

МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТОННЕЛЕЙ

METHOD FOR RECORDING NATURAL ELECTROMAGNETIC RADIATION OF ROCKS AS PART OF THE INTEGRATED GEOTECHNICAL MONITORING SYSTEM IN TUNNELS

М. О. Лебедев, К. В. Романевич, С. А. Шляев, ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»

M. O. Lebedev, K. V. Romanevich, S. A. Shljaev, OJSC Research and design institute «Lenmetrogioprotrans»

В связи с интенсификацией подземного строительства в мире отмечен рост аварийных ситуаций в тоннелях. Для минимизации риска наряду с проведением качественных изысканий и выполнением оценки геологических условий в районе строительства тоннеля, а также применением надлежащих методов строительства и технического обслуживания, одним из основополагающих принципов обеспечения безопасности тоннельных сооружений в период их строительства и эксплуатации является система геотехнического мониторинга.

В статье приводятся некоторые примеры систем геотехнического мониторинга в тоннелях мира при их строительстве и эксплуатации. Подробно рассмотрена автоматизированная система комплексного геотехнического мониторинга в г. Сочи. Основной акцент сделан на подсистеме регистрации естественного электромагнитного излучения горных пород. Приведены примеры анализа комплексных данных долгосрочного мониторинга для двух характерных участков, а также интерпретация полученных результатов, в ходе которой предложена гипотеза о возникновении закономерной цикличности многолетних данных ЕЗМИ.

Так как метод ЕЗМИ является весьма чувствительным к геомеханическим процессам и явлениям в массивах горных пород, выявление стабильного многолетнего хода ЕЗМИ по системе датчиков в тоннелях является основой для прогнозирования возможных аварийных ситуаций.

In connection with the intensification of underground construction in the world, an increase in emergency situations in tunnels has been noted. In order to minimize the risk, along with conducting quality surveys and assessing the geological conditions in the area of the tunnel construction, as well as applying proper construction and maintenance practices, one of the fundamental principles for ensuring the safety of tunnel structures during their construction and operation is a geotechnical monitoring system.

The article provides some examples of geotechnical monitoring systems in tunnels of the world during their construction and operation. The automated system of complex geotechnical monitoring in Sochi is considered in detail. The main emphasis is placed on the subsystem for recording natural electromagnetic radiation of rocks (EMR). Examples of the analysis of complex long-term monitoring data for two characteristic areas are given, as well as the interpretation of the results obtained, during which a hypothesis is proposed about the occurrence of a regular cyclicity of long-term EMR data. Since the EMR method is very sensitive to geomechanical processes and phenomena in rock masses, the identification of a stable long-term course of the EMR recording using a system of sensors in tunnels is the basis for predicting possible emergency situations.

Основными геологическими причинами обрушений в тоннелях являются камнепады, оползни, инфильтрация воды, сейсмическая активность, наличие трещиноватых зон в породном массиве, активизация тектонических разломов и др. Обрушения могут быть вызваны нестабильностью породного массива, возникающей из-за природных факторов, таких как выветривание и эрозия, а также из-за техногенных факторов, таких как взрывные работы или строительство в условиях взаимного влияния.

В монографии [1] впервые систематизирована практически вся отечественная и зарубежная информация по аварийным ситуациям, имевшим место в горных, подводных и городских тоннелях, в том числе тоннелях метрополитенов до 2000 г. Проведена классификация аварий по определяющим признакам, установлены их причины, дана оценка эффективности мероприятий по ликвидации последствий аварий.

Вот несколько наиболее заметных обрушений в новейшей истории:

- в 2000 г. массивный оползень вызвал обрушение железнодорожного тоннеля в Тауэрне, Австрия, что на несколько месяцев прервало железнодорожное сообщение. Причиной оползня стали сильные дожди;

- в 2000 г. камнепад нанес ущерб дорожному покрытию тоннеля Лэрдал, Норвегия и его электрическим системам. Событие было вызвано нестабильностью скального массива и наличием трещиноватых зон в породном массиве;

- в 2001 г. в Швейцарии в результате сильного камнепада обрушилась часть железнодо-

