

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ТОННЕЛЯХ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

М. О. ЛЕБЕДЕВ, Ю. С. ИСАЕВ, К. В. РОМАНЕВИЧ, С. А. ШЛЯЕВ, С. В. АНДРИАНОВ
(ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс»)

СПЕЦИАЛИСТАМИ ОАО НИПИИ «ЛЕНМЕТРОГИПРОТРАНС» РАЗРАБОТАНА И ВНЕДРЕНА АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ ТРАССЫ АДЛЕР — КРАСНАЯ ПОЛЯНА. УЧИТЫВАЯ ДОЛГОСРОЧНОСТЬ ОСУЩЕСТВЛЯЕМЫХ НАБЛЮДЕНИЙ (С 2013 ГОДА ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ), МОЖНО ГОВОРИТЬ О СОЗДАНИИ ПОЛНОЦЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БАЗЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.

ВВЕДЕНИЕ

В любой области технической науки для того, чтобы отличать годовые естественные колебания от долговременных тенденций тех или иных процессов, предпочтительно производить долгосрочный мониторинг. Реализация долгосрочных натуральных наблюдений не всегда физически осуществима, поэтому для многих наблюдаемых явлений прогнозирование часто бывает затруднено.

Весьма распространены реальные природные процессы, когда регистрируемые показания год от года достаточно сильно меняются. Достоверно определить, действительно ли в настоящий момент развитие некоего процесса обострилось или именно текущий год отличается естественным циклическим ростом критических показателей, без многолетних данных практически невозможно. Некоторые изменения в природе могут на много лет отставать от своих первопричин, поэтому для их понимания необходимо выявление всей цепочки событий в наблюдаемых системах [1].

С этой точки зрения создание автоматизированной системы комплексного геотехнического (горно-экологического) мониторинга транспортных тоннелей трассы Адлер — Красная Поляна является несомненно уникальной и важной научно-технической задачей. Регистрируемая информация по комплексу методов позволяет получать статистически значимые результаты по цикличности разного рода и трендам геофизических и геомеханических

процессов во вмещающих массивах различного состава с учетом особенностей в конструкциях тоннелей. Учитывая долгосрочность наблюдений (геотехнический мониторинг ведется с 2013 года по настоящее время), можно говорить о создании полноценной информационной базы для прогнозирования геомеханических процессов и явлений во вмещающих массивах и строительных конструкциях тоннелей трассы Адлер — Красная Поляна.

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Разработанный по специальной методике [2] горно-экологический мониторинг на тоннелях трассы Адлер — Красная Поляна осуществлялся с первого дня их строительства, но сначала в ручном режиме. Основной объем работ приходился на выполнение инструментальных геомеханических, геофизических, сейсмологических, гидрогеологических, геодезическо-маркшейдерских и экологических наблюдений. Исследования велись как по временным профилям и точкам 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). На основе получаемых данных осуществлялась корректировка проектных решений [3].

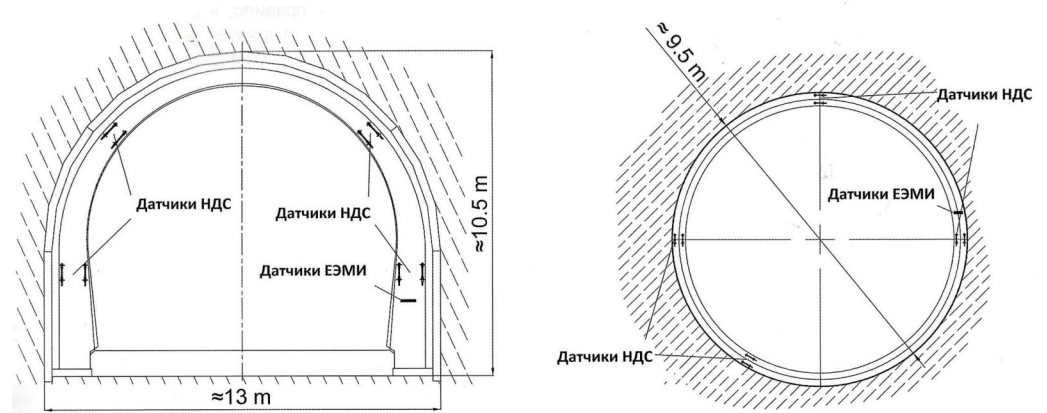


Рис. 1. Примеры оснащения контрольно-измерительной аппаратурой постоянной обделки железнодорожных тоннелей в составе горно-экологического мониторинга для контроля напряженно-деформированного состояния конструкций (датчики НДС) и вмещающего массива (датчики регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ))

