



**РЕГИСТРАЦИЯ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТОННЕЛЕ ПРИ ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫХ
И ТЕХНОГЕННЫХ НАГРУЗКАХ**

Ю. С. Исаев, А. Д. Басов, К. В. Романевич

*ОАО “Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт “Ленметрогипротранс”,
E-mail: romanevichkirill@gmail.com,
ул. Большая Московская 2, г. Санкт-Петербург 191002, Россия*

Представлены результаты исследований влияния техногенных и природных деформационных воздействий на резонансный отклик в сейсмоакустических и электромагнитных полях и о возможности его использования для контроля напряженно-деформированного состояния в геотехнических системах. Целью исследований является повышение информативности применяемого метода регистрации естественного электромагнитного излучения для контроля напряженно-деформированного состояния в железнодорожных тоннелях. Проведены опытные работы по регистрации электромагнитного излучения при проезде электропоездов в тоннелях на участках с различными инженерно-геологическими условиями и глубинами заложения.

Естественное электромагнитное излучение, сейсмические колебания, акселерограмма, вибрации, напряженно-деформированное состояние, спектрограмма, обделка тоннеля, резонанс, частота

**RECORDING OF NATURAL ELECTROMAGNETIC RADIATION
IN A RAILWAY TUNNEL UNDER GEODEFORMATION AND TECHNOGENIC LOADS**

Yu. S. Isaev, A. D. Basov, and K. V. Romanevich

*JSC Research, Design and Survey Institute Lenmetrogioprotrans,
E-mail: romanevichkirill@gmail.com,
ul. Bolshaya Moskovskaya 2, Saint Petersburg 191002, Russia*

The results of influence exerted by technogenic and natural deformation effects on the resonance response in seismoacoustic and electromagnetic fields are presented and possibility of its use to control the stress-strain state in geotechnical systems is studied. This research aims at increasing the information level of the method for recording natural electromagnetic radiation to monitor the stress-strain state in railway tunnels. Experimental work is carried out to record electromagnetic radiation when electric trains passed the tunnels in areas with different engineering and geological conditions and depths.

Natural electromagnetic radiation, seismic vibrations, accelerogram, vibration, stress-strain state, spectrogram, tunnel lining, resonance, frequency

Аномальные изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) в системе “обделка тоннеля – массив горных пород”, которые могут представлять опасность для эксплуатации тоннеля, проявляются в пространственно-временных вариациях геофизических полей. Данные регистрации естественного электромагнитного излучения (ЭМИ) и сейсмоакустической эмиссии в тоннелях с различными горно-геологическими условиями показывают, что эти поля чутко реагируют на изменения НДС, особенно при высоких скоростях и больших периодах воздействия даже не очень интенсивных нагрузок [1–3]. Однако при работе с данными регистрации ЭМИ, полученными в реальных условиях, бывает трудно выделить признаки сиг-

налов, действительно связанных с НДС, когда источниками ЭМИ являются трещины, точнее их образование и развитие, а не какие-либо иные источники ЭМИ. Поэтому использование способов активизации процессов механоэлектромагнитных преобразований в системе “обделка тоннеля – массив горных пород” вибрационными нагрузками может оказаться полезным для более надежной идентификации этих сигналов при исследованиях НДС.

К настоящему времени получены материалы по регистрации ЭМИ по данным наблюдений только одного типа механической нагрузки — вибраций при проезде электропоезда относительно небольшого веса по двум тоннелям неглубокого заложения в специфичных сейсмогеологических условиях Северного Кавказа сейсмичностью 9 баллов. За период работы системы геотехнического мониторинга тоннелей трассы “Адлер – Красная Поляна” ее сейсмическими станциями не было зарегистрировано ни одного землетрясения, хотя в районе их расположения случались землетрясения средней и умеренной интенсивности (рис. 1).