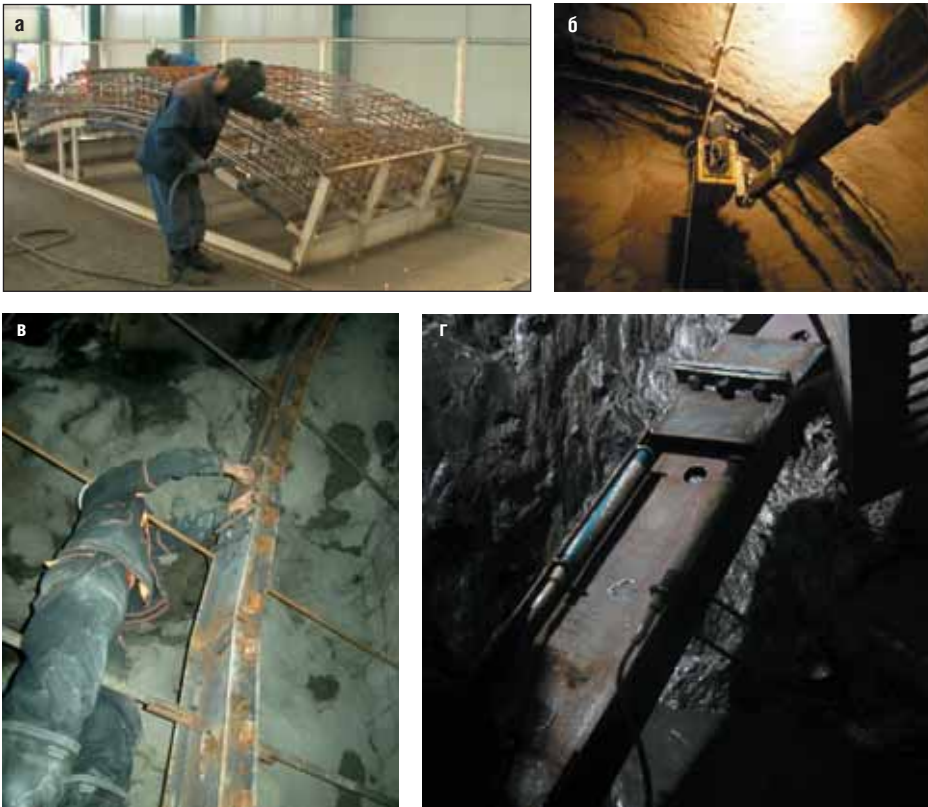


Рис. 1. Установка датчиков в блок обделки при его изготовлении (а), установка датчиков в арматурную арку при монтаже временной аркобетонной крепи в забое тоннеля (б), установка датчиков в двутавровую балку (в), установленные датчики (г)

рожного тоннеля Сен-Готард, в результате чего 11 человек погибли и несколько получили ранения. Обрушение было вызвано сочетанием природных факторов, включая сложные геологические условия и проливные дожди;

- в 2007 г. часть тоннеля Симплон, Швейцария обрушилась из-за нестабильности вмещающего массива в зоне разлома, что привело к значительным повреждениям железнодорожных путей;

- в 2000 г. участок Шанхайского тоннеля обрушился из-за нестабильности вмещающего скального массива. Обрушение было вызвано наличием трещин и ослабленных зон, которые активизировались в процессе проходки горных выработок;

- в 2014 г. часть тоннеля высокоскоростной железной дороги Гуйян-Гуанчжоу была временно закрыта из-за камнепада, повредившего конструкцию тоннеля и железнодорожные пути. Событие было связано с наличием в этом районе разуплотненных грунтов, которые были стабилизированы при строительстве тоннеля;

- в 2016 г. часть тоннеля высокоскоростной железной дороги Чэнду-Чунцин обрушилась из-за нестабильности окружающего скального массива. Обрушение было вызвано наличием высокой трещиноватости пород, которая усугубилась в процессе проходки тоннелей;

- в 2018 г. был временно закрыт эксплуатируемый тоннель Гонконг-Чжухай-Макао из-за оседания грунта, вызванного обрушением естественной пещеры под тоннелем.

Это лишь некоторые примеры из множества аварий, произошедших в транспортных

тоннелях по геологическим причинам. Такие инциденты приводят к значительным перебоям в транспортировке и требуют значительного времени и ресурсов для ремонта.

Наряду с проведением качественных изысканий и выполнением оценки геологических условий в районе строительства тоннеля, а также применением надлежащих методов строительства и технического обслуживания, одним из основополагающих принципов обеспечения безопасности тоннельных сооружений в период их строительства и эксплуатации является система геотехнического мониторинга.

Системы геотехнического мониторинга

В нашей стране для целей контроля уровня геотехнических рисков при строительстве, вводе в эксплуатацию, эксплуатации, реконструкции, восстановлении, консервации и ликвидации транспортных тоннелей в рамках мероприятий по обеспечению их безопасности применяется методика по комплексному горно-экологическому мониторингу транспортных тоннелей (ГЭМ) [2]. По данной методике производятся мониторинговые наблюдения как в ручном режиме сбора геотехнической информации с переносными приборами, так и по автоматизированным системам комплексного геотехнического мониторинга.

Аналогичные системы геотехнического мониторинга применяются в различных тоннелях мира. Вот несколько примеров:

- Швейцария: Готардский базовый тоннель оснащен обширной системой геотехниче-

ского мониторинга, включающей инклинометры, экстензометры и георадарные системы;

- Соединенное Королевство: в тоннеле под Ла-Маншем используется система геотехнического мониторинга, включающая инклинометры, наклонометры и датчики давления;

- Япония: тоннель Сейкан имеет комплексную систему геотехнического мониторинга, включающую инклинометры, наклонометры и сейсмографы. Эти системы используются для контроля устойчивости тоннеля и контроля влияния сейсмической активности;

- Тайвань: Taipei MRT использует геотехническую систему мониторинга, включающую инклинометры, наклонометры и тензометрические датчики.