Для обеспечения безопасной эксплуатации тоннелей специалистами ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс» была разработана и внедрена система геотехнического мониторинга (ГТМ) на основе непрерывного контроля важных параметров системы «обделка — вмещающий массив». Сбор информации происходит в режиме реального времени с возможностью прогнозирования технического состояния основных конструкций тоннелей, что подразумевает оперативный контроль за негативными (техногенными и природными) воздействиями на сооружения и определение качественных и количественных показателей их влияния на конструкции, а также онлайн-оценку геодинамической активности системы «обделка — вмещающий массив» для прогнозирования изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) пород вблизи подземных выработок на всем их протяжении.

Для этого к моменту окончания строительства была установлена и запущена в эксплуатацию вся контрольно-измерительная аппаратура, выполнена синхронизация всех установленных в конструкции датчиков, налажена регистрация измеряемых параметров в автоматическом режиме и разработан программный комплекс, способный решать поставленные задачи с дальнейшей передачей информации диспетчеру на пульте управления [4].

Система ГТМ на всех тоннельных участках трассы Адлер — Красная Поляна входит в состав АСУ ТП и, в свою очередь, состоит из следующих систем:

- система мониторинга естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ);
- система контроля НДС обделок с помощью тензодатчиков;
- система регистрации сейсмических колебаний с помощью сети сейсмостанций.

На рис. 1 показаны примеры оснащения различных типов обделок тоннелей трассы Адлер — Красная Поляна контрольно-измерительной аппаратурой в составе горно-экологического мониторинга (ГТМ).

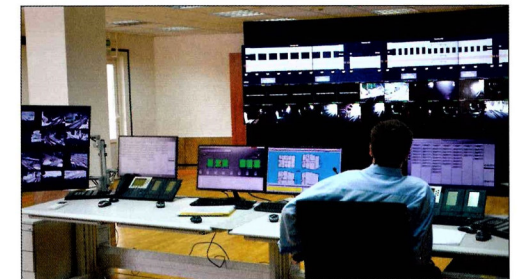


Рис. 2. Расположение отдельного автоматизированного рабочего места (АРМ) геотехнического мониторинга в диспетчерской

Информация с контрольно-измерительной аппаратуры девяти тоннелей трассы поступает на серверы мониторинга в диспетчерской, где обрабатывается, визуализируется и поступает в банк данных (рис. 2).

РЕГИСТРАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ГТМ

По комплексу данных, получаемых с систем мониторинга в автоматическом режиме, устанавливаются и отслеживаются накопления остаточных деформаций в обделках тоннелей за счет:

1) сезонных и суточных изменений напряжений (годовые колебания температуры в обделке тоннеля в среднем составляли +5°C). На рис. 3 в качестве примера приведен график временных изменений напряжений за период наблюдений с 13.05.2013 по 23.03.2022, на котором четко прослеживаются сезонные изменения напряжений и тренд (за последние 5 лет — порядка 0,5 МПа/год);

2) короткопериодных природных (землетрясения, оползни и т. п.) и техногенных воздействий (взрывы, вибрации при движении транспорта и др.).

Вибрационные нагрузки на разные типы обделок тоннелей трассы Адлер — Красная Поляна контролируются в пунктах автоматической регистрации виброускорений,

