



Предпосылки оперативного прогноза опасных геомеханических явлений при строительстве подземных сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге

М.О. Лебедев¹, К.В. Романевич¹✉, С.Н. Мулёв², В.Н. Старников²

¹ ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ romanevichkirill@gmail.com

Резюме: Приведено краткое описание геологического строения города Санкт-Петербурга, рассмотрены основные особенности инженерно-геологических условий толщи коренных глин и их влияние на безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений метрополитена. Рассмотрены особенности горного способа проходки при строительстве капитальных и вспомогательных горных выработок, приведены примеры аварийных ситуаций в ходе их строительства. Подчеркивается необходимость совершенствования методик предупреждения и прогнозирования опасных геомеханических процессов и явлений при оценке устойчивости забоя тоннеля и расчете параметров крепи. В качестве перспективного метода прогноза опасных геомеханических явлений рассмотрен метод регистрации естественного электромагнитного излучения горных пород, применяемый для решения аналогичных задач в других геологических условиях. Приводятся результаты экспериментальных измерений естественного электромагнитного излучения горных пород, выполненных при строительстве вспомогательных горных выработок и перегонных тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена в толще верхнекотлинских коренных глин. Приводятся результаты лабораторных испытаний образцов при одноосном сжатии до их разрушения с одновременной регистрацией акустической и электромагнитной эмиссии. В результате проведенных натурных и экспериментальных работ получены однозначные предпосылки возможности оперативного прогноза опасных геомеханических явлений при строительстве подземных сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге.

Ключевые слова: верхнекотлинские глины верхнего венда, горный способ строительства, горная выработка, перегонный тоннель, метрополитен, вывал, одноосное сжатие, естественное электромагнитное излучение

Для цитирования: Лебедев М.О., Романевич К.В., Мулёв С.Н., Старников В.Н. Предпосылки оперативного прогноза опасных геомеханических явлений при строительстве подземных сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге. *Горная промышленность*. 2023;(S1):150–158. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-150-158>

Prerequisites for the field forecast of hazardous geomechanical phenomena during the construction of subway structures in St. Petersburg

M.O. Lebedev¹, V.K. Romanevich¹✉, S.N. Mulev², V.N. Starnikov²

¹JSC “Research, Design and Survey Institute “Lenmetrogioprotrans”, St. Petersburg, Russian Federation

² Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Interdisciplinary Research Center “VNIMI”, St. Petersburg, Russian Federation

✉ romanevichkirill@gmail.com

Abstract: The article provides a brief description of St. Petersburg city geological structure, discusses the main features of the engineering-geological conditions of the bedrock clay strata and their impact on the safety of construction and operation the subway underground structures. The features of the mining method of excavation during the construction of capital and auxiliary mine workings are considered, also given some examples of emergency situations during their construction. It emphasizes the need to improve methods for preventing and predicting dangerous geomechanical processes and phenomena, when assessing the stability of the tunnel face and calculating the parameters of the lining. As a promising method for predicting dangerous geomechanical phenomena, the article considers a method for recording natural electromagnetic radiation of rocks, which is used to solve similar problems in other geological conditions. The results of experimental measurements of natural electromagnetic radiation of rocks are given. They were made during the construction of auxiliary mine workings and track tunnels of the



St. Petersburg subway in the layers of Upper Kotlin bedrock clays. The results of laboratory experiments on uniaxial compression of Upper Kotlin bedrock clays samples before their destruction with simultaneous registration of acoustic and electromagnetic emission are presented. As a result of the field and experimental work carried out, unambiguous prerequisites were obtained for the possibility of the field forecast of dangerous geomechanical phenomena during the construction of subway structures in St. Petersburg.

Keywords: Upper Vendian Upper Kotlin clays, mining method of construction, mine working, track tunnel, subway, rock fall out, uniaxial compression, natural electromagnetic radiation

For citation: Lebedev M.O., Romanevich V.K., Mulev S.N., Starnikov V.N. Prerequisites for the field forecast of hazardous geomechanical phenomena during the construction of subway structures in St. Petersburg. *Russian Mining Industry*. 2023; (1 Suppl.):150–158. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-150-158>

Введение

Самыми крупными авариями в процессе строительства метрополитена в Санкт-Петербурге являются прорывы пльвунного грунта на перегоне ст. «Лесная» – ст. «Площадь Мужества», входящего в состав IV участка Кировско-Выборгской линии, в апреле 1974 г. и в июле 1975 г. Сооружение тоннелей на указанном перегоне велось в зоне древнего размыва кровли коренных верхнекотлинских¹ глин в чрезвычайно сложных инженерно-геологических условиях – в мелкозернистых водонасыщенных песках, пылеватых супесях, обладающих пльвунными свойствами, пылеватых переувлажненных суглинках, при гидростатическом давлении грунтовых вод на тоннельную обделку до 8 атм [3]. Однако подавляющее большинство перегонных тоннелей и подземных станций петербургского метрополитена пройдено и функционирует в самой толще коренных глин, являющихся твердой аргиллитоподобной горной породой, обладающей высокой степенью уплотнения и обезвоживания. Это весьма благоприятные условия для строительства перегонных тоннелей, станционных комплексов и вспомогательных горных выработок.

Вместе с тем толща коренных глин является трещиновато-блочной средой и имеет нарушенные зоны, приуроченные, как правило, к тектоническим разломам в кристаллическом фундаменте. Пересечение тоннельными выработками трещиноватых зон в массиве коренных глин приводит к перераспределению напряженно-деформированного состояния и в ряде случаев может являться причиной опасных геомеханических процессов и явлений, таких, например, как заколообразование и вывалообразование. Помимо зон «естественной» (природной) трещиноватости, не меньшую опасность представляет техногенная трещиноватость массива, образованная в результате взаимного влияния выработок и вибродинамических нагрузок от подвижного состава эксплуатируемых сооружений. В практике строительства подземных сооружений ленинградского-петербургского метрополитена отмечаются нештатные ситуации, непосредственно связанные с этими процессами.

При интенсификации строительства сети метрополитена в городе риск возникновения подобных опасных геомеханических явлений будет возрастать. Во избежание этого крайне необходима разработка современных методик их предупреждения и прогнозирования как на этапе проектирования при оценке устойчивости забоя тоннеля и расчете параметров крепи, так и в режиме оперативного прогноза опасных геомеханических явлений непосредственно в процессе продвижения забоя. Для создания таких опе-

ративных методик прогноза необходