

ОЦЕНКА ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ МЕТРОПОЛИТЕНА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

УДК 624.195:550.370

ЛЕБЕДЕВ М.О.

ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, Россия, lebedev-lmgt@yandex.ru

РОМАНЕВИЧ К.В.

ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, Россия, kirillromanevich@gmail.com

БАСОВ А.Д.

ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, Россия, a.basov2011@yandex.ru



АННОТАЦИЯ

Одним из основных источников техногенного риска для сооружений метрополитена являются негативные последствия освоения подземного пространства города. Строительство новых подземных, а также наземных сооружений оказывает влияние на действующие тоннели. Это влияние зависит от взаимного расположения объектов и от способов производства строительного-монтажных работ. В связи с этим подчеркивается необходимость проведения комплексной оценки взаимного влияния зданий и сооружений при осуществлении нового строительства, при реконструкции, демонтажах и капитальных ремонтах. Рассматриваются пути осуществления такой оценки — предварительные геотехнические расчеты, контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) обделок подземных сооружений в составе геотехнического мониторинга, а также развитие других перспективных методов. В качестве основного метода, позволяющего оценить взаимное влияние подземных сооружений при их строительстве и эксплуатации, приводится метод контроля НДС конструкций прямыми геомеханическими наблюдениями в составе геотехнического мониторинга. Приводятся некоторые результаты натурных исследований НДС при строительстве станции пилонного типа «Проспект Славы» Санкт-Петербургского метрополитена. В качестве перспективных методов для решения задач геотехнического мониторинга сооружений метрополитена и других подземных сооружений при их эксплуатации рассматриваются основные инженерно-геофизические методы, среди которых как наиболее оперативные выделяются контактные и бесконтактные эмиссионные методы инженерной геофизики, обсуждаются результаты обработки и визуализации данных. Приводится анализ причин снижения эксплуатационной надежности подземных сооружений метрополитена, а также примеры дефектов и повреждений элементов конструкций, вызванных взаимным влиянием искусственных сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге. Дается геомеханическое обоснование применения эмиссионных методов для обнаружения и локализации участков смещения грунтов и трещинообразования в конструкциях и вмещающих породах на ранних стадиях при изменениях напряженного состояния массива в зонах опорного давления с целью оценки взаимного влияния подземных сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Взаимное влияние; подземные сооружения метрополитена; напряженно-деформированное состояние; опорное давление; эмиссионные методы

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Лебедев, М.О., Романевич, К.В., Басов, А.Д., 2018. Оценка взаимного влияния подземных сооружений метрополитена при строительстве и эксплуатации. Геотехника, Том X, № 1-2, с. 82-92.

Лебедев М.О., Романевич К.В., Басов А.Д., 2018

MUTUAL INFLUENCE OF UNDERGROUND METRO FACILITIES ASSESSMENT DURING CONSTRUCTION AND OPERATION

LEBEDEV M.O.

NIPII Lenmetrogiprotrans JSC, Saint-Petersburg, Russia, lebedev-lmgt@yandex.ru

ROMANEVICH K.V.

NIPII Lenmetrogiprotrans JSC, Saint-Petersburg, Russia, kirillromanevich@gmail.com

BASOV A.D.

NIPII Lenmetrogiprotrans JSC, Saint-Petersburg, Russia, a.basov2011@yandex.ru

ABSTRACT

One of the main sources of technogenic risk for metro facilities is the negative impact of the underground space development. The construction of new underground and surface structures affects the tunnels which are in use. The impact depends on the relative location of these objects and on the construction methods. In this regard we highlight the necessity of comprehensive assessment of mutual influence by different level located facilities during construction, reconstruction, dismantling and major repairs. The article considers the ways of implementing such an assessment: preliminary geotechnical calculations, control of the stress-strain state (SSS) of underground structures in geotechnical monitoring mode and development of promising methods. The method for controlling SSS of structures by direct geomechanical observations as a part of geotechnical monitoring is given as the main method for assessing the mutual influence of underground structures during their construction and operation. The article gives some results of field observations of SSS research during construction of the pylon type station complex "Prospect Slavy" in Saint-Petersburg. The main engineering-geophysical methods are considered in their operation as the most promising methods for solving geotechnical tasks for metro facilities and other underground structures. Among them the contact and non-contact emission techniques of engineering geophysics are identified as the most operational. The results of data processing and visualization are discussed. The article gives the analysis of the reasons for the decrease in the underground metro facilities operational reliability, as well as examples of defects and damage to structural elements, caused by the mutual influence of underground facilities. The article gives geomechanical base for application of emission techniques for detection and localization of soil displacement and fracturing areas at early stages with changes in the stressed state of the massif in the abutment pressure zones in order to assess the mutual influence of underground structures.

KEY WORDS

Mutual influence; underground metro facilities; stress-strain state; abutment pressure; emission methods

FOR CITATION:

Lebedev, M.O., Romanevich, K.V., Basov, A.D., 2018. Mutual influence of underground metro facilities assessment during construction and operation. *Geotechnics*, Vol. X, No. 1-2, pp. 82-92.

Введение

В период эксплуатации все подземные сооружения испытывают существенное воздействие техногенных факторов хозяйственной деятельности мегаполиса и природно-техногенных факторов, обусловленных геологическими, гидрогеологическими, геотехническими и другими условиями. Далеко не единственным, но одним из главных источников техногенного риска при сохранении эксплуатационной надежности существующих подземных и наземных объектов в Санкт-Петербурге является негативное влияние развития подземного пространства города без надлежащего геотехнического обоснования. В первую очередь вопрос обеспечения эксплуа-

тационной надежности относится к искусственным сооружениям метрополитена — по ним ежедневно перемещается большое количество пассажиров, и аварийные ситуации недопустимы. Дальнейшее развитие метрополитена в Санкт-Петербурге потребует значительных объемов строительства вблизи уже действующих подземных объектов, так как в первую очередь развитие сети метрополитена и ее «сгущение» ведет к увеличению количества пересадочных узлов, обслуживающих сначала две, затем три, четыре, а иногда более линий [6]. Так на проектируемой «Кольцевой» линии Петербургского метрополитена большинство станций будут пересадочными¹.

¹ Петербургский метрополитен: от идеи до воплощения. Альбом-каталог, 2005. ГМИСПб, СПб.

