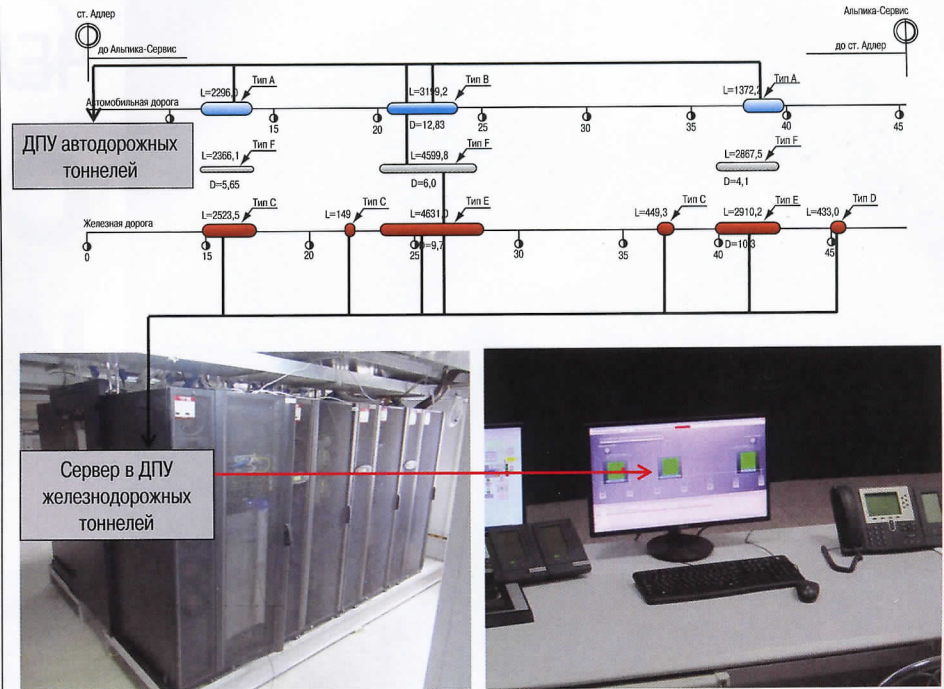


Рис. 5. Принципиальная схема сбора контролируемых параметров с системой мониторинга транспортных тоннелей, передачи на серверы мониторинга для обработки и визуализации на АРМе в диспетчерской

Оценка устойчивости системы «обделка — массив» методом ЕЭМИ производит регистрацию вариаций поля ЕЭМИ с целью контроля развития геодинамических процессов во времени в зонах разупрочнений (места установки датчиков ЕЭМИ были определены при строительстве тоннелей по профилированию поля ЕЭМИ в процессе горнопроходческих работ и возведения постоянной обделки).

Сейсмомониторинг позволяет фиксировать амплитудно-частотные характеристики сейсмособытий в различных частотных диапазонах — от 0 до 6000 Гц. Ускорения смещений, измеряемые трехкомпонентными акселерометрами, позволяют определить дополнительные величины напряжений в обделке в моменты сейсмособытий и суммировать их с показаниями датчиков НДС-обделки. В моменты сейсмособытий на АРМ диспетчера выводятся результаты в баллах по шкале MSK-64.

Вся система «обделка — вмещающий массив» и, в частности, напряженное состояние массива вблизи тоннеля и его изменение во времени контролируется комплексом геофизических методов: сейсмопрофилирование, электроразведка, ультразвуковое прозвучивание, СШП-георадиолокация, регистрация ЕЭМИ.

На основании зарегистрированных в процессе наблюдений сейсмособытий от проходящего транспорта были определены частотные диапазоны, характеризующие состояние обделки тоннеля и системы

«обделка — массив» и собственные частоты всего сооружения.

Важной работой для функционирования системы автоматизированного мониторинга является настройка срабатывания порогов, которые сигнализируют диспетчеру о состоянии несущих конструкций тоннелей. База данных, которая пополняется в серверах геотехнического мониторинга, накапливает информацию об изменениях, происходящих в обделке и в системе «обделка — массив».

Для эффективной работы существующих и будущих систем геотехнического мониторинга и прогноза состояния системы «обделка — вмещающий массив» является целесообразным создание единого аналитического центра по обработке и анализу базы данных геотехмониторинга с целью усовершенствования и оптимизации методологических и технических средств.

Опыт реализации горно-экологического (геотехнического) мониторинга при строительстве транспортных тоннелей участка «Адлер — горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» показывает, что оптимальным решением для обеспечения работоспособности системы мониторинга при эксплуатации и его информативности является последовательная реализация следующей цепочки: инженерно-геологические изыскания — разработка проекта горно-экологического мониторинга в составе проектной документации — ведение мониторинга при строительстве — настройка системы мониторинга при эксплуатации.