В Китае также есть много примеров успешного применения систем мониторинга в тоннелях:

- в тоннеле Ханьчжоу-Чжэнду была установлена система мониторинга, которая позволяла в реальном времени отслеживать изменения геотехнических условий в течение всего процесса строительства;

- в тоннеле Лонг-Хай-Роуд была установлена система мониторинга, которая включала в себя несколько технологий, таких как мониторинг деформаций, напряжений и геотехнических изменений. Эта система позволяла предупреждать о возможных проблемах в реальном времени и обеспечивала безопасность всех участников строительства;

- в тоннеле Шанхай-Хунань была установлена система мониторинга, которая включала в себя мониторинг геотехнических изменений, таких как изменения в пористости породы и напряжения в окрестности тоннеля в период строительства;

- в действующих тоннелях высокоскоростной железной дороги Ичан-Ваньчжоу, тоннелях Гонконг-Чжухай-Макао и Гуйян-Гуанчжоу установлена обширная система мониторинга, включающая инклинометры, наклонометры и тензометрические датчики;

- в тоннелях высокоскоростной железной дороги Чэнду-Чунцин и Шанхайском тоннеле используется система мониторинга, включающая инклинометры, наклонометры и сейсмографы.

Это всего лишь несколько примеров из множества систем геотехнического мониторинга, используемых в тоннелях в разных странах. Тип используемой системы мониторинга может варьироваться в зависимости от конкретных геологических условий района и конкретных особенностей тоннеля.

Автоматизированная система комплексного геотехнического мониторинга в г. Сочи

При подготовке инфраструктуры региона к проведению Олимпиады в г. Сочи была сооружена и введена в эксплуатацию совмещенная (автомобильная и железная) дорога Адлер – горноклиматический курорт «Альпика Сервис» общей протяженностью 48 км. Строительство выполнялось с 2008 по 2013 г. За это время было возведено 14 тоннелей (шесть железнодорожных, три автодорожных и пять вспомога-

тельных) общей длиной около 27 км – из них 10,3 км железнодорожных, 6,7 км автомобильных и около 10 км вспомогательных эвакуационных и сервисных штолен.

С самого начала проходческих работ специалистами института ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» осуществлялись режимные наблюдения в составе горно-экологического мониторинга [2]. Основной объем работ приходился на выполнение инструментальных геомеханических, геофизических, сейсмологических, гидрогеологических, геодезическо-маркшейдерских и экологических наблюдений. Исследования велись как по временным профилям и точкам наблюдений в горных выработках и на поверхности, так и по системе устанавливаемых по мере проходки тоннелей постоянных датчиков разного типа, которые монтировались с учетом геологических особенностей трассы (литологические разности, тектонические нарушения, разломы и др.). К концу 2013 г. была установлена и запущена в эксплуатацию вся контрольно-измерительная аппаратура, выполнена синхронизация всех установленных в конструкции датчиков и налажена регистрация измеряемых параметров в автоматическом режиме.

Подсистема контроля НДС

Геомеханические исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород, крепей и обделок являются основой геотехнического мониторинга при строительстве и последующей эксплуатации транспортных тоннелей. Их результаты необходимы для оценки рисков и прогноза повреждений и разрушений конструкций обделок от высоких нагрузок при изменениях НДС, в том числе после землетрясений. Для контроля изменений напряженно-деформированного состояния конструкций тоннелей используются тензометры, работающие по принципу стандартных струнных датчиков. Все они были установлены на этапе строительства и включались в работу сразу после возведения крепей и обделок (рис. 1).

В настоящее время все «Олимпийские» тоннели оснащены автоматизированными системами регистрации изменений напряженно-деформированного состояния обделок тоннелей, фиксации естественного электромагнитного излучения и системами сейсмического мониторинга (рис. 2 и 3).

Подсистема сейсмического мониторинга

Все тоннельные участки трассы лежат в зоне сейсмичности 8 баллов, местами с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями. Согласно инструкции [3] тоннели в районах с сейсмичностью 8 и более баллов оборудуются инженерно-сейсмометрическими станциями для записи смещений, скоростей и ускорений элементов обделки и окружающего массива во время землетрясения. В каждом тоннеле трассы Адлер – Красная Поляна установлена аппаратура для непрерывной записи сейсмического сигнала по трем компонентам (x, y, z). Сигнал разде-



Рис. 2. Размещение и коммутация систем ГТМ в тоннелях трассы Адлер – Красная Поляна: а – внешний вид сейсмостанции, б – внешний вид блока регистрации и передачи информации аппаратуры ЕЭМИ, в, г – коммутация систем ГТМ

ляется на 5-секундные блоки, сравнивается с максимально возможными амплитудами ускорений в соответствии с MSK-64 для 3-, 6-, 9- и более балльного землетрясения. В настоящее время на базе сейсмической системы развернута служба по неразрушающему контролю за состоянием основных конструкций тоннелей на основе анализа возмущений, вызванных потоком транспорта.