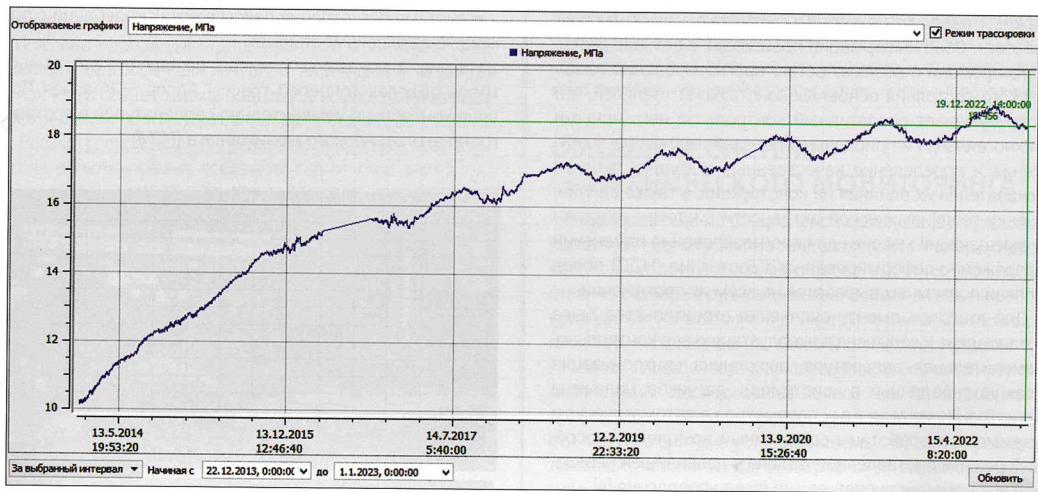


Рис. 3. Изменения напряжений на наружном контуре обделки железнодорожного тоннеля №1 на ПК 169+41 трассы Адлер — Красная Поляна за время эксплуатации

расположенных, как правило, в зонах тектонических нарушений [5]. На рис. 4 в качестве примера приведена единичная акселерограмма и ее спектрограмма при проезде поезда по одной компоненте (X).

Еще одним видом контроля в системе КГМ является мониторинг естественного электромагнитного излучения горных пород (ЕЭМИ), параметры которого тесно связаны с изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) в системе «обделка — вмещающий массив».

В работе [6] предприняты попытки поиска прогнозных критериев сейсмособытий по данным автоматизированной системы комплексного геотехнического мониторинга в тоннелях трассы, подробно рассмотрен случай регистрации ЕЭМИ при достаточно мощном землетрясении ($m_b = 4,7$) 30.05.2012.

Аналогичный случай реакции параметров ЕЭМИ на землетрясение приведен на рис. 5. Показаны ночные и дневные интервалы измерений по одной из замерных станций автоматизированной системы комплексного геотехнического мониторинга. В период с 3:57 по 4:01 01.09.2020 отмечен аномальный спад значений параметра «А» в момент реализации землетрясения с $m_b = 4,3$ на удалении от места регистрации до 100 км в 3:59 по местному времени. В дневное время колебания параметра связаны с движением электричек. Измерения ведутся 1 раз в 4 мин.

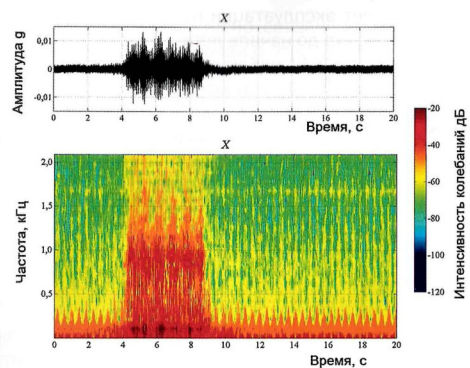


Рис. 4. Акселерограмма и ее спектрограмма при проезде поезда в районе расположения пункта автоматической регистрации виброускорений (компонента X)

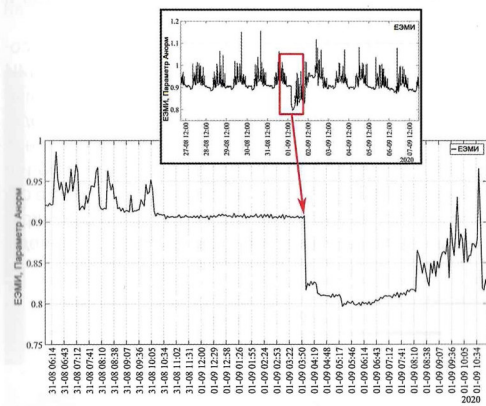


Рис. 5. Реакция относительного амплитудного параметра «Анорм» на землетрясение 01.09.2020 (измерения ЕЭМИ по автоматизированной системе ГТМ)