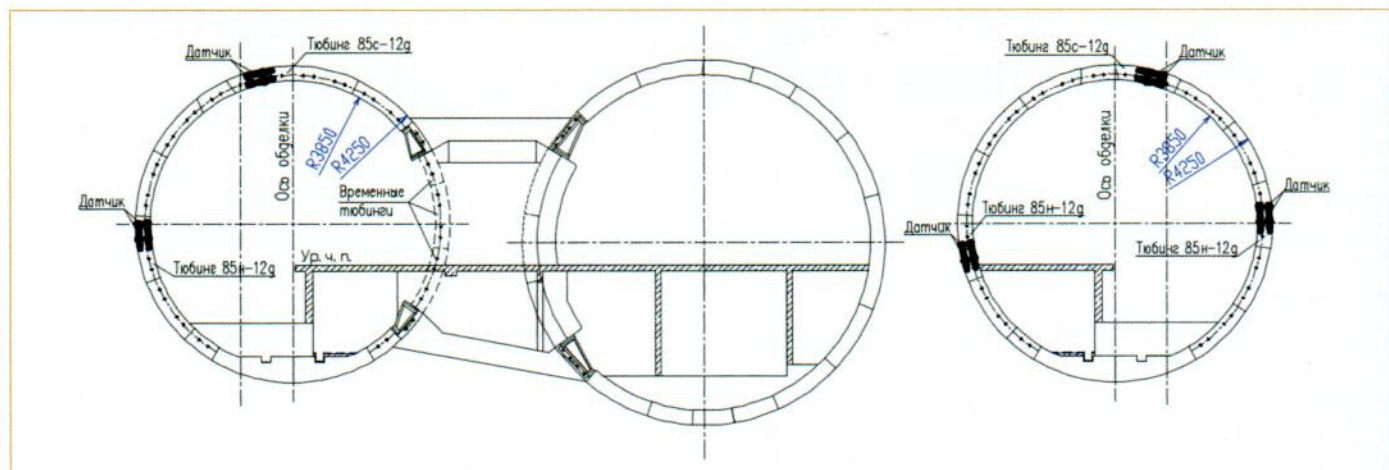


Рис. 1. Обделка станционного комплекса «Прспект Славы» пилонного типа, оснащенная струнными датчиками, Санкт-Петербург

Из опыта строительства и эксплуатации метрополитенов известно, что степень влияния строительства подземного объекта на действующие тоннели метрополитена зависит как от взаимного расположения подземного объекта и существующих тоннелей метрополитена, так и от способов производства работ при возведении подземного объекта [3]. В полной мере это относится и к влиянию строительства подземных и наземных объектов в охранных зонах метрополитена на эксплуатируемые подземные сооружения в Санкт-Петербурге [17]. Исходя из имеющегося опыта, возведение крупных объектов в технических зонах сооружений метрополитена не может не иметь негативных последствий [5]. В связи с этим при осуществлении нового строительства, а также при реконструкции, демонтажах и капитальных ремонтах подземных, наземных и наземно-подземных объектов, вблизи эксплуатируемых сооружений метрополитена во избежание ухудшения их технического состояния должна проводиться оценка взаимного влияния.

Предварительно такая оценка должна осуществляться посредством геотехнических расчетов с использованием как аналитических, так и численных методов с построением плоских и объемных конечно-элементных моделей вмещающего грунтового массива с существующими и вновь возводимыми (реконструируемыми или демонтируемыми) сооружениями с учётом этапности производства строительного-монтажных работ. На основании геотехнических расчетов должны определяться границы зоны влияния строительства, вычисляться количественные характеристики влияния (дополнительные величины напряженно-деформированного состояния от основания проектируемого сооружения до существующих подземных сооружений).

В пределах зоны влияния должен выполняться геотехнический мониторинг, причем в комплекс работ должны быть включены как методы контроля состояния строительных конструкций сооружения, так и методы контроля состояния вмещающего грунтового массива. В соответствии с Федеральным законом № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент

о безопасности зданий и сооружений» безопасность зданий и сооружений в процессе эксплуатации должна обеспечиваться, в частности, посредством периодических осмотров и контрольных проверок и (или) мониторинга состояния основания и строительных конструкций.

В случае неблагоприятного прогноза и выявления недопустимых величин деформаций и запасов прочности конструкций ведется корректировка проектных решений и разработка мероприятий по обеспечению сохранности и безопасной эксплуатации объекта [9].

Геотехнический мониторинг подземных сооружений

Основным методом, позволяющим оценить взаимное влияние подземных сооружений при их строительстве и эксплуатации, является метод контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций прямыми геомеханическими наблюдениями в составе геотехнического мониторинга. Контроль НДС конструкций подземных сооружений осуществляется с использованием различного типа контрольно-измерительной аппаратуры для определения величин местных деформаций (относительных деформаций), определения смещений внутреннего контура, определения усилий в строительных конструкциях сооружения, контроля состояния существующих и вновь возникающих трещин, деформационных швов и швов между конструктивными элементами строительных конструкций. Дополнительные усилия в строительных конструкциях сооружений метрополитена, являются суммарными от горного давления, температурных воздействий, гидростатического давления и воздействия других подземных сооружений и зданий на поверхности, а также вибродинамических воздействий от подвижного состава.

Наиболее сложными подземными сооружениями метрополитенов, с точки зрения перераспределения НДС обделок в процессе строительства, являются станционные комплексы. При поэтапной проходке станционных тоннелей и постепенном раскрытии станции на полное сечение нормальные и тан-



Рис. 2. Формирование напряженно-деформированного состояния в стенках тоннеля в пределах пилона

генциальные напряжения в обделке, по результатам численного моделирования, изменяются в два раза и более [4], появляются растягивающие напряжения.

Определить достоверность такого прогноза позволяют только результаты натурных исследований НДС. Так, при строительстве станции пилонного типа «Проспект Славы» Санкт-Петербургского метрополитена (рис. 1), обделка боковых станционных тоннелей была оснащена струнными датчиками, которые размещались на внутреннем и внешнем контуре сборной обделки из железобетонных тубингов. Кольца с тубингами, в которых были установлены датчики, располагались как по оси будущих проемов, так и в пределах пилонов. Станция расположена в плотных аргиллитоподобных котлинских глинах твердой консистенции с коэффициентом крепости по Протодьяконову $f = 1,5$.

