

УДК 550.837:624

## **БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ В СОЧИ**

**Романевич К. В.**

(ОАО НИПИИ Ленметрогипротранс,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

*У статті розглядається склад комплексу гірничо-екологічного моніторингу при будівництві транспортних тунелів. Як один з перспективних напрямів виділено можливість безконтактного і неруйнівного методу визначення напружено-деформованого стану на основі реєстрації природного електромагнітного випромінювання (ПЕМВ). Дано аналіз сучасного стану питання і наведено приклад спільного дослідження геоелектромагнітних і геомеханічних процесів при будівництві й експлуатації транспортних тунелів у Сочі.*

*The article discusses the complex of mining-environmental monitoring during the construction of transport tunnels. As one of the promising directions, highlighted the possibility of design and development of noninvasive and nondestructive method for determining the stress-strain state based on natural registration of electromagnetic radiation (NEMR). Given analysis of the current state of the question, and also shows one of the joint study of the geoelectromagnetic and geomechanical processes during construction and operation of transport tunnels in Sochi.*

Одной из задач в процессе строительства тоннелей на совмещенной (автомобильной и железной) дороге Адлер – горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» является монито-

ринг состояния горного массива и сооружаемых конструкций тоннелей. По трассе запланировано строительство шести тоннельных комплексов общей протяженностью подземных выработок около 32,5 км, включающих: 6 железнодорожных тоннелей протяженностью 11 096 м; 3 автодорожных тоннеля протяженностью 6 867 м; 3 сервисно-эвакуационные штольни протяженностью 11 056 м; и другие вспомогательные выработки для обслуживания тоннелей протяженностью около 3 500 метров.

Темпы строительства транспортных тоннелей требуют высокого уровня промышленной безопасности и качественного научного сопровождения, что достигается путем осуществления горно-экологического мониторинга при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей [1].

Деформации и разрушения конструкций транспортных тоннелей, обладающих недостаточной несущей способностью и жесткостью, под воздействием неблагоприятных природных и техногенных факторов, могут происходить как на этапе строительства, так и спустя много лет после ввода сооружения в эксплуатацию.

Основными природными факторами, определяющими состояние промышленной безопасности строительства и эксплуатации транспортных тоннелей, в пределах горного отвода являются [1]:

- эндогенные процессы (современные тектонические движения земной коры, землетрясения и связанные с ними явления);
- экзогенные геологические процессы (склоновые явления, карстово-суффозионные явления, просадки грунта, криогенные процессы, горные удары, разрушение крепи, внезапные обрушения подземных выработок и другие).

Для практической реализации системы горно-экологического мониторинга при сооружении тоннелей в составе научно-исследовательского отдела института ЛМГТ создана специальная группа различных специалистов для сопровождения строительства и оперативного решения задач снижения вредного влияния горных работ на окружающую среду, обеспечения производственной безопасности при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей.

Основными задачами горно-экологического мониторинга являются:

- обеспечение безопасности при сооружении и эксплуатации транспортных тоннелей;
- оценка состояния окружающей среды при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей;
- прогноз состояния окружающей среды, в том числе изменений вызванных техногенными авариями; и последующая разработка рекомендаций по предупреждению техногенных аварий, предотвращению или снижению вредного влияния проходческих работ и эксплуатации на окружающую среду.

Преодоление тоннелем большого диаметра зон разломов и других геологических аномалий - сбросов и сдвигов, совпадающих с простираем пластов, сопровождается геодинамическими процессами – непрерывным изменением напряженно-деформированного состояния горного массива вблизи контура выработки, проявляющемся в развитии процессов трещинообразования и разрушения. В зонах тектонических разломов, при наличии сильнотрещиноватых и неустойчивых грунтов, резко возрастает горное давление на крепь, приток подземных вод и газов, происходят вывалы и обрушения грунтов, разрушения временной крепи и обделки выработки.

Нередко причиной аварий могут быть такие природные явления, как оползни, снежные лавины, сели, камнепады. При неудачном расположении участков выработок в пределах неустойчивых склонов, подверженных этим явлениям, что характерно для района строительства участки подземного сооружения могут быть деформированы или разрушены.