Вопрос стабильной регистрации ЕЭМИ во время землетрясений еще, конечно, далеко не решен: например, не понятно, почему иногда сейсмособытия отражаются в поле ЕЭМИ, а иногда нет; почему могут быть зарегистрированы некоторые дальние землетрясения, а события в ближней зоне могут никак не отражаться при регистрации ЕЭМИ и др. В целом нестабильность фиксации сейсмособытий отмечается всеми исследователями, рабо-

тающими в данном направлении, и здесь вопросов пока значительно больше, чем ответов.

КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ПО СИСТЕМЕ ГТМ

Важным этапом системы автоматизированного геотехнического мониторинга тоннелей трассы Адлер — Красная Поляна является комплексная интерпретация регистрируемых данных. В качестве примера можно привести результаты долгосрочной регистрации ЕЭМИ, НДС и температуры воздуха от одного опытного участка в железнодорожном двухпутном тоннеле №6 подковообразного очертания общей длиной 433 м.

На рассматриваемом участке 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. Состояние горных пород — от сильнотрещиноватых до раздробленных, в большей массе перемятых, местами перетертых по терциноватости и сланцеватости. От слабоустойчивых до совершенно неустойчивых. Водопроницаемость умеренная. Коэффициент по Протодяконову 0,8-1,5 — 70%, 1,5-2,5 — 30%.

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 по февраль 2021 года.

Также приведены графики температуры воздуха по двум метеорологическим станциям: 1 в начале трассы тоннелей) — в Сочи (Краснодарский край): 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.

Информация о температуре приведена по данным справочно-информационного портала «Погода и климат».

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 от температуры воздуха (и соответственно температуры тоннельной обделки). Это объясняется процессами сезонного сжатия и растяжения струн в измерительных струнных тензодатчиках.

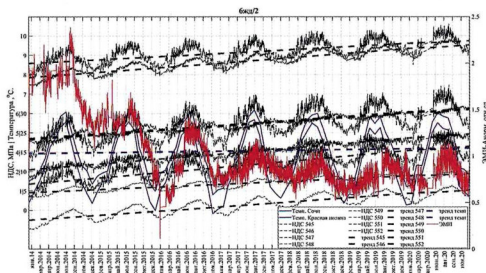


Рис. 6. Результаты совместной обработки данных ЕЭМИ и НДС по первому участку (железнодорожный тоннель №6)

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. Это объясняется тем, что в начале эксплуатации тоннель и вмещающий массив приходят в равновесие. Накопленных зарядов на бортах микротрещин, микродефектов, микро неоднородностей, 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 года 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 года — растянуты на несколько месяцев.

Минимумы ЕЭМИ наблюдаются: в январе 2014, январе 2015, январе 2016 гг.; с декабря 2016 — января 2017 по июнь 2017 года; с января по май 2018 года; с ноября 2018 по июнь 2019 года; с января по июнь 2020 года.

То есть минимумы ЕЭМИ в начале измерений достаточно четко совпадают с минимумами температур, а

после трех лет эксплуатации растягиваются с минимума температур до начала лета.

На графиках ЕЭМИ наблюдаются также локальные и основные максимумы: в марте-апреле 2014 года — локальный; в августе 2014 года — основной; в феврале-апреле 2015 года — локальный; в августе 2015 года — основной; в мае-июне 2016 года — локальный; в июле-августе 2016 года — основной; в январе 2017 года — локальный; в августе 2017, августе 2018, августе 2019, августе 2020 года.

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

Поскольку для регистрации используются антенные блоки, изготовленные из термостабильного феррита, была выдвинута гипотеза о том, что наблюдаемая связь ЕЭМИ с температурой — не прямая, а опосредованная через изменение характеристик прилегающих к выработке горных пород — а именно через процессы их сжатия и растяжения, ведущие к смыванию и размыканию существующих в них микродефектов и микротрещиноватости (рис. 7).