Результаты исследований показали, что поочередная переборка боковых станционных тоннелей с пилот-тоннелей диаметром 5,5 до сечения 8,5 метров не оказали влияния друг на друга. При раскрытии проемов между станционными тоннелями приращение усилий в обделке боковых тоннелей в пределах пилона на расстоянии трех метров от края проема составило 35–40% (рис. 2). А в кольцах, попадающих на ось проема, приращение НДС не превысило 10%. Результаты натурных исследований показали значительную разницу в качественном изменении НДС боковых станционных тоннелей по сравнению с результатами численного моделирования [4]

даже с учетом различного материала обделки (при моделировании рассматривалась обделка из чугунных тубингов).

Эмиссионные методы инженерной геофизики

В состав работ по обследованию грунтов и конструкций подземных сооружений на основании требований ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» и СП 11-105-97 «Часть VI. Правила производства геофизических исследований» включаются методы инженерной геофизики. Основными инженерно-геофизическими методами для решения задач геотехнического мониторинга сооружений метрополитена и других подземных сооружений при их эксплуатации являются модификации инженерной сейсморазведки, электро-разведки, георадиолокации и термометрии, а также методы геофизического исследования скважин. Большинство методов является достаточно апробированными и позволяет определять контролируемые параметры с большой точностью. В то же время они требуют значительного времени для подготовки и, собственно, проведения измерений — размотки кос, подключения оборудования к удаленным источникам питания, заземления электродов, установки датчиков и др., а также при камеральной обработке и анализе результатов. В связи с этим снижается их производительность.

Наиболее оперативными методами инженерной геофизики являются эмиссионные методы, такие как контактный метод

акустической эмиссии (АЭ) и бесконтактный метод естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ). Указанные методы могут применяться для обнаружения и локализации участков смещения грунтов и трещинообразования на ранних стадиях их подготовки при изменениях напряженного состояния массива по СП 11-105-97 «Часть VI. Правила производства геофизических исследований», в том числе в геологических условиях Санкт-Петербурга [12]. Для решения задачи оценки взаимного влияния подземных сооружений эмиссионные методы инженерной геофизики представляются наиболее перспективными.

Опыт использования бесконтактных эмиссионных методов инженерной геофизики свидетельствует о возможностях оперативного выполнения инструментальной диагностики тоннелей и вмещающих их грунтов со скоростью до 1–2 км в сутки, включая время на обработку и анализ результатов. Применять эмиссионные методы инженерной геофизики необходимо как первичные — для обнаружения и локализации наиболее проблемных областей (по градиентам НДС) с целью выполнения в дальнейшем комплексных обследований, а при необходимости геотехнического мониторинга.

Недостатком бесконтактных эмиссионных методов является влияние на данные, получаемые в ходе измерений высокого уровня помех в действующих и строящихся сооружениях, которые, впрочем, в большинстве случаев поддаются учёту и фильтрации при измерениях и интерпретации результатов [13]. Кроме этого, в настоящее время нет единой методики обработки и интерпретации данных эмиссионных методов, и приведенные методы геофизики до сих пор находятся в стадии развития. Большинство исследователей при обработке эмиссионных данных использует методы спектральной обработки в различных вариантах. Нами при предварительной обработке данных, полученных эмиссионными методами, используется алгоритм быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье — быстрое преобразование Фурье (БПФ).

Целесообразность применения эмиссионных методов для контроля и разработки прогнозных критериев состояния вмещающих породных массивов и конструкций подземных сооружений подтверждается помимо натурных исследований, результатами лабораторных экспериментов по механоэлектромагнитным преобразованиям на образцах различных горных пород [8, 19]. В ходе таких экспериментов получены характерные виды спектров излучения для каждой из стадий напряженно-деформированного состояния, начиная от стадии упругого деформирования и заканчивая стадией разрушения образца. При регистрации ЕЭМИ в условиях проходки выработок в различных инженерно-геологических условиях горным способом (т.е. без применения механизированных проходческих щитов, а, следовательно, с минимальным уровнем промышленных помех) фиксируются аналогичные сигналы. Они, как и сигналы, получаемые при лабораторных экспериментах на образцах горных пород, различаются по количеству отдельных импульсов за фиксированный интервал времени,

частотам, амплитуде, длительности и форме, что связывается с разными видами и стадиями деформирования структурно-неоднородного массива горных пород [14].

Контролируемые характеристики сигналов (амплитуда, частота, количество импульсов, их форма и т.д.) варьируются в зависимости от горно-геологических, геотехнических и других условий, а также режимов эксплуатации и строительства подземных сооружений, и на данный момент эти данные никак не систематизированы. Нами предприняты попытки такой систематизации, в частности, при разработке критериев и методики идентификации геодинамической активности по электромагнитному излучению вблизи выработок неглубокого заложения. В ходе проведения многоразовых наблюдений в режиме мониторинга устанавливаются отклонения НДС по амплитудным уровням спектров сигналов ЕЭМИ, а количественная оценка становится возможной при наличии на профилях наблюдений станций контроля НДС с помощью специальных датчиков-деформометров. Взаимная увязка данных регистрации вариаций ЕЭМИ и напряженного состояния используется в проводимых нами исследованиях в различных условиях.

Являясь эффективным техническим средством неразрушающего контроля, эмиссионные методы способны регистрировать и отображать даже незначительные изменения напряженно-деформированного состояния как конструкций, так и вмещающего грунтового массива при строительстве и последующей эксплуатации подземных сооружений.

Геомеханическое обоснование применения эмиссионных методов

Из основ механики горных пород известно, что проходка горных выработок вызывает изменение естественного (природного) поля напряжений массива горных пород. В общем случае характер образующегося поля напряжений вокруг выработок зависит от совокупного действия многих взаимосвязанных факторов: пространственно-геометрических параметров выработок, деформационных характеристик пород, особенностей естественного поля напряжений в нетронutom массиве и характеристик воздействий на породы вокруг выработки в процессе проходки и дальнейшей эксплуатации. Процессы изменения естественного поля напряжений происходят в области массива, называемой зоной влияния горной выработки, причем нередко этой зоной может являться вся толща вышележащих пород вплоть до дневной поверхности и значительные области массива со стороны подошвы выработки. С точки зрения напряжений в массиве пород вокруг выработки выделяют две характерные зоны: зону разгрузки, как область, в которой породы испытывают меньшие напряжения, чем существовавшие до проведения выработки, и зону опорного давления, как область, в которой напряжения превышают уровень первоначального поля напряжения, и являющуюся зоной концентрации напряжений вокруг выработки. В процессе проходки подземных выработок вмещающий массив по-