Подсистема контроля ЕЭМИ

Мониторинг ЕЭМИ в подземных сооружениях выполняется в различных странах, в основном это режимные мониторинговые наблюдения с переносными приборами [4, 5], мониторинговые системы различного типа в рудных шахтах [6] и в угольных шахтах [7, 8].

Автоматизированная система регистрации естественного электромагнитного излучения в «Олимпийских» тоннелях в г. Сочи, как составляющая общей мониторинговой системы создана для оперативного контроля изменения напряженно-деформированного состояния горных пород вблизи подземных выработок.

Регистрация ЕЭМИ производится аппаратурой типа «Ангел» в частотном диапазоне 1–150 кГц с центральной частотой 30–50 кГц в заданном временном режиме. Вся получаемая информация подвергается предварительной обработке, с учетом которой ведется селекция типов вариаций естественного электромагнитного излучения. Информативным индикатором электромагнитного излучения горных пород считается осредненное значе-

Рис. 3. Расположение отдельного автоматизированного рабочего места (АРМ) геотехнического мониторинга в диспетчерской



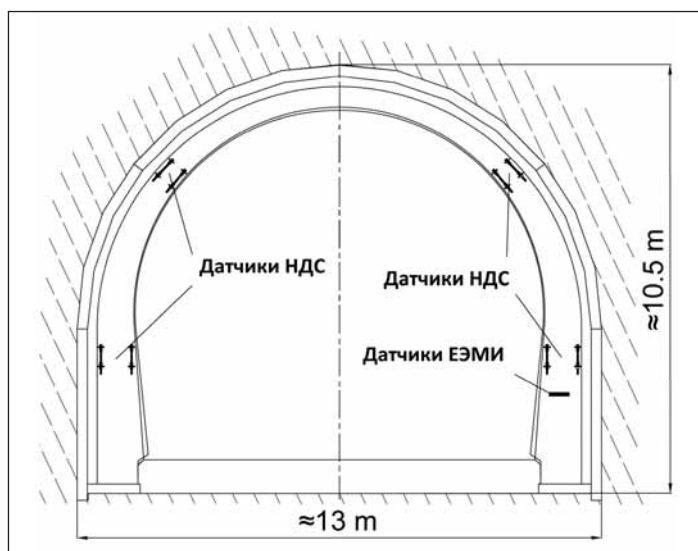


Рис. 4. Схема расположения датчиков в постоянной обделке двухпутного железнодорожного тоннеля № 6

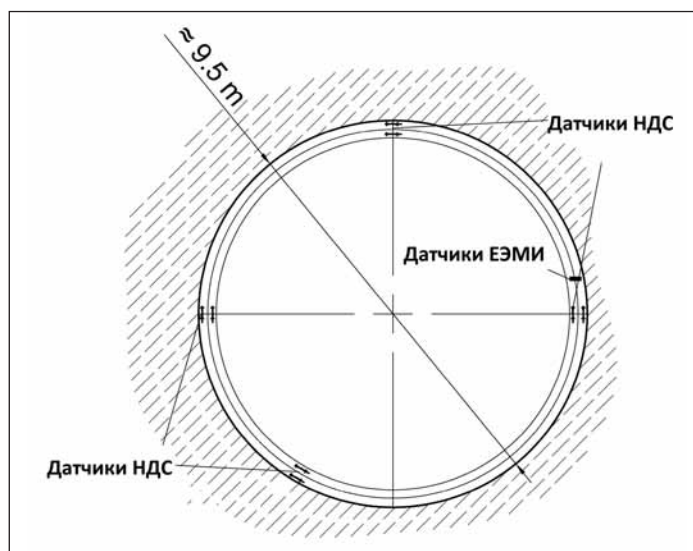


Рис. 5. Схема расположения датчиков в постоянной обделке однопутного железнодорожного тоннеля № 5

ние амплитуд, превышающих уровни значимости, намного превышающие уровень шумов на интересующем участке тоннеля. Следующим этапом обработки является выделение информативных участков регистрации поля в реальном масштабе времени, определение пространственного местоположения источника электромагнитных возмущений и определение пространственно-временного смещения характеристик распространения (с учетом фиксированной частоты).

Техническая сложность поставленных задач определяется тем, что автоматизированная система регистрации ЕЭМИ находится в эксплуатируемых автодорожных и железнодорожных тоннелях действующей железной дороги, поэтому принимаются меры для защиты от промышленных и других помех при проведении измерений. Во-первых, это фильтрация гармонической составляющей промышленных помех и регулярной импульсной помехи алгоритмами используемой аппаратурой. Во-вторых, это комплексное сопоставление результатов измерений с данными по напряженно-деформированному состоянию тоннельных крепей, обделок и вмещающих массивов [9]. В-третьих, выбранный диапазон частот позволяет учитывать влияние атмосфериков (их частотный диапазон 1–20 кГц) и избегать влияния дальних радиостанций (их частотный диапазон – первые сотни и более кГц). И, наконец, это массовый статистический подход, при котором с определенной вероятностью фиксируются основные закономерности естественного электромагнитного излучения горной породы при ее возможном деформировании в процессе эксплуатации тоннелей.