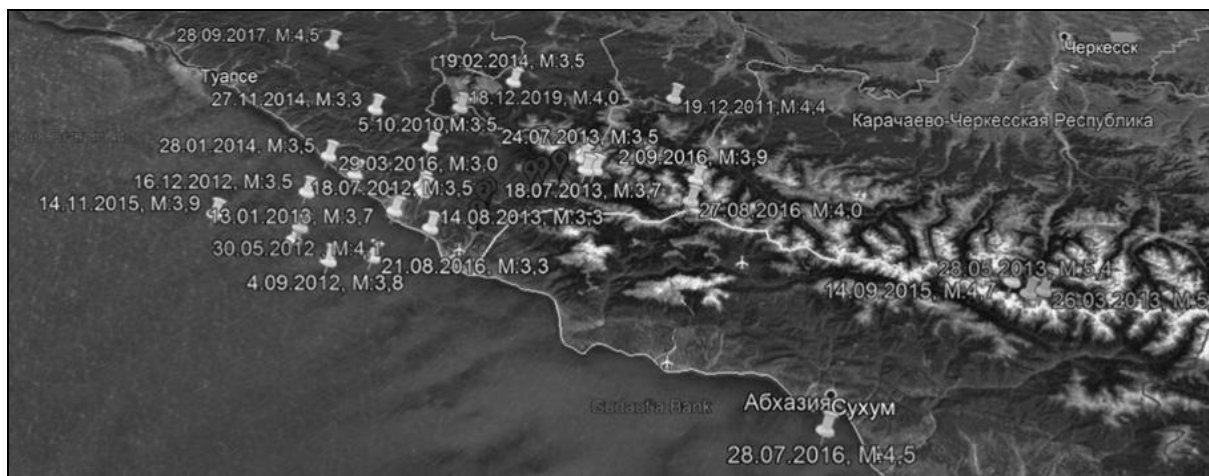


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений в радиусе 150 км от трассы тоннелей в 1993–2021 гг.

По этой причине авторы начали изучение откликов ЭМИ на относительно слабые нагрузки и считают, что на данном этапе проводить количественные оценки взаимосвязей механических нагрузок на тоннельные конструкции и их отклика в сигналах ЭМИ на основе относительно слабых нагрузок преждевременно. Возможно, что будущие сильные землетрясения, активизация оползней, смещения по разломам и др. дадут материалы по ЭМИ, которые позволят по-иному проанализировать характеристики механоэлектромагнитных преобразований — это запланировано сделать в будущих исследованиях.

Методика измерений и аппаратура. В статье использованы материалы, полученные при обработке данных комплексной системы автоматизированного геотехнического мониторинга в тоннелях трассы “Адлер – Красная Поляна” и результаты регистрации ЭМИ переносной аппаратурой ЭМИ-ЗК, разработанной в ОАО “НИПИИ “Ленметрогипротранс” и изготовленным НПП “ЭРА”.

При исследованиях с переносной аппаратурой выполнялись профильные наблюдения с шагом 5–10 м и вариационные измерения в отдельных пунктах длительностью наблюдений в несколько часов до и после проезда состава. В первом случае оператор с аппаратурой перемещался по тоннелю, во втором — приемная антенна была жестко закреплена на обделку тоннеля, а оператор находился рядом с прибором. При обработке данных ЭМИ оценивалось количество импульсов и их распределение по частоте следования, амплитуда, длительность и форма сигналов. Основой для последующей визуализации сигналов ЭМИ выбран алгоритм быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье — быстрое преобразование Фурье.

Материалы исследований. Известно, что практически все аварии, связанные с проявлениями геодинамической активности, совершались на объектах, которые размещались на “живых” разломах при взаимных перемещениях смежных блоков. Опыт строительства тоннелей также показал, что аварии в виде прорыва водно-грунтовых масс случались при проходке зон разломов. В период эксплуатации в зонах активных разломов аварии могут возникать под влиянием накопления остаточных деформаций или импульсных короткопериодных движений массивов горных пород различной частоты и интенсивности, в том числе от местных землетрясений, взрывов и часто повторяющихся нагрузок типа вибрационных.

В связи с этим одним из условий обеспечения геодинамической безопасности любого наземного или подземного объекта является своевременное обнаружение и определение уровня деформационного воздействия на данный объект и сравнение этого воздействия с нормативным (пороговым) значением его деформационной устойчивости. В настоящее время для исследования геодинамической активности по трассе тоннелей “Адлер–Красная Поляна” применяются геодезические, геомеханические и геофизические методы. По комплексу данных таких исследований устанавливаются и отслеживаются накопления остаточных деформаций (от 10^{-5} – 10^{-6} отн. ед.) в обделках тоннелей за счет:

— сезонных изменений напряжений в основном из-за годовых колебаний температуры в обделке тоннеля, которые в среднем составляют $+5 \div +6$ °С. На рис. 2 в качестве примера приведены временные изменения напряжений за период наблюдений с 13.05.2013 по 12.02.2019, где четко прослеживаются сезонные изменения напряжений и тренд (порядка 0.3 МПа/год).