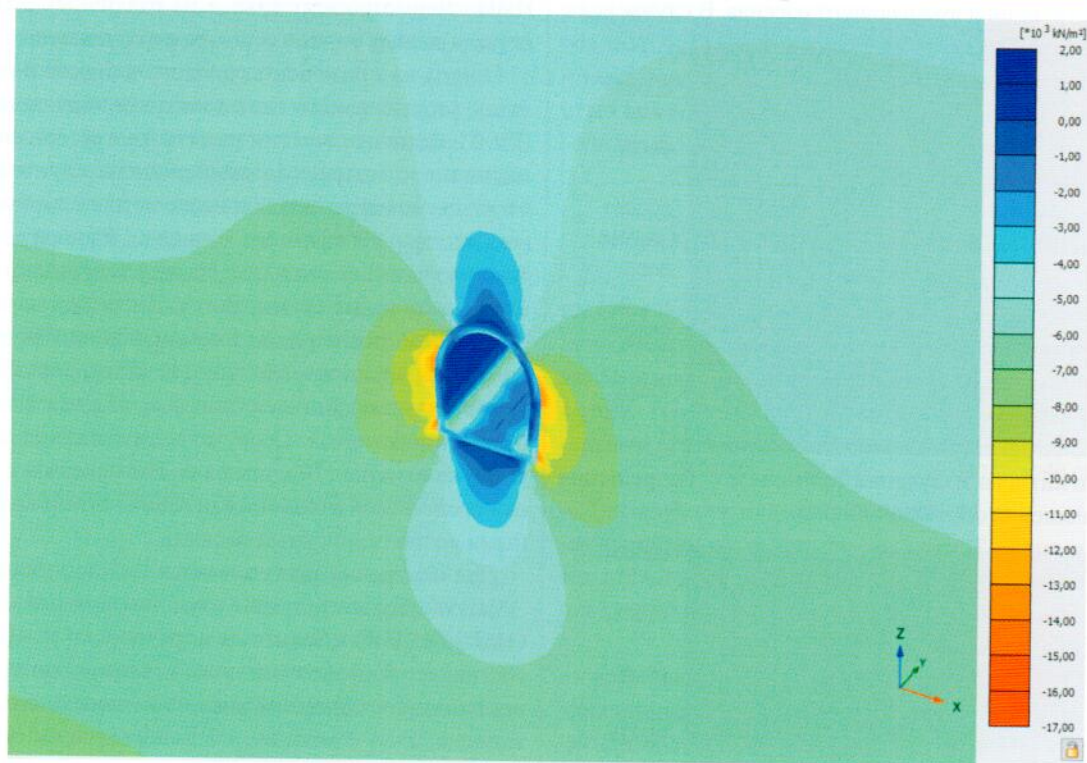


Рис. 3. Визуализация формирования зон опорного давления, вокруг одиночной выработки в программе Plaxis

переменно может оказываться в зоне концентрации напряжений или в зоне разгрузки [16].

Зоны разгрузки и зоны опорного давления вокруг одиночной выработки успешно рассчитываются и визуализируются программными системами конечно-элементного анализа, используемыми для решения задач инженерной геотехники и проектирования (рис. 3). Расчеты методом конечных элементов могут быть выполнены для системы выработок и для поэтапного строительства и экскавации грунтов, однако учесть все особенности вмещающего грунтового массива и технологии ведения работ, а также варианты развития деформационных процессов крайне сложно. Зачастую распределение напряжений вблизи сооружения не соответствует действительности из-за некорректного деления модели на конечные элементы, неоднородности вмещающего грунтового массива и естественного поля напряжений, трещиноватости, большого диапазона деформационно-прочностных свойств грунтового массива, некорректного выбора модели поведения грунта и по ряду технологических причин. Прогноз НДС в таких случаях для оптимистичного и пессимистического вариантов может отличаться в разы [9]. Более точными результаты численных методов прогноза НДС становятся только в том случае, когда имеется возможность выполнить верификацию расчетов на объекте-аналоге, при наличии результатов натурных исследований.

К сожалению, в связи с широким внедрением численных методов прогноза НДС системы «обделка — вмещающий массив» все реже применяются аналитические методы расчета, которые даже при наличии большого количества взаимовлияющих выработок позволяют решать задачи по определению усилий в конструкциях обделок [15, 18]. Реализованные в компьютерных программах эти методы дают возможность быстро выполнить многовариантные расчеты и определить оптимальное расположение новых выработок.

В то же время фиксация пространственного расположения зон разгрузки и зон опорного давления успешно выполняется в режиме реального времени при измерениях непосредственно в горных выработках с помощью эмиссионных методов инженерной геофизики. Также может быть осуществлен контроль изменения состояния грунтов и перехода областей вмещающего грунтового массива из одной зоны в другую посредством многократных измерений в определенном интервале подземного сооружения. Таким образом может регистрироваться изменение НДС вмещающего грунтового массива в процессе эксплуатации подземного сооружения при активной разработке грунтов вблизи него, выполняться оценка влияния строящегося подземного объекта на существующий в заданном режиме, вплоть до непрерывного с внесением в расчетные методы корректировок на основе полученных натурных геофизических измерений.

С помощью измерений эмиссионными методами выполняется актуализация информации о напряженно-деформированном

состоянии конструкций и вмещающего массива. В случае если на каком-то этапе работ расчетная модель НДС перестает соответствовать натурным данным (в связи с превышением контролируемых параметров НДС), то такая модель должна быть пересмотрена и скорректирована — расчет должен быть проведен заново с учетом актуальных данных по НДС.

Опыт применения эмиссионных методов инженерной геофизики

Впервые исследования методом электромагнитной эмиссии в транспортном тоннелестроении для контроля динамических проявлений горного давления выполнялись при строительстве тоннелей Байкало-Амурской магистрали (БАМ)². Метод ЕЭМИ в варианте регистрации интенсивности счета импульсов электромагнитного излучения применялся для решения задач опережающей бесскважинной разведки из забоев на Северомуйском тоннеле. Также с его помощью проводились исследования с поверхности над трассами тоннелей БАМа для выявления зон тектонических нарушений и блоков горных пород с высоким уровнем напряжений.

В 2008–2013 гг. в ходе проведения горно-экологического мониторинга на действующих и строящихся «Олимпийских» тоннелях Сочи — Красная Поляна было обосновано применение метода регистрации электромагнитного излучения для обнаружения и контроля изменений напряженно-деформированного состояния крепи и массива при изменениях напряжений составляющих 5–20% от разрушающих. Также были установлены количественные взаимосвязи параметров электромагнитного излучения и НДС крепи и массива на начальной стадии деформирования³. Имеется также положительный опыт изучения электрокинетических явлений в обводненных грунтах при регистрации импульсных электромагнитных излучений на оползневых участках⁴.