Для прогнозирования времени, интенсивности и характера проявления горного давления в выработках, а также оползневых, селевых и других явлений на дневной поверхности, необходим постоянный инструментальный контроль напряженно-деформированного состояния массива, в рамках горно-экологического мониторинга. Своевременный и надежный контроль в рамках горно-экологического мониторинга при строительстве транспортных тоннелей позволяет обеспечивать высо-

кую эффективность использования технологического оборудования и повышает безопасность ведения горных работ.

Основными инструментами при проведении горно-экологического мониторинга являются геодезическо-маркшейдерские, сейсмологические, геомеханические, гидрогеологические, экологические наблюдения.

Особое место отводится геофизическим исследованиям, включающим в себя комплекс сейсмо- и электроразведочных работ, с помощью которых проводится:

- уточнение инженерно - геологических условий с выделением аномальных зон впереди забоя тоннеля;
- контроль действия различных техногенных факторов и влияния их на состояние и свойства геологической среды, а также выявление в массиве наиболее «активных» (деформируемых) участков;
- контроль состояния зон разгрузки вокруг подземных выработок;
- контроль изменения НДС внутренних частей массива и выявления областей возможного развития необратимых деформационных и фильтрационных процессов;
- получение фактических деформационно-прочностных характеристик массива при проходке тоннеля.

В рамках указанного комплекса геофизического мониторинга представляется перспективным использование бесконтактного неразрушающего метода экспресс определения НДС вмещающих массивов, а также крепей и обделок строящихся и эксплуатируемых тоннелей на основе регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ), позволяющего получать оперативную информацию о геодинамических процессах в заобделочном пространстве и крепях тоннелей.

Одними из первых электромагнитное излучение горными породами начали исследовать в Томском политехническом институте еще в 1970-х годах под руководством профессора А. А. Воробьева. Позднее А. А. Воробьев предложил использовать электромагнитное излучение, сопровождающее процесс нагружения твердых диэлектрических тел, в качестве информационного канала, свидетельствующего о той или иной стадии

развития разрушения нагружаемого тела. Основой для этого представления послужило следующее положение: в силу того, что появление электромагнитной эмиссии связано с разрушением деформируемого тела, то возникающие электромагнитные импульсы характеризуют как начальную дефектность, повреждаемость тела, так и особенности развития разрушения при действии на тело нагрузки [2].

Кроме исследований в области физических аспектов возникновения сигналов ЕЭМИ при разрушении горных пород и других материалов, метод интенсивно стал использоваться для прогноза и контроля землетрясений, а также динамических проявлений горного давления в массивах горных пород. Наиболее интересные результаты были получены при проведении лабораторных и натуральных исследований в ИФЗ РАН, во ВНИМИ, в ФТИ им. А. Ф. Иоффе, в Тамбовском государственном университете, в МГГУ, в ИГД СО РАН, в КузГТУ, в Томском ПУ. Аналогичные исследования проводятся и в других странах: Украина, Грузия, Армения, Казахстан, Узбекистан, Киргизия. Результаты исследований по ЕЭМИ, заключающиеся в возникновении ультранизкочастотных излучений перед землетрясениями, а также закономерностей увеличения количества электромагнитных эмиссионных сигналов перед внезапными выбросами угля и газа были получены и в странах дальнего зарубежья – США, Канаде, Японии, Китае, Индии, Чехии [3].

Анализ лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений с использованием метода, основанного на регистрации сопутствующего трещинообразованию породных образцов электромагнитного излучения, позволил получить следующие выводы:

1) в качестве преобразователя механической энергии в электрическую энергию при землетрясениях и динамических проявлениях горного давления в ОИФЗ РАН, как один из основополагающих, принят механизм дипольного излучения зарядовой мозаики на бортах раскрывающихся трещин;

2) отмечено, что генерация ЕЭМИ – процесс по своей природе динамический, а активизация процесса деформирования участков массива перед горными ударами или поверхностных слоев земли перед землетрясениями увеличивается, причем важ-

ны не столько абсолютные значения изменений напряжений или деформаций, сколько скорости их нарастания или спада;

3) на стадии подготовки горного удара возникают в большом количестве мелкие трещины, генерирующие высокочастотные электромагнитные импульсы, вероятно, их слияние при достижении критической концентрации и появление более длинных трещин, излучающих акустические и низкочастотные электромагнитные сигналы;

4) при прогнозе удароопасности в подземных горных выработках с регистрацией сигнала ЕЭМИ при амплитуде, не превышающей в три раза ее величины, измеренной вне зоны опорного давления, ситуацию считают неудароопасной, а при больших величинах амплитуд – удароопасной;

5) при прогнозе землетрясений аномально высокие вариации ЕЭМИ наблюдались за несколько суток или десятков часов до землетрясений;

6) при землетрясениях и двух магматических излияниях в 1986 и 1991 годах зафиксирован ряд сейсмогенных электромагнитных эмиссий в широком частотном диапазоне: 82 кГц, 1525 и 36 Гц, т. е. в широкой полосе частот;

7) уровень фоновой интенсивности ЕЭМИ изменялся на порядок перед землетрясениями [3].

До настоящего времени не удалось установить четкую и однозначную взаимосвязь между характеристиками НДС массива горных пород и параметрами вариаций естественного электромагнитного излучения. Причины неудач лежат во все еще слабой изученности самого явления, особенно в натуральных условиях, так как практически все, что нам сейчас известно об ЕЭМИ, получено при исследованиях с образцами горных пород, бетона и других материалов в лабораторных условиях при испытаниях на прессах при разных режимах и видах деформирования. Применяемая ранее аппаратура позволяла изучать отдельные параметры сигналов ЕЭМИ (количество импульсов в единицу времени на заданном уровне селекции, среднюю амплитуду). Поэтому до сих пор нет четких критериев взаимосвязей изменений НДС с параметрами поля ЕЭМИ в местах, где известны координаты, время и энергия проявления горного давления.

Для выработки критериев, позволяющих проводить диагностику предразрушающего состояния участков массивов и удовлетворительно описывающих подготовку и сопровождающие процесс проявления горного давления изменения в структуре сигналов электромагнитного излучения на различных стадиях его нагружения необходимы исследования физических и геомеханических процессов, происходящих в подземных горных выработках при проведении горных работ [2].

В рамках комплекса работ по горно-экологическому мониторингу на транспортных тоннелях совмещенной (автомобильной и железной) дороги Адлер – горноклиматический курорт «Альпика-Сервис» специалистами научно-исследовательского отдела ОАО НИПИИ Ленметрогипротранс ведется непрерывная оценка устойчивости призабойной зоны строящихся тоннелей и контроль оползневых процессов на припортальных участках. Используются разработанные ВНИМИ, но несколько модернизированные измерительные комплексы типа «Ангел», позволяющие производить оценку параметров нестационарных геофизических полей, связанных с разрушением горных пород, а также экспресс-прогноз удароопасности участков массива на основании сигналов ЭМИ. Прибор выполняет прием сигналов ЕЭМИ с помощью рамочной антенны на частоте 31 кГц. Программа накопления и анализа данных оценивает несколько параметров сигналов ЕЭМИ, из которых наиболее информативным считается амплитуда сигнала.

На рис. 1 показаны временные графики средних значений параметра Ам поля ЕЭМИ и напряжений. Графики построены по данным одновременных измерений на замерных станциях деформаций на ПК 135+22,5 и 135+82,5. Опытные участки определения НДС крепи в натуральных условиях оснащены датчиками ТБ-200. Струнные датчики линейных деформаций ТБ-200, представляют собой струну, закрепленную между двумя опорными шайбами внутри металлической тонкостенной трубы. Измеряемым параметром является период колебания струны в микросекундах. Измерения проводятся переносным цифровым периодомером ПЦП-1.