— суточных изменений напряжений. Тренда по суточным изменениям напряжений в обделке не наблюдается, поэтому необходимы более длительные периоды наблюдений типа сезонных и многолетних.

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

Если первые два явления в настоящее время хорошо известны, то исследования короткопериодных деформаций в подземных выработках начаты относительно недавно.

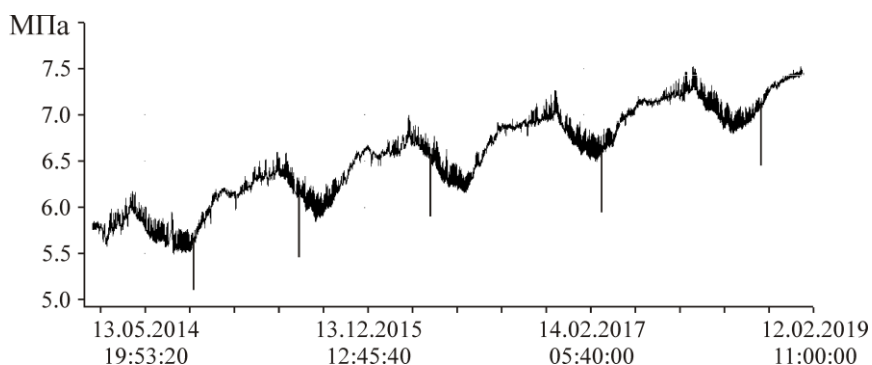


Рис. 2. Изменения напряжений на внутреннем контуре обделки железнодорожного тоннеля № 1 на пикете 148 + 40 трассы “Адлер–Красная Поляна” за время эксплуатации

Известны исследования по мониторингу короткопериодных деформаций в шахте, которые проводили сотрудники Института горного дела Уральского отделения РАН [4]. Ими получены данные о динамических формах движения в зонах тектонических нарушений, которые вызывают знакопеременные деформации и сдвиги. Установлено также, что тектонические нарушения даже невысокого ранга обладают достаточной подвижностью, которая имеет трендовый характер и к тому же наблюдаются динамические колебания различной природы. С ними связаны циклические (короткопериодные) нагрузки, которые в случае расположения подземной

выработки на активном тектоническом нарушении вызывают в нем остаточные деформации в результате усталостных эффектов. Опыт исследований НДС горных пород и обделок на различных железнодорожных тоннелях показывает, что на локальных участках наблюдаются деформационные процессы, которые представляют опасность разрушения крепи и обделки в зонах разломов при повторных воздействиях и накоплениях остаточных деформаций [5].

Для изучения процессов накопления остаточных деформаций от повторяющихся импульсных короткопериодных воздействий сотрудниками «НИПИИ «Ленметрогипротранс» начаты исследования вибрационных (сейсмических) нагрузок от проезжающих по тоннелю электропоездов с использованием метода регистрации ЭМИ. При движении электропоезд создает вибрации, которые передаются массиву горных пород. Одновременно, так как он движется на электрической тяге и в нем находятся различные источники электромагнитных излучений техногенной природы, в окружающее пространство излучается электромагнитная энергия, которая для метода регистрации ЭМИ является помехой.

Транспорт на электрической тяге (электропоезда, троллейбусы, трамваи) является относительно мощным источником электромагнитного излучения в диапазоне частот от 0–1000 Гц [6]. Естественно, как и любая другая электроустановка, электропоезд в движении порождает гармоники на более высоких частотах вследствие нелинейных нагрузок и наличия возмущений в сети электроснабжения. Плотность потока магнитной индукции в пригородных электропоездах составляет до 75 мкТл, среднее значение — 20 мкТл. Вместе с тем механические вибрации в системе «обделка тоннеля – массив горных пород» вызывают генерирование электромагнитных импульсов микротрещинами на частотах в десятки килогерц и эти колебания передаются на приемные антенны регистратора ЭМИ при проезде электропоезда практически одновременно с помехами. Существует проблема учета помех при анализе и интерпретации данных ЭМИ, особенно на частотах до 10 кГц.