Экспериментальные результаты измерений другого эмиссионного метода — метода акустической эмиссии при изменении НДС массива горных пород — также показывают возможность определения характера перераспределения напряженно-деформированного состояния и выявления этапов подготовки геодинамических событий [2], однако эти работы связаны с необходимостью обеспечения надежного контакта акустического приемника в обделке подземного сооружения или в массиве грунта.

Изложенные теоретические, лабораторные и практические основы были использованы при подготовке и проведении экспериментальных работ по оценке взаимного влияния подземных сооружений, выполненных специалистами ОАО «НИ-

ПИИ «Ленметрогипротранс» на различных подземных объектах в разных горно-геологических условиях.

Одним из примеров взаимного влияния подземных объектов, определенного бесконтактным эмиссионным методом ЕЭМИ, является результат регистрации естественного электромагнитного излучения вмещающего грунтового массива в строящемся перегонном тоннеле метрополитена, расположенном над другим таким же тоннелем. Рассматриваемые выработки пересекаются в плане, находясь на разной глубине. Тоннель, по которому выполняются измерения, находится на глубине ~ 20 м от поверхности земли, под ним на глубине ~ 40 м находится аналогичный тоннель. Проходка обоих тоннелей осуществлялась щитовым способом, обделка тоннелей — сборная железобетонная. Сооружения пересекаются под прямым углом на отметке 170 м профиля. Вмещающий грунтовый массив представлен отложениями глины, суглинками и насыщенными водой глинистыми песками.

Для измерений использовался трехкомпонентный прибор ЭМИ-3К, разработанный в научно-исследовательском отделе ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» [1]. Шаг измерений составляет 5 м, измерения выполнялись по трем пространственным компонентам поля. X — компонента 1 вдоль оси тоннеля, Y — компонента 2 поперек оси в горизонтальной плоскости, Z — компонента 3 вертикально. На момент измерений никаких работ в тоннелях не ведется, уровень помех минимальный. На диаграммах распределения электромагнитного излучения по профилю (рис. 4) прослеживаются аномальные значения на частотах 1–70 кГц на расстоянии до 10 м по одну и другую сторону от оси нижнего тоннеля. Кроме этого, отмечается значительная неравномерность уровня сигнала справа и слева от оси тоннеля, что свидетельствует о неоднородности напряженного состояния массива, которая была отмечена определенными инженерными осложнениями в процессе строительства рассматриваемого участка.

Другим примером влияния двух пересекающихся в плане тоннелей является результат регистрации ЕЭМИ по той же схеме в железнодорожном тоннеле, расположенном под аналогичным тоннелем. В плане сооружения пересекаются под прямым углом. Оба тоннеля построены горным способом с монолитной железобетонной обделкой. Глубина заложения тоннелей: верхнего ~ 30 м, нижнего ~ 60 м. В данном случае вмещающий массив представлен прочными глинисто-кремнистыми сланцами и песчаниками. Ось верхнего тоннеля пересекается с профилем ЕЭМИ по нижнему тоннелю на отметке профиля 300 м. Аномальные значения ЕЭМИ на частотах 1–120 кГц проявляются на расстоянии 10 м по одну и другую

² Басов, А.Д., Безродный, К.П., Бессолов, В.А., Касапов, Р.Е., Майер, Г.Р., Мастов, Ш.Р., 1979. Способ обнаружения зон разломов впереди забоя подземной выработки. Авторское свидетельство СССР № 1104457. Электроразведка. Справочник геофизика. Наука, М.

³ Романевич, К.В., 2015. Разработка критериев и методики идентификации геодинамических процессов по электромагнитному излучению вблизи выработок неглубокого заложения. Дис. канд. тех. наук, ИПКОН РАН, М.

⁴ Саломатин, В.Н., 1987. Закономерности геологических процессов и явлений, их связь с импульсной электромагнитной эмиссией. Дис. докт. геол.-мин. наук, Ленинградский горный институт им. Г.В. Плеханова, Л.

сторону от оси нижнего тоннеля, также присутствуют менее интенсивные аномалии на расстоянии 40 м по одну и другую сторону от оси нижнего тоннеля (рис. 5).

В приведенных примерах показано, что максимум уровня сигналов естественного электромагнитного излучения регистрируется не в пределах самого пересекающегося в плане тоннеля, а именно в тех интервалах, где по теоретическим и практическим данным находятся максимумы опорного давления, а во втором случае (рис. 5), вероятно, ещё и вторичные зоны опорного давления. Представленные результаты экспериментальных работ подтверждают знакопеременное распределение напряженно-деформированного состояния, в окрестностях подземных выработок, имеющее характер зональной дезинтеграции горных пород [10].

Актуальность задачи оценки взаимного влияния сооружений

Необходимость оценки взаимного влияния подземных сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге в режиме длительной эксплуатации подтверждается наличием многочисленных серьезных повреждений элементов конструкций, в частности, на односводчатых станциях, имеющих в своем объеме встроенные служебные помещения — совмещенные тяговые подстанции, посты централизации и камеры съездов. При обследовании технического состояния некоторых таких односводчатых станций выявляется обширный комплекс дефектов и повреждений встроенных конструкций, часть обследованных встроенных конструкций односводчатых станций в результате оценки их технического состояния были признаны ограниченно работоспособными⁵.

Длительные исследования напряженно-деформированного состояния конструкций станционных тоннелей и обделок перегонных тоннелей при эксплуатации [7] свидетельствуют, что после окончания строительства НДС стабилизируется, но с началом эксплуатации построенных участков метрополитена НДС конструкций и обделок вновь начинает изменяться. Увеличение НДС приблизительно с одинаковой скоростью происходит в течение 10–12 лет, а затем отмечается затухание скорости изменения НДС. Такому изменению способствует вибродинамическое воздействие подвижного состава на вмещающий массив.