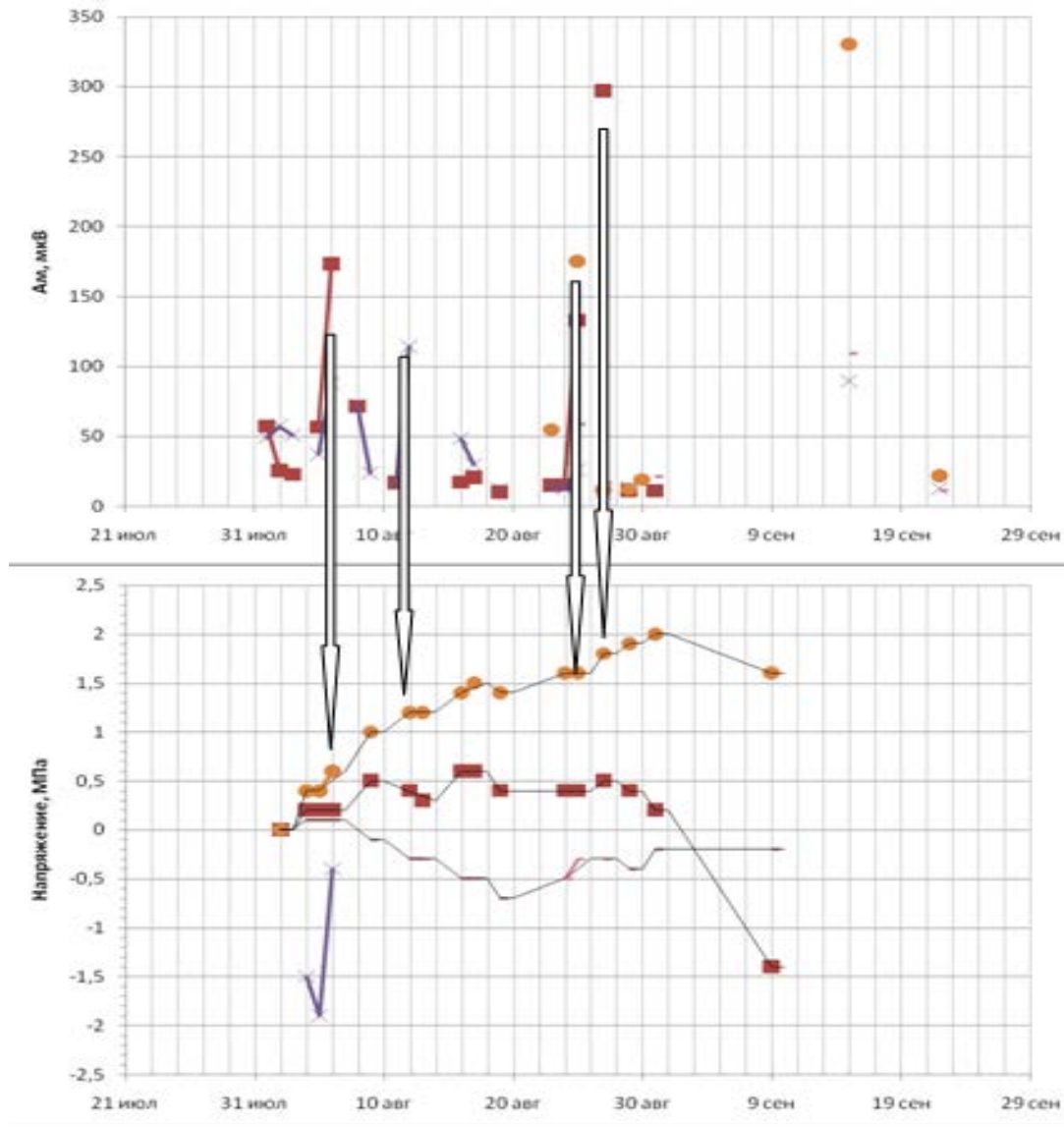


Рис. 1. Результаты одновременных определений параметров поля ЕЭМИ и напряжений (деформаций) на автодорожном тоннеле № 1 в сечениях 1 и 2 (замерные станции деформаций на ПК 135+22,5 и 135+82,5) в июле-сентябре 2010 года

Замеры ЕЭМИ проводились у правой и у левой по ходу к забою стенок тоннеля вблизи датчиков-деформометров. Стрелками показаны всплески ЕЭМИ при соответствующих значениях напряжений. Хотя ряды значений по оси времен получали через неравные интервалы времени и есть пропуски, можно заметить,



что после всплеска излучения ЕЭМИ через некоторое время происходит изменение напряжений.

Так 06.08.10 г. был отмечен всплеск излучения ЕЭМИ (наибольшее значение  $A_m = 175$  мкВ), наибольшие изменения напряжений произошли и были определены 9 и 12 августа и составили в итоге ко второму всплеску ЕЭМИ порядка 1,2 МПа.

Второй всплеск излучения ЕЭМИ ( $A_m = 110$  мкВ) был зафиксирован 12 августа. Наблюдения поля ЕЭМИ проводились 16, 17, 19 и 23 августа, однако, параметр поля  $A_m$  при этих замерах был небольшой величины и менялся в пределах от 10 до 55 мкВ. Самые большие изменения напряжений за этот же временной интервал составили порядка 0,4 МПа.

Третий всплеск излучения ЕЭМИ (с наибольшим значением  $A_m = 175$  мкВ) случился 25 августа спустя 13 дней после второго всплеска и некоторого снижения геодинамической активности с 12 по 25 августа. При замерах деформаций 25 и 27 августа было определено изменение напряжений на 0,2 МПа. Тогда же 27 августа был зарегистрирован четвертый всплеск излучения ЕЭМИ с максимальным значением параметра  $A_m = 300$  мкВ, но при измерениях 29 августа значения поля ЕЭМИ резко понизились ( $A_m = 10-20$  мкВ). Напряженное состояние по данным измерений деформаций с 27 августа по 1 сентября продолжало меняться на относительно небольшие величины. Наибольшее суммарное значение напряжения сжатия 1 августа составило 2 МПа. По другому деформометру при замере 27 августа напряжение составило 0,5 МПа, а 29 августа отмечено изменение знака напряжений (растяжение), которое продолжалось при замерах деформаций 1 сентября. К сожалению, между 1 сентября и последующим 9 сентября измерения деформаций не проводили. 9 сентября самое большое растягивающее напряжение составило 1,4 МПа.

Полагая за фоновые значения  $A_m$  до 50 мкВ (в данном случае) все значения выше фона могут быть связаны с деформациями и изменениями напряженного состояния. Важно, что всплески ЕЭМИ происходят раньше деформаций. Можно рассчитывать, что подобные прогностические свойства ЕЭМИ проявляются как при больших, так и при относительно небольших изменениях напряженного состояния пород.

Еще один момент, который надо иметь в виду: видимо наибольшим изменениям (всплескам) ЕЭМИ соответствуют большие изменения деформаций-напряжений, но с большим отставанием по времени. Это заметно по замерам конца августа, начала сентября. Запаздывание деформаций-напряжений от всплесков ЕЭМИ в данном случае составляет от 2 до 4 - 5 суток. Ясно, что для более определенных выводов необходимы дополнительные статистически значимые результаты, которые можно получить при массовых долговременных наблюдениях и в ходе специальных экспериментов.

Приведенные результаты одновременных измерений ЕЭМИ и деформаций представляются нам важными для оперативного контроля и прогноза НДС в тоннелях. Конечно, требуются их подтверждения в самых разных горно-геологических условиях, поскольку они получены на относительно коротком по времени интервале наблюдений и на ограниченном количестве объектов. В связи с этим, в настоящий момент в непрерывном режиме ведутся исследования физических и геомеханических процессов, происходящих в строящихся транспортных тоннелях Сочи.

## **СПИСОК ССЫЛОК**

1. Методическое руководство по комплексному горно-экологическому мониторингу при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей. – М.: УРАН ИПКОН РАН, НИПИИ «Ленметрогипротранс», 2009. – 68 с.
2. Яворович Я. В. «Взаимосвязь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород». Диссертация кандидата технических наук: 25.00.20. – М.: РГБ, 2005 г. (из фондов Российской Государственной Библиотеки).
3. Яковицкая Г. Е. «Разработка метода и измерительных средств диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии». Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 25.00.20. – Новосибирск, 2007 г.