Комплексная интерпретация данных системы мониторинга

Приведем результаты наблюдений по двум показательным участкам «Олимпийских» тоннелей и только по системе железнодорожных тоннелей, где регулярная электромагнитная помеха (проходы электропоез-

дов) сравнительно легко учитывается при анализе и интерпретации данных. С целью сглаживания данных и повышения их точности без искажения сигнала тенденции, на графиках ниже для данных ЕЭМИ применен цифровой фильтр Савицкого-Голея [10].

В качестве демонстрации выбраны следующие железнодорожные тоннели и их отдельные интервалы с сечениями датчиков ЕЭМИ и НДС.

Первый участок

Железнодорожный двухпутный тоннель № 6 подковообразного очертания общей длиной 433 м.

На ПК 453+08 (223 м от южного портала) установлены датчики НДС, на ПК 453+28 (243 м от южного портала) – датчики ЕЭМИ.

Глубина сечения ≈ 38 м.

Участок полностью расположен в делювиальных отложениях, представленных углистыми алевросланцами темно-серого, черного цвета, тонко-среднеплитчатых, жирными на ощупь – от сильнотрещиноватых до раздробленных, в большей массе перемятых, местами перетертых по трещиноватости и сланцеватости с кварц-карбонатными прожилками, местами достигающих мощности до 10 см.

Водоприток умеренный. От слабоустойчивых до совершенно неустойчивых. Коэффициент крепости пород по Протодюяконову 0,8–1,5 – 70 %, 1,5–2,5 – 30 %.

Схема расположения датчиков в постоянной обделке железнодорожного тоннеля № 6 показана на рис. 4.

Второй участок

Железнодорожный однопутный тоннель № 5 круглого очертания общей длиной 2910,2 м.

На ПК 406+65 (730 м от южного портала) установлены датчики НДС.

Глубина сечения с датчиками ≈ 70 м.

Геологическое строение: туфы алевро-пелитовые, массивно-слоистые, бурые, трещи-

новатые. Средней прочности средней устойчивости. Коэффициент Протодюяконова 2–4.

В пяти метрах южнее – граница небольшой (10 м) тектонической зоны, в ней туфы, туфобрекчии порфириновой свиты, зеленовато-серые или бурые. Породы раздробленные перетертые до дресвы, глины светло-серые и бурые с включениями дресвы и щебня. Коэффициент Протодюяконова от 0,8–1,0 до 1,5. Породы маловлажные.

На ПК 407+80 (845 м от южного портала) установлен датчик ЕЭМИ.

Глубина сечения с датчиком ≈ 108 м.

Геологическое строение: авитовые порфириты средней прочности, прочные устойчивые. Трещиноватые. Трещины выполнены гематитом, карбонатом. Коэффициент Протодюяконова 3–5. Породы естественновлажные.

На ПК 410+18 установлены датчики НДС.

Глубина сечения ≈ 100 м.

Сечение находится в зоне тектонического нарушения, представленной миндалекаменными порфиритами серо-зеленого цвета с налетами гематита красновато-вишневого цвета по плоскостям трещин вкрапления оливина до 0,5 см. Породы средней прочности, малопрочные, средней и слабой устойчивости, участками совершенно неустойчивые. Коэффициент по Протодюяконову от 1–2 до 3–4. Породы естественновлажные.

Схема расположения датчиков в постоянной обделке железнодорожного тоннеля № 5 показана на рис. 5.

Результаты долгосрочной регистрации ЕЭМИ и НДС

На рис. 6 представлены результаты совместной обработки данных ЕЭМИ и НДС системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив» по первому участку в железнодорожном тоннеле № 6. Показан временной интервал измерений с декабря 2013 г. по февраль 2021 г.

Также приведены графики температуры воздуха по двум метеорологическим станциям: 1 (в начале трассы тоннелей) – в

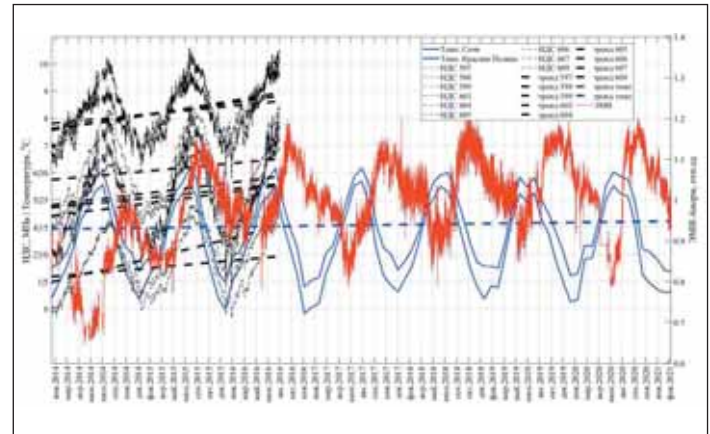
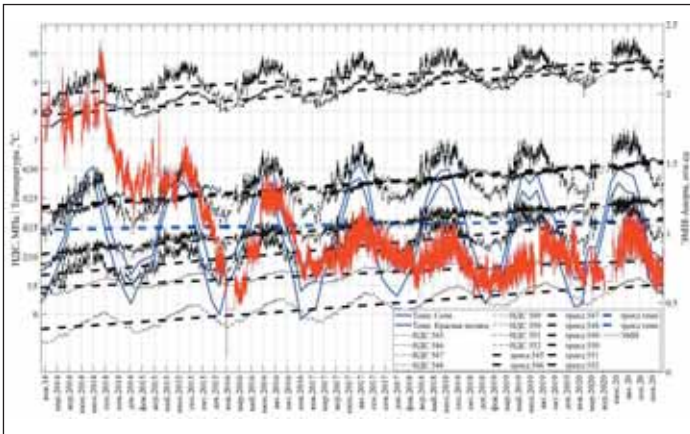