В настоящее время в процессе содержания подземных сооружений метрополитенов основным организационным мероприятием является надзор, представляющий собой систему осмотров, обследований и наблюдений. Инструментальными наблюдениями представлен комплекс геодезическо-маркшейдерских работ по определению фактических значений абсолютных и относительных деформационных характеристик (осадок, горизонтальных смещений, кренов) строительных конструкций сооружений метрополитена. Таким образом, на сегодняшний день в эксплуа-

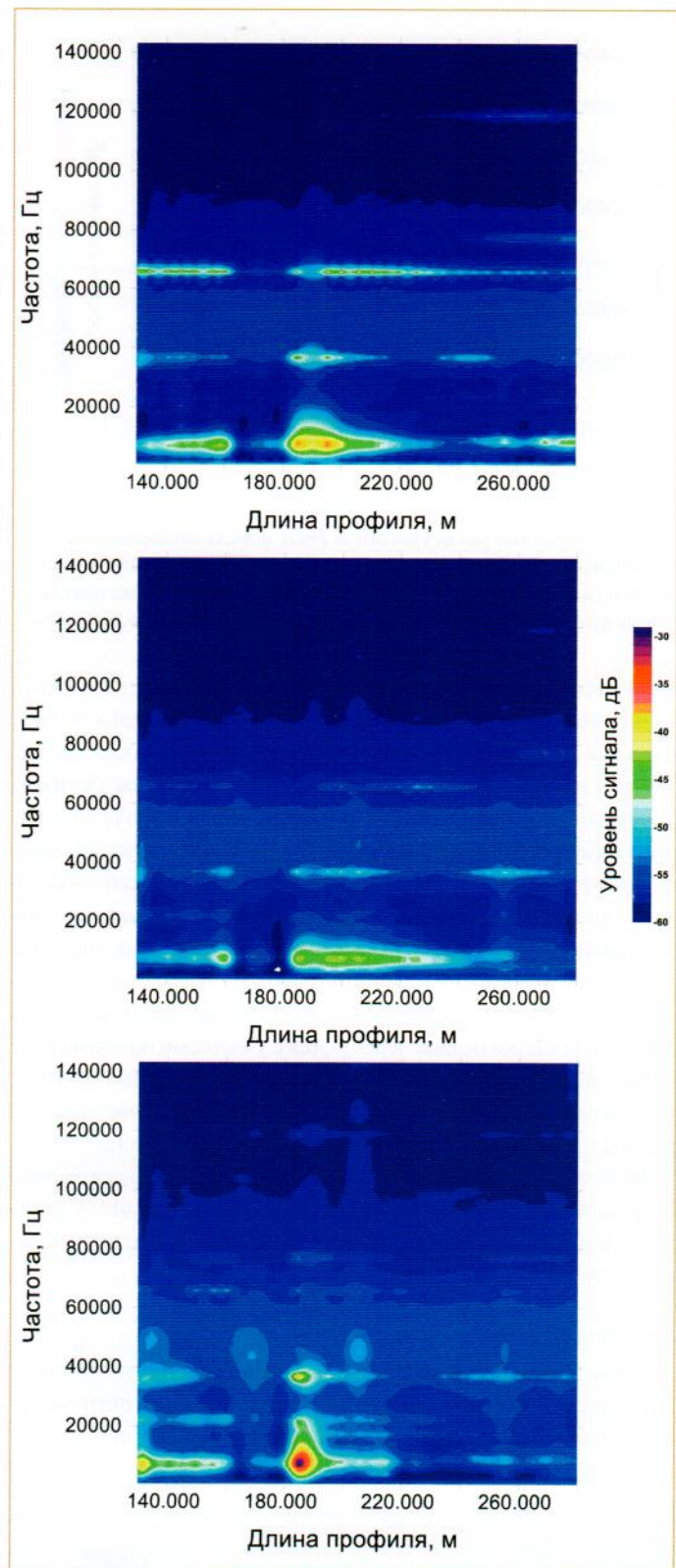


Рис. 4. Результат регистрации методом ЕЭМИ в перегонном тоннеле метрополитена, расположенном над аналогичным тоннелем (пересечение на отметке 170 м). Компонента X — верхний рисунок, компонента Y — средний рисунок, компонента Z — нижний рисунок

⁵ Кунец, Д.В., 2017. Обеспечение эксплуатационной надежности конструкций, встроенных в односводчатые станции Петербургского метрополитена. Дис. канд. тех. наук. ПГУПС, СПб.

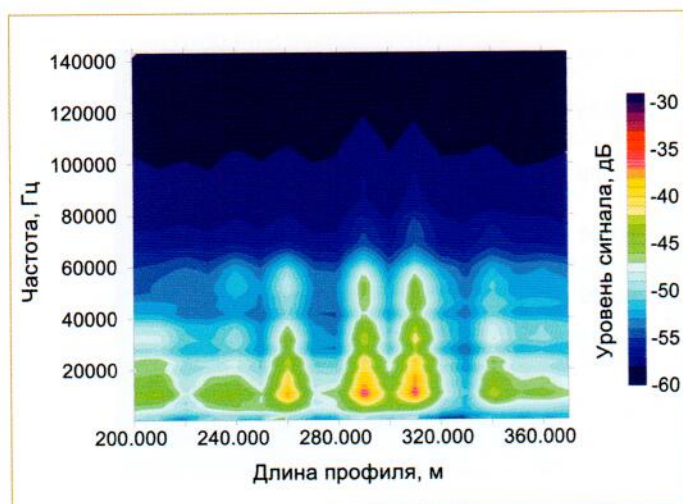


Рис. 5. Результат регистрации ЕЭМИ в железнодорожном тоннеле, расположенном под другим железнодорожным тоннелем (пересечение на отметке 300 м). Представлены результаты по компоненте поля X, направление вдоль оси тоннеля

тируемых сооружений метрополитена в основном фиксируются только последствия изменений НДС системы «обделка — вмещающий массив» без возможности прогноза интенсивности протекания геомеханических процессов (за исключением участков, оборудованных контрольно-измерительной аппаратурой в период строительства, и проведения расчетно-теоретического анализа напряженно-деформированного состояния системы «обделка — вмещающий массив»). В то же время анализ данных натурных наблюдений за деформациями в перегонных тоннелях по трассам Петербургского метрополитена показывает, что деформирование горных пород вокруг тоннелей носит волновой характер (участки осадок чередуются с участками подъема) [11]. Вместе с этим сложная схема взаимного расположения некоторых подземных сооружений метрополитена определяет неоднородное напряженное состояние во вмещающем массиве с чередованием участков продольного сжатия и растяжения, что в свою очередь может приводить к нарушению гидроизоляции обделки тоннелей, появлению трещин, а также к уже упомянутым повреждениям и дефектам элементов конструкций.