Анализ результатов исследований. По данным исследований в транспортных тоннелях и подземных выработках установлено, что на спектрах ЭМИ наблюдаются устойчивые максимумы на частотах порядка 20, 40, 60, 80 кГц, которые связаны именно с излучениями от механоэлектромагнитных источников во вновь образующихся микротрещинах и «прорастании» существующих [7, 8]. Специальные эксперименты с образцами в лабораторных условиях показали, что при диагностике разрушения образцов действительно регистрировались ЭМИ на частотах 10, 40, 60 кГц и более [9, 10].

На акселерограммах (рис. 3) и их спектрограммах четко выражено воздействие от проезда электропоезда на обделку в виде локального изменения во времени амплитуд ускорений колебаний. При скорости движения порядка 100 км/ч и общей длине состава из 6 вагонов ~126 м время проезда электропоезда мимо пункта наблюдений (сейсмостанции) составляет около 5 с.

Оценка энергии сейсмических колебаний E в обделке при проезде электропоезда по формуле Б.Б. Голицына

$$E = \pi^2 \rho v \left(\frac{\alpha}{T} \right)^2,$$

где ρ — плотность среды; v — скорость распространения сейсмической волны; α — амплитуда смещения; T — период колебаний. При $\rho = 2500$ кг/м³, $v = 4000$ м/с, $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ м на частоте 100 Гц ($T = 0.01$ с) дает величину порядка 400 Дж. Это небольшая энергия сейсмических колебаний от проезда электропоезда, регистрируемая системой сейсмомониторинга, которая сравнима по величине с энергией очень слабого землетрясения энергетического класса $K \approx 3$ ($K = \lg E$) с сейсмическим эффектом меньше одного балла.

Максимальная амплитуда ускорений колебаний $0.02g$ по компоненте Z приходится на частоты $5–180$ Гц и по времени совпадает с проездом электропоезда. Оказалось, что несмотря на относительно высокие скорости движения (до 100 км/ч) по пути с рельсами без стыков, зарегистрированный уровень максимальных амплитуд и выполненная оценка энергии сейсмического воздействия указывают на отсутствие высоких динамических нагрузок на систему “обделка тоннеля – массив горных пород”.