Рис. 6. Результаты совместной обработки данных ЕЭМИ и НДС по первому участку (железнодорожный тоннель № 6)

Рис. 7. Результаты совместной обработки данных ЕЭМИ и НДС по второму участку (железнодорожный тоннель № 5)

г. Сочи (Краснодарский край, Россия): широта 43.58, долгота 39.77, высота над уровнем моря 132 м; 2 (в окончании трассы тоннелей) – в Красной Поляне (Краснодарский край, Россия): широта 43.68, долгота 40.20, высота над уровнем моря 567 м. Для графиков НДС и температуры воздуха проведены линии тренда.

Температурные колебания значений по датчикам НДС за показанный период находятся в пределах 1–2 МПа с четко выраженной сезонностью. Прослеживается безусловная прямая зависимость регистрируемых данных по датчикам НДС от температуры воздуха (и соответственно температуры тоннельной обделки). Это объясняется процессами сезонного сжатия и растяжения струн в измерительных струнных тензодатчиках.

По линиям тренда для датчиков НДС можно сделать вывод о плавном увеличении напряжений в обделке с последующей стабилизацией. В начале эксплуатации напряжения в монолитной железобетонной обделке тоннеля развиваются интенсивнее.

Анализируя графики ЕЭМИ можно заметить, что сезонные колебания ЕЭМИ идентичны в течение всего периода наблюдений, но отличаются по интенсивности в начале измерений.

В начале эксплуатации тоннель и вмещающий массив приходят в равновесие. Накопленных зарядов на бортах микротрещин, микродефектов, микронеоднородностей, трещиноватости больше, и первое время происходит их активная компенсация. На высокую интенсивность ЕЭМИ в начале эксплуатации тоннеля влияет и тот факт, что обделка выполнена из монолитного железобетона, а также то, что в начале эксплуатации напряжения в монолитной железобетонной обделке тоннеля развиваются интенсивнее.

Далее с декабря 2017 г. по настоящее время наблюдается стабилизированный ход ЕЭМИ с выдержанными по интенсивности и частоте минимумами и максимумами.

В начале измерений минимумы ЕЭМИ достаточно четкие, с 2017 г. минимумы растянуты на несколько месяцев.

Минимумы ЕЭМИ наблюдаются:

- в январе 2014, январе 2015, январе 2016 гг;
- с декабря 2016 – января 2017 по июль 2017 г;
- с января 2018 по май 2018 г;
- с ноября 2018 по июль 2019 г;
- с января 2020 по июль 2020 г.

То есть минимумы ЕЭМИ в начале измерений достаточно четко совпадают с минимумами температур, после трех лет эксплуатации минимумы ЕЭМИ растягиваются с минимума температур до начала лета.

На графиках ЕЭМИ наблюдаются локальные и основные максимумы.

Максимумы ЕЭМИ наблюдаются:

- в марте-апреле 2014 г. – локальный;
- в августе 2014 г. – основной;
- в феврале-апреле 2015 г. – локальный;
- в августе 2015 г. – основной;
- в мае-июне 2016 г. – локальный;
- в июле-августе 2016 г. – основной;
- в январе 2017 г. – локальный;
- в августе 2017, августе 2018, августе 2019, августе 2020 г.

Локальные максимумы ЕЭМИ связываются с резким перепадом температур, основные максимумы ЕЭМИ – с максимальными температурами.

На рис. 7 представлены результаты совместной регистрации данных ЕЭМИ и НДС системы «обделка тоннеля – вмещающий горный массив» по второму участку в железнодорожном тоннеле № 5. Показан временной интервал измерений с декабря 2013 по февраль 2021 г. (для ЕЭМИ) и с декабря 2013 по март 2016 г. (для НДС).

Также приведены графики температуры воздуха. Для графиков НДС и температуры воздуха проведены линии тренда.

Колебания значений по датчикам НДС за показанный период находятся в пределах 3–4 МПа с четко выраженной сезонностью. Прослеживается безусловная прямая зависимость регистрируемых данных по датчикам НДС от температуры воздуха (и соответственно температуры тоннельной обделки). Как и в первом случае, исключая температурные колебания по линиям тренда для датчиков НДС можно сделать вывод о плавном увеличении напряжений в обделке с последующей стабилизацией.