Заключение

Приведенный анализ причин снижения эксплуатационной надежности подземных сооружений показывает острую необходимость проведения оценки взаимного влияния подземных, наземных и наземно-подземных объектов при осуществ-

лении нового строительства, при реконструкции, демонтажах и капитальных ремонтах, а также прогноза изменения технического состояния строительных конструкций при эксплуатации метрополитенов. Оценка и прогноз изменения НДС системы «сооружение — вмещающий грунтовый массив» являются составными частями геотехнического мониторинга, проводимого с целью повышения безопасности при строительстве подземных сооружений и прогноза изменения НДС при их эксплуатации. Оперативная локализация мест максимальных изменений НДС эмиссионными методами инженерной геофизики позволит заблаговременно выполнить регламентированное обследование на таких участках (определение и оценку фактических значений параметров грунтов основания, строительных конструкций, характеризующих работоспособность объекта) и назначать обоснованные инженерные мероприятия по защите конструкций от деформирования, обеспечению их сохранности и безопасной эксплуатации.

Выводы

В статье приведены результаты натурных экспериментальных работ по регистрации параметров естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) в зонах опорного давления, приуроченных к областям взаимного влияния подземных сооружений в различных горнотехнических условиях, дано геомеханическое обоснование применения эмиссионных методов. Полученные данные являются новым подтверждением наличия качественной взаимосвязи интенсивности ЕЭМИ с изменениями и концентрацией напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива, вмещающего подземное сооружение. Эта взаимосвязь может использоваться, в частности, для корректировки предварительной расчетной модели НДС сооружения, определения оптимальных мест прямого (геомеханического) контроля деформаций в подземных сооружениях по выделенным зонам аномалий эмиссии, а также при проведении комплексной оценки взаимного влияния подземных сооружений в ходе строительства и при эксплуатации.

Проводимый мониторинг состоит из полевых методов измерения различных параметров среды и методов математического моделирования, сходимость результатов которых определяется точностью построения начальной расчетной модели. Научная новизна предлагаемой методики состоит в применении эмиссионных методов геофизики для корректировки интерпретационной модели, позволяющей сопоставить расчетные методы с методами полевых наблюдений. 

Список литературы

1. Басов, А.Д., Романевич, К.В., 2016. Применение метода регистрации естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) для решения инженерно-геологических и геотехнических задач в тоннелестроении. Метро и тоннели, № 6, с. 32–35.
2. Беспалько, А.А., Яворович, Л.В., Виитман, Е.В., Федотов, П.И., Штирц, В.А., 2010. Механоэлектрические преобразования в массиве горных пород Таштагольского рудника при взрывных воздействиях. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 2, с. 53–61.

3. Гарбер, В.А., 1998. Метрополитен. Долговечность тоннельных конструкций в условиях эксплуатации и городского строительства. Издательский Центр ТА Инжиниринг, М.
4. Деменков, П.А., Карасев, М.А., Потемкин, Д.А., 2011. Геомеханическая оценка поэтапного строительства пилонной станции метрополитена глубокого заложения. Записки горного института, Т. 190, с. 220–224.
5. Козин, Е.Г., Тулина, Н.В., Шнейдер, О.А., 2006. Технический надзор за строительством в охранных зонах метрополитена. Метро и тоннели, № 2, с. 9–11.
6. Кулагин, Н.И., 1996. Пересадочные узлы на линиях метрополитена глубокого заложения. Центр «ТИМР», М.
7. Кулагин, Н.И., Безродный, К.П., Лебедев, М.О., 2003. Длительные исследования напряженно-деформированного состояния несущих конструкций на станциях Санкт-Петербургского метрополитена в процессе эксплуатации. Современные проблемы геомеханики, геотехнологии, маркшейдерского дела и геодезии. Записки горного института, Т. 156, с. 11–17.
8. Курленя, М.В., Вострецов, А.Г., Кулаков, Г.И., Яковичская, Г.Е., 2000. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. Изд-во СО РАН, Новосибирск.
9. Меркин, В.Е., Хохлов, И.Н., Зерцалов, М.Г., Устинов, Д.В., Казаченко, С.А., 2014. Исследование взаимного влияния пересекающихся тоннелей при различных способах их возведения. Транспортное строительство, № 12, с. 12–15.
10. Опарин, В.Н., Тапсиев, А.П., Розенбаум, М.А., Рева, В.Н., Бадтиев, Б.П., Тропп, Э.А., Чанышев, А.И., 2008. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость выработок, под ред. Гусева М.А. Изд-во СО РАН. Новосибирск.
11. Протосеня, А.Г., Деменков, П.А., Козин, Е.Г., 2005. Некоторые задачи геомеханики при освоении подземного пространства в северо-западном регионе России. Проблемы и перспективы развития горных наук, Труды международной конференции, Т. 1, Геомеханика, Новосибирск, с. 222–225.
12. Романевич, К.В., Басов, А.Д., 2016. О возможности применения метода регистрации естественного электромагнитного излучения для контроля устойчивости выработок Петербургского метрополитена. Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, Т. 1, № 3, с. 163–167.
13. Романевич, К.В., 2017. Визуализация данных ЕЭМИ для решения задач контроля и прогнозирования состояния массивов горных пород и конструкций капитальных горных выработок. Метро и тоннели, № 1–2, с. 12–17.
14. Романевич, К.В., Басов, А.Д., 2018. Регистрация естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ) горных пород в зонах опорного давления подземных сооружений. Современные методы изучения и освоения недр Евразии, ГеоЕвразия 2018, Труды Международной геолого-геофизической конференции, Москва, с. 627–631.
15. Саммаль, А.С., Панкратенко, А.Н., Нгуен, К., 2015. Прогноз изменения напряженного состояния обделки тоннеля при проведении вблизи него выработки методом микротоннелирования. Транспортное строительство, № 1, с. 14–17.
16. Турчанинов, И.А., Иофис, М.А., Каспарьян, Э.В., 1977. Основы механики горных пород. Недра, Л.
17. Улицкий, В.М., Шашкин, А.Г., Шашкин, К.Г., 2010. Геотехническое сопровождение развития горючих пород (практическое пособие по проектированию зданий и подземных сооружений в условиях плотной застройки). Стройиздат Северо-Запад, Группа компаний «Геореконструкция», СПб.
18. Фотиева, Н.Н., Булычев, Н.С., Фирсанов, Е.С., Деев, П.В., 2009. Оценка несущей способности параллельных тоннелей произвольного поперечного сечения. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 3, с. 359–363.
19. Bahat, D., Rabinovitch, A., Frid, V., 2005. Tensile fracturing in rocks. Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods. Springer, Heidelberg.