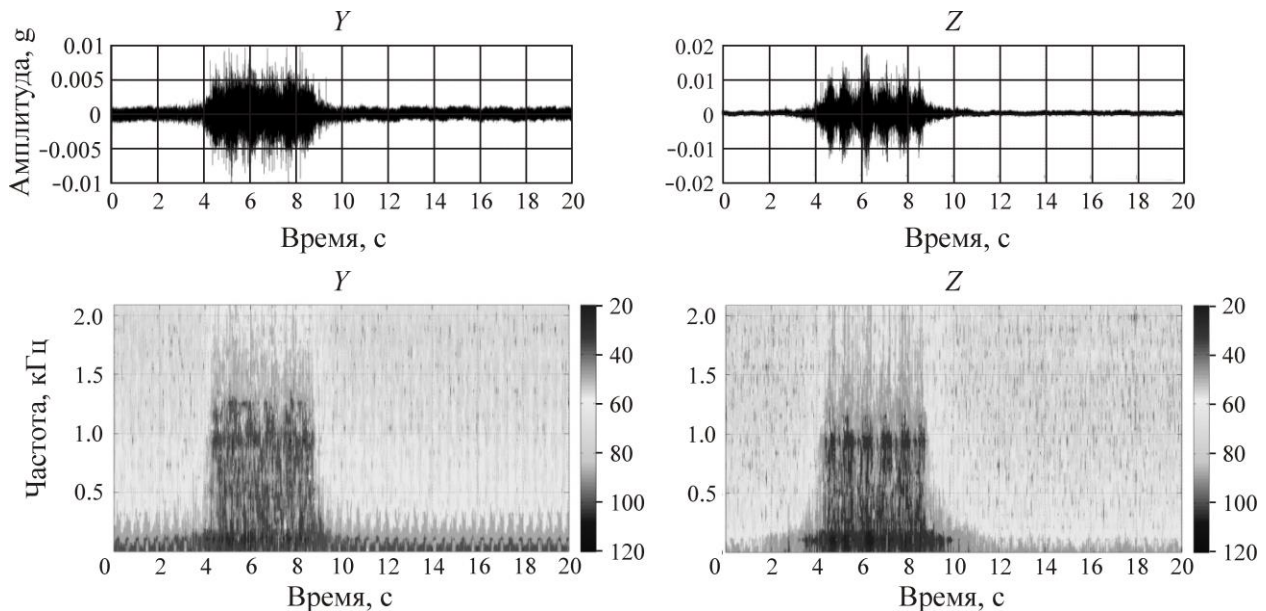


Рис. 3. Акселерограммы и их спектрограммы при проезде электрички в 21:52 московского времени 10.09.2018 г. на ПК 171+50 в железнодорожном тоннеле № 1 трассы Адлер – Красная Поляна. Компонента X колебания — по оси тоннеля; Y — поперек и Z — вертикально

Сейсмические нагрузки от проездов электропоездов пока не оказывают существенного влияния на тоннельные конструкции в случае разовых, ограниченных по времени и энергии воздействий, так как смещения частиц в бетоне обделки, где установлены акселерометры, невелики и составляют первые десятки микрон. Однако при длительно повторяющихся воздействиях от техногенных вибраций, местных землетрясений и взрывов в конструкциях обделок могут накапливаться усталостные деформации, которые в сочетании с сезонными температурными деформациями, тектоническими движениями и сейсмическими колебаниями при землетрясениях и взрывах могут привести к повреждениям и разрушениям обделок в тоннелях.

Любые воздействия можно классифицировать следующим образом:

- сильное — существенно изменяет структуру, состояние объекта и они становятся критическими для него;
- нормальное (умеренное) — не изменяет систему при одноразовом кратком воздействии, но при постоянном и долговременном (в том числе циклическом, знакопеременном) за счет накопления усталости изменения структуры и состояния могут достигать критических значений;
- слабое — нет изменений (не фиксируются измерительной аппаратурой).

По данным исследований [11] вибрации оказывают влияние на процесс рассеяния упругой энергии на всех этапах деформирования горных пород, что отражается на характеристиках акустической эмиссии, особенно вблизи предельных нагрузок и в запредельной области деформирования. Очевидно, что и характеристики ЭМИ будут реагировать на такие вибрации, что подтверждают результаты геотехнического мониторинга по регистрации ЭМИ при проезде поездов в тоннелях на участках с различными инженерно-геологическими условиями и НДС в системе “обделка тоннеля – массив горных пород”.

С целью изучения влияния короткопериодных знакопеременных повторяющихся воздействий нормальной (умеренной) интенсивности на НДС тоннеля начаты опытные работы по регистрации сигналов ЭМИ при проезде электропоездов специально созданной в научно-исследовательском отделе ОАО “НИПИИ “Ленметрогипротранс” аппаратурой “ЭМИ-3К”, действующий в диапазоне частот до 150 кГц.

В настоящее время можно обсуждать только предварительные результаты начатых исследований. Необходимо обратить внимание на то, что длительность проявления ЭМИ на спектрограммах при проезде электропоездов составляет порядка 20–30 мин, а самого максимума ~ 1–2 мин. В то же время длительность сейсмических (механических) колебаний при проезде того же электропоезда составляет всего ~ 5 с. Большая разница времен проявления одного и того же источника в сейсмическом и электромагнитном полях может быть связана с резонансным возбуждением электромагнитного отклика в системе “обделка тоннеля–массив горных пород” за счет механоэлектромагнитных преобразований в неоднородной среде с трещинами и наличием сред с разными электрофизическими свойствами (рис. 4).