Так, предполагается, что в стабильном сжатом состоянии фиксируются минимумы импульсов ЕЭМИ (1), при растяжении массива и материала обделки происходит разделение зарядов на бортах микродефектов (2) и нарастание ЕЭМИ (3), полное разделение бортов микродефектов приводит к прекращению интенсивного ЕЭМИ (4). Данный процесс протекает в обратную сторону при сжатии микродефектов и микротрещиноватости в массиве горных пород. Периоды

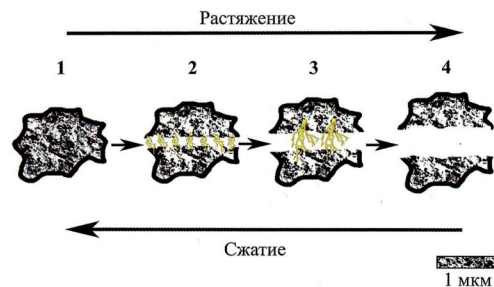


Рис. 7. Схема возникновения ЕЭМИ при сжатии и растяжении микродефектов в материалах строительных конструкций и вмещающем массиве горных пород

сжатия и растяжения тесно связаны с температурными колебаниями, в связи с этим возникает сезонность ЕЭМИ [7].

На различных опытных участках и для разных типов тоннельной обделки выявлено, что связь эта не прямая и не постоянная — она может зависеть от структурного состава вмещающих горных пород, материалов и конструкций обделок тоннелей, различных механизмов смывания и размыкания микродефектов для конкретного вмещающего массива и др. Для более уверенных выводов необходимо продолжение анализа данных по автоматизированной системе геотехнического мониторинга тоннелей. Следует более подробно изучить вопросы возникновения и развития цикличности и сезонности в данных ЕЭМИ, в том числе и их связи с наземными измерениями по региональной сети. Провести детальную обработку мониторинговых данных методами математической статистики. Выявить количественные взаимосвязи параметров ЕЭМИ и НДС. Проследить реакции ЕЭМИ на землетрясения на различных участках и др.

Выводы

Выявление стабильной цикличности регистрируемых параметров, соответствующей нормальному функционированию систем «обделка тоннеля — вмещающий горный массив», является подтверждением возможности контроля геомеханических процессов и явлений в горных породах и тоннельных конструкциях.

Регистрируемая информация по комплексу методов позволяет получать статистически значимые результаты по цикличности разного рода и трендам геофизических и геомеханических процессов во вмещающих массивах различного состава с учетом особенностей в конструкциях тоннелей. Учитывая долгосрочность наблюдений, можно говорить о создании полноценной информационной базы для прогнозирования геомеханических процессов и явлений во вмещающих массивах и строительных конструкциях тоннелей трассы Адлер — Красная Поляна.

Литература

1. Грин Н., Стаут У, Тейлор Д. Биология: в 3-х томах / Пер. с англ. — М.: Мир, 1995.
2. Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. — М.: УРАН ИПКОН РАН, НИПИИ «Ленметрогипротранс», 2009.
3. Лебедев М.О., Безродный К.П., Шляев С.А. Геотехнический мониторинг как основа прогнозирования технического состояния обделки при эксплуатации транспортных тоннелей. — М.: Наука и транспорт, 2009. № 1, с. 20-25.
4. Безродный К.П., Культин И.В., Лебедев М.О. Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) в железнодорожных тоннелях Олимпийской трассы. — Наука и транспорт, 2009. № 1, с. 24-26.
5. Лебедев М.О., Басов А.Д., Шляев С.А., Романевич К.В. Геотехнический мониторинг транспортных тоннелей трассы «Адлер — Красная Поляна». — Сборник материалов международной научно-практической конференции «ГЕОСОЧИ-2022. Тематическая сессия: «Современное состояние и перспективы развития инженерной геофизики» (27-29 апреля 2022 года), Сочи, 2022. С. 62-65.
6. Катаев С.Г., Лебедев М.О., Романевич К.В., Долгий М.Ю., Кулешов В.К., Шляев С.А. Поиск прогнозных критериев сейсмособытий по данным автоматической системы комплексного геотехнического мониторинга в транспортных тоннелях Сочи // «Инженерная и рудная геофизика 2019» — Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019 г.
7. Romanovich 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 EMR Method. Foundations 2022, 2, 561–580. <https://doi.org/10.3390/foundations2030038>.