References

1. Basov, A.D., Romanevich, K.V., 2016. Application of natural electromagnetic radiation registration (NEMR) method for solving engineering-geological and geotechnical problems in tunnel construction. Metro and tunnels, No. 6, pp. 32–35. (in Russian)
2. Bepalko, A.A., Yavorovich, L.V., Viitman, E.V., Fedotov, P.I., Shtirts, V.A., 2010. Mechanoelectric transformations in the rock mass of the Tashtagol mine under explosive influences. Physical and technical problems of mining, No. 2, pp. 53–61. (in Russian)
3. Garber, V.A., 1998. Metro. Durability of tunnel structures in operation and urban construction. Publishing Center TA Engineering, Moscow. (in Russian)
4. Demenkov, P.A., Karasev, M.A., Potemkin, D.A., 2011. Geomechanical assessment of the deep pylon station stage-by-stage construction. Mining Institute notes, Vol. 190, pp. 220–224. (in Russian)
5. Kozin, E.G., Tulina, N.V., Shneider, O.A., 2006. Technical supervision of the construction in underground security zones. Metro and tunnels, No. 2, pp. 9–11. (in Russian)
6. Kulagin, N.I., 1996. Hubs on the lines of deep metro lines. Center "TIMR", Moscow. (in Russian)
7. Kulagin, N.I., Bezrodnyj, K.P., Lebedev, M.O., 2003. Long-term studies of bearing structures stress-strain state at the stations of the St. Petersburg metro in operation. Modern problems of geomechanics, geotechnology, surveying and geodesy. Mining Institute notes, Vol. 156, pp. 11–17. (in Russian)
8. Kurlenya, M.V., Vostrecov, A.G., Kulakov, G.I., Yakovitskaya, G.E., 2000. Registration and processing of electromagnetic radiation signals of rocks. Publishing house of SB RAS, Novosibirsk. (in Russian)

9. Merkin, V.E., Khokhlov, I.N., Zertsalov, M.G., Ustinov, D.V., Kazachenko, S.A., 2014. Study of intersecting tunnels mutual influence in different ways of their construction. *Transport construction*, No 12, pp. 12–15. (in Russian)
10. Oparin, V.N., Tapsiev, A.P., Rozenbaum, M.A., Reva, V.N., Badtiev, B.P., Tropp, E.A., Chanyshev, A.I., 2008. Zonal disintegration of rocks and stability of mine workings, in Guzeev, M.A. (ed.). Publishing house of SB RAS, Novosibirsk. (in Russian)
11. Protosenya, A.G., Demenkov, P.A., Kozin, E.G., 2005. Some tasks of geomechanics in the development of underground space in the North-Western region of Russia. *Problems and prospects of mining Sciences development, Proceedings of the international conference*, Vol. 1, Geomechanics, Novosibirsk, pp. 222–225. (in Russian)
12. Romanevich, K.V., Basov, A.D., 2016. On the possibility of natural electromagnetic radiation registration method using to control the mine work stability of the St. Petersburg metro. *Fundamental and applied issues of mining*, Vol. 1, No 3, pp. 163–167. (in Russian)
13. Romanevich, K.V., 2017. Visualization of NEMR data for solving problems of monitoring and forecasting the state of rock massifs and structures of long-term mine workings. *Metro and tunnels*, No. 1–2, pp. 12–17. (in Russian)
14. Romanevich, K.V., Basov, A.D., 2018. Registration of natural electromagnetic radiation (NEMR) of rocks in the areas of underground structures reference pressure. *Modern methods of exploration and exploitation of mineral resources of Eurasia, Geoeurope 2018, Proceedings of the International geological and geophysical conference*, Moscow, pp. 627–631. (in Russian)
15. Sammal, A.S., Pankratenko, A.N., Nguen, K., 2015. Forecast of changes in the stress state of the tunnel lining when working out near it by the method of microtunneling. *Transport construction*, No 1, pp. 14–17. (in Russian)
16. Turchaninov, I.A., Iofis, M.A., Kaspariyani, E.V., 1977. *Basics of rock mechanics*, Nedra, Leningrad. (in Russian)
17. Ulitskij, V.M., Shashkin, A.G., Shashkin, K.G., 2010. *Geotechnical support of urban development (practical guide to the design of buildings and underground structures in dense buildings)*. Stroyizdat North-West, the Group of companies "Georekonstruktsiya", економструкция», St. Petersburg. (in Russian)
18. Fotieva, N.N., Bulychev, N.S., Firsanov, E.S., Deev, P.V., 2009. Evaluation of the arbitrary cross-section parallel tunnels bearing capacity. *Mountain information and analytical Bulletin*, No. 3, pp. 359–363. (in Russian)
19. Bahat, D., Rabinovitch, A., Frid, V., 2005. *Tensile fracturing in rocks. Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation Methods*. Springer, Heidelberg.

Captions to figures

Fig. 1. Lining of the pylon type station complex "Prospekt Slavy" equipped with string sensors, Saint-Petersburg

Fig. 2. Formation of the stress-strain state in the sides of the tunnel within the pylon

Fig. 3. Visualization of formation of abutment pressure zones around single excavation in Plaxis

Fig. 4. The result of registration by the NEMR method in underground metro tunnel, located above a similar tunnel (intersection at 170 m). Component X — upper pattern, component Y — middle pattern, component Z — lower pattern

Fig. 5. The result of registration by the NEMR method in a railway tunnel located under another railway tunnel (intersection at 300 m). Results are presented for the component of the field X , the direction along the tunnel axis

Информация об авторах

ЛЕБЕДЕВ М.О.

Заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», к.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия

РОМАНЕВИЧ К.В.

Старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», к.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия

БАСОВ А.Д.

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс», к.г.-м.н., г. Санкт-Петербург, Россия

Information about the authors

LEBEDEV M.O.

Deputy General Director for Scientific Research Work of the NIPII Lenmetrogiprotrans JSC, PhD (Candidate of Science in Technics), Saint-Petersburg, Russia

ROMANEVICH K.V.

Senior Researcher of the Department of the NIPII Lenmetrogiprotrans JSC, PhD (Candidate of Science in Technics), Saint-Petersburg, Russia

BASOV A.D.

Leading Researcher of the Department of the NIPII Lenmetrogiprotrans JSC, PhD (Candidate of Science in Geology and Mineralogy), Saint-Petersburg, Russia