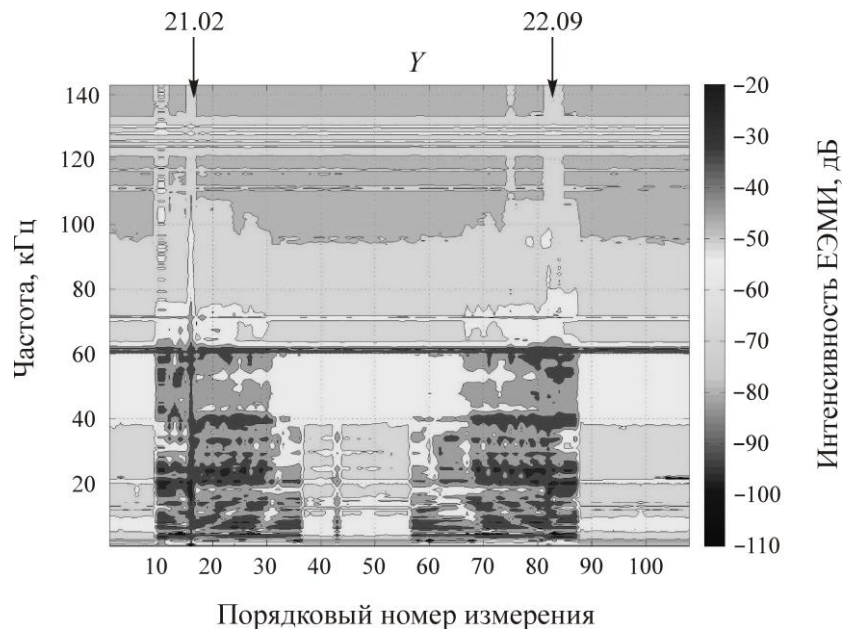


Рис. 4. Спектрограммы ЭМИ при проезде электропоездов на пикете 169+80 по тоннелю № 1 трассы “Адлер–Красная Поляна” 27.08.2019. Время наблюдений с 20.48 до 22.35. Первый проезд с юга ПК 169+80 в 21.02-03, второй — с севера в 22.09-10. Компонента Y

Время возрастания ЭМИ перед его максимумом при проезде пункта наблюдения составляло ~ 16–25 мин при движении поезда на спуске, а при подъеме “в гору” — ~ 3–6 мин. Затухание ЭМИ происходит быстрее при спуске всего ~ 5–6 мин, а при движении “в гору” оно существенно длительнее ~ 20 мин. Вероятно, эти особенности поведения ЭМИ связаны с разными режимами возбуждения его источников в системе “обделка тоннеля–массив горных пород” при движении поезда “в гору” и на спуске, что требует специального изучения.

Интенсивность ЭМИ определяется явлениями резонанса при совпадении частот колебаний от проходящих поездов с собственными частотами системы “обделка тоннеля–массив горных пород”. Наибольшая интенсивность ЭМИ в тоннеле фиксируется по компонентам Y и Z на частотах от 5 до 60 кГц. Отмечаются максимумы ЭМИ также на частоте 20 кГц и ниже. Частоты порядка 60 кГц характерны для процессов трещинообразования в бетонах, а смещение максимума ЭМИ в сторону низких частот указывает на снижение прочности бетона.

ВЫВОДЫ

Электромагнитный отклик на вибросейсмические воздействия от проезда электропоездов является реакцией происходящих на микроуровне деформационных процессов смещения заряженных частиц при образовании и развитии микротрещин в конструкции обделки и примыкающем к ней массиве горных пород. Эти механоэлектромагнитные преобразования носят резонансный характер, что позволяет отслеживать изменения основных амплитудно-частотных характеристик процесса деформирования в системе “обделка тоннеля – массив горных пород” в процессе геотехнического мониторинга с самых ранних стадий изменения напряженно-деформированного состояния. По положению частот максимумов спектров и их амплитудному уровню можно судить об интенсивности процессов деформирования обделок и горных пород. Вклад техногенных и геодеформационных короткопериодных знакопеременных деформаций от вибрационных воздействий при движении поездов в накопление общих остаточных деформаций в обделках тоннелей можно выявлять и оценивать с помощью спектрограмм ускорений сейсмических колебаний и ЭМИ, рассчитанным по данным повторных долговременных измерений.

Опасные проявления напряженно-деформированного состояния в системе “обделка тоннеля – массив горных пород” под влиянием резонансных колебаний от техногенных и природных нагрузок могут возникать в любой части тоннеля. Поэтому для их своевременного обнаружения в дополнение к стационарным пунктам системы геотехнического мониторинга необходимо использовать экспресс-регистрацию аномалий электромагнитного излучения вдоль всего тоннеля с шагом 5 – 10 м не менее 1 – 2 раза в год, а также после ощутимых землетрясений.