Здесь также, как и для первого рассматриваемого участка, в начале измерений наблюдаются нехарактерный для всего остального периода наблюдений ход ЕЭМИ. Уровень ЕЭМИ в отличие от первого участка наоборот повышен. Стабилизация и выход на обычный ход минимумов и максимумов ЕЭМИ здесь наблюдается после года регистрации.

С начала измерений в декабре 2013 г. фиксируется спад интенсивности ЕЭМИ до минимальных значений в мае-июне 2014 г., то есть минимальные ЕЭМИ достигаются на один-два месяца раньше, чем достигаются максимальные значения температуры.

После начала снижения температуры рост ЕЭМИ продолжается.

Локальное повышение ЕЭМИ фиксируется в момент достижения максимальных температурных значений, но все же абсолютный годовой максимум ЕЭМИ (в октябре-ноябре 2014 г.) отмечается только через три-четыре месяца после достижения температурных максимумов, в то время как значения по датчикам НДС переходят к снижению практически синхронно со снижением температуры.

С минимальных значений в январе 2015 г. температура воздуха начинает повышаться, что отмечается в начале этого процесса локальными повышенными значениями ЕЭМИ, а уже через 15–20 суток к снижению до минимума, который сохраняется для ЕЭМИ в течение последующих четырех месяцев.

Очередной рост ЕЭМИ начинается в мае 2015 г. с минимальных значений до максимума в сентябре-декабре 2015 г., также как в предыдущем году максимум ЕЭМИ достигается примерно через месяц после достижения максимальных температурных значений, наблюдавшихся в августе 2015 г.

Далее совместное поведение параметров температуры воздуха, НДС и ЕЭМИ аналогично. Последующие колебания ЕЭМИ свидетельствуют о дальнейшем сохранении выявленной цикличности.

Минимумы ЕЭМИ наблюдаются:

- в начале измерений «растянутые» в апреле-июле 2014 г., марте-июне 2015 г., декабре-мае 2016 г.;

• далее более «точечные» стабильно в мае-июне 2017, 2018, 2019, 2020 гг.

Максимумы ЕЭМИ наблюдаются:

- октябрь-ноябрь 2014 г.;
- сентябрь-декабрь 2015 г.;
- сентябрь-ноябрь 2016 г.;
- ноябрь-декабрь 2017 г.;
- октябрь-декабрь 2018 г.;
- октябрь-декабрь 2019 г. и январь 2020 г.;
- сентябрь-ноябрь 2020 г.

Интерпретация полученных результатов

Наблюдаемая связь ЕЭМИ с температурой не прямая, а опосредованная через изменение свойств прилегающих к выработке горных пород, а именно – через процессы их сжатия и растяжения, ведущих к смыканию и размыканию существующих в них микродефектов и микротрещиноватости. Так, предполагается, что в стабильном сжатом состоянии фиксируются минимумы импульсов ЕЭМИ, при растяжении массива и материала обделки происходит разделение зарядов на бортах микродефектов и происходит нарастание ЕЭМИ, полное разделение бортов микродефектов приводит к прекращению интенсивного ЕЭМИ. Данный процесс протекает в обратную сторону при сжатии микродефектов и микротрещиноватости в массиве горных пород. Периоды сжатия и растяжения тесно связаны с температурными колебаниями, в связи с этим возникает сезонность ЕЭМИ.

Учитывая особенности расположения стационарных датчиков ЕЭМИ в системе «обделка тоннеля – вмещающий горный массив», можно предположить, что решающее значение в формировании сезонных вариаций оказывает изменение температурного режима, на фоне которого происходит периодическое смыкание и размыкание существующих в горных породах микродефектов и микротрещиноватости.

Подтверждение такому выводу можно найти в работах, которые проводились на тоннелях БАМа [11, 12], где перепады температуры были значительней. Влияние температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние обделок тоннелей представлено в [11], здесь дается механизм изменения раскрытия трещин, четко коррелирующий с изменением температуры воздуха в тоннеле, при понижении температуры – трещины раскрываются, при повышении – закрываются.

В работе [12] приводятся результаты комплексных наблюдений за развитием трещин в бетонной обделке Северомуйского железнодорожного тоннеля. На ряде участков с заметным проявлением деформаций были оборудованы замерные станции деформаций бетона обделки тоннеля, проводились прямые наблюдения за деформациями трещин, режимные измерения температуры воздуха на контакте с обделкой тоннеля, а также режимные наблюдения методом регистрации ЕЭМИ с аналоговой аппаратурой.

По результатам теоретических, лабораторных и натурных исследований установлено, что ЕЭМИ отражает реальный процесс изменений напряженно-деформированного состояния в материалах конструкций и горных породах, особенно при трещинообразовании (прорастании, торможении и закрытии существующих трещин). Процесс наблюдается в том числе и на микроуровне – когда видимых трещин ни в обделке, ни в породе не образуется, а деформированию под действием изменения температуры подвергаются микродефекты, неоднородности и микротрещины в материалах обделки и во вмещающем массиве горных пород.

Выводы

Приведенные результаты долгосрочной регистрации ЕЭМИ системой автоматизированного геотехнического мониторинга в «Олимпийских» тоннелях трассы Адлер – Красная Поляна отражают цикличные изменения свойств прилегающего к тоннелям горного массива в тесной взаимосвязи с температурным режимом. На двух различных участках показано, что связь эта не прямая и не постоянная, она может зависеть от структурного состава вмещающих горных пород, этапа эксплуатации, материалов и конструкций обделок железнодорожных тоннелей, различных механизмов смыкания и размыкания микродефектов для конкретного вмещающего массива.

Важным аспектом является подтверждение возможности контроля современной динамики изменения напряженно-деформированного состояния горных пород и конструкций тоннелей, выявление стабильной сезонности, соответствующей нормальному функционированию систем «обделка тоннеля – вмещающий горный массив». Метод ЕЭМИ является весьма чувствительным к геомеханическим процессам и явлениям в массивах горных пород, выявление стабильного многолетнего хода ЕЭМИ по системе датчиков в тоннелях является основой для прогнозирования возможных аварийных ситуаций.

Ключевые слова

Транспортные тоннели, геотехнический мониторинг, естественное электромагнитное излучение горных пород, комплексная интерпретация, анализ данных.

Transport tunnels, geotechnical monitoring, natural electromagnetic radiation of rocks, complex interpretation, data analysis.

Список литературы

1. Власов С. Н., Маковский Л. В., Меркин В. Е. *Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. При участии Куплиса А. Э., Сарabeeва В. Ф., Торгалова В. В. – 2-е издание, дополненное. – Москва: ТИМР, 2000. – 198 с.*
2. *Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транс-*

портных тоннелей. – М.: ИПКОН РАН, НИПИИ «Ленметрогипротранс», 2009. – 68 с.

3. *Инструкция по учету сейсмических воздействий при проектировании горных транспортных тоннелей ВСН 193-81. 1982.*

4. Qiu L, Wang E, Song D, Liu Z, Shen R, Lv G, Xu Z. *Measurement of the stress field of a tunnel through its rock* EMR. *J. Geophys. Eng* 2017; 14:949–959. DOI:10.1088/1742-2140/aabddde

5. Lichtenberger, Marco. *Underground Measurements of Electromagnetic Radiation Related to Stress-induced Fractures in the Odenwald Mountains (Germany). Pure and Applied Geophysics.* 2006. 163. Pp. 1661–1677. DOI:10.1007/s00024-006-0083-5

6. Liu, Xiaofei & Wang, Enyuan. *Study on characteristics of EMR signals induced from fracture of rock samples and their application in rockburst prediction in copper mine.* *Journal of Geophysics and Engineering.* 2018. 15. 10.1088/1742-2140. DOI:10.1088/1742-2140/aaa3ce

7. Wang, E.; He, X.; Liu, X.; Xu, W. *Comprehensive monitoring technique based on electromagnetic radiation and its applications to mine pressure.* *Saf. Sci.* 2012, 50, Pp. 885–893. DOI:10.1016/j.ssci.2011.08.013

8. Li, X.; Wang, E.; Li, Z.; Liu, Z.; Song, D.; Qiu, L. *Rock Burst Monitoring by Integrated Microseismic and Electromagnetic Radiation Methods.* *Rock Mech. Rock Eng.* 2016, 49, Pp. 4393–4406. DOI:10.1007/s00603-016-1037-6

9. Романевич К. В. *Разработка критериев и методики идентификации геодинамических процессов по электромагнитному излучению вблизи выработок неглубокого заложения: диссертация кандидата технических наук: 25.00.20 / ИПКОН РАН – Москва, 2015. – 156 с.*

10. Romanevich K. V., Lebedev M. O., Andrianov S. V., Mulev S. N. *Integrated Interpretation of the Results of Long-Term Geotechnical Monitoring in Underground Tunnels Using the Electromagnetic Radiation Method.* *Foundations* 2022, 2, 561–580. <https://doi.org/10.3390/foundations2030038>

11. Трунев В. Г. *Влияние температурных воздействий на напряженно-деформированное состояние обделок тоннелей БАМа: диссертация кандидата технических наук: 05.23.15 / Ленингр. ин-т инж. ж/д транспорта. – Ленинград, 1990. – 170 с.*

12. Безродный К. П., Исаев Ю. С., Басов А. Д., Романевич К. В. *Проблемы оценки напряженно-деформированного состояния горных пород методом ЕЭМИ. / Труды Всероссийской конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». Том 1. – Новосибирск: Ин-т горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 2011. С. 233–238.*

Для связи с авторами

Лебедев Михаил Олегович
lebedev-lmgt@yandex.ru
Романевич Кирилл Викторович
romanevichkirill@gmail.com
Шляев Сергей Алексеевич
vbstudio@mail.ru