Полученные результаты показали перспективность проведенных исследований. Работы в данном направлении продолжаются. Одной из наиболее важных задач является сбор данных для совершенствования системы геотехнического мониторинга и решения задач обеспечения безопасности движения по тоннелям в условиях высокой сейсмической опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Bespalko A. A., Yavorovich L. V., and Fedotov P. I.** Relationship of the parameters of electromagnetic signals with the electrical characteristics of rocks under acoustic and quasi-static effects, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 7, pp. 18–23. (in Russian) [**Беспалько А. А., Яворович Л. В., Федотов П. И.** Связь параметров электромагнитных сигналов с электрическими характеристиками горных пород при акустическом и квазистатическом воздействиях // *Известия ТПУ*. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 18–23.]
2. **Dyakov V. P. and Troyanov A. K.** Voices of the Earth's interior. *Science in Russia*, 1998, no. 3, pp. 10–14. (in Russian) [**Дьяконов В. П., Троянов А. К.** Голоса земных недр. *Наука в России* — 1998. — № 3. — С. 10–14.]
3. **Sashurin A. D., Ruchkin V. I., Panzhin A. A., and Dubovik V. V.** 1998. Monitoring of the stress-strain state of the upper part of the Earth's crust at the Saranovskaya-Rudnaya mine, *Problems of geotechnology and subsoil science (Melnikov readings), Reports of the International Conference*, Yekaterinburg, 1998, pp. 192–198. (in Russian) [**Сашурин А. Д., Ручкин В. И., Панжин А. А., Дубовик В. В.**, Мониторинг напряженно-деформированного состояния верхней части земной коры на шахте Сарановская-Рудная // *Проблемы геотехнологии и недроведения (Мельниковские чтения): доклады Междунар. конф.* — Екатеринбург, 1998. — С. 192–198.]
4. **Basov A. D.** Residual deformations and seismic hazard of fault zones in mining conditions, *Problems of Engineering Seismology*, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 34–47. (in Russian) [**Басов А. Д.** Остаточные деформации и сейсмическая опасность зон разломов в условиях подземных выработок // *Вопросы инженерной сейсмологии*. — 2010. — Т. 37. — № 2. — С. 34–47.]

5. **Malkov N. A. and Pudovkin A. P.** Compatibility of radio-electronic means, Teaching Aid, Tambov, Publishing house of Tambov State University, 2007, 88 pp. (in Russian) [**Малков Н. А., Пудовкин А. П.** Совместимость радиоэлектронных средств / учеб. пособие. — Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007. — 88 с.]
6. **Basov A. D., Romanevich K. V., Shlyayev S. A., and Andrianov S. V.** Reflection of technogenic and geodeformational effects on spectrograms of electromagnetic radiation, Physical foundations of predicting the destruction of rocks, Abstracts of the All-Russian School-Seminar with international participation, Perm, 2019, pp. 7–8. (in Russian) [**Басов А. Д., Романевич К. В., Шляев С. А., Андрианов С. В.** Отражение техногенных и геодеформационных воздействий на спектрограммах электромагнитного излучения // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: тезисы докладов Всерос. школы-семинара с междунар. участием. — Пермь, 2019. — С. 7–8.]
7. **Bespalko A. A., Surzhikov A. P., and Yavorovich L. V.** Research of mechanoelectric transformations in rocks under dynamic influences, Tsvetnye Metally, 2006, no. 4, pp. 32–34. (in Russian) [**Беспалько А. А., Суржиков А. П., Яворович Л. В.** Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах при динамических воздействиях // Цветные металлы. — 2006. — № 4. — С. 32–34.]
8. **Yavorovich L. V.** The relationship of the parameters of electromagnetic signals with a change in the stress-strain state of rocks, Thesis of Cand. Tech. Sci., Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2005. (in Russian) [**Яворович Л. В.** Взаимосвязь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород: дис. ... канд. техн. наук. — Томск: ТПУ, 2005.]
9. **Pyichev P. V. and Manzhikov B. T.** Acoustic emission during relaxation of rocks in a weak vibration field before and beyond the ultimate strength, Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University, 2011, vol. 11, no. 4, pp. 72–85. (in Russian) [**Ильичев П. В., Манжиков Б. Т.** Акустическая эмиссия при релаксации горных пород в слабом вибрационном поле до и за пределом прочности // Вестник КРСУ. — 2011. — Т. 11. — № 4. — С. 72–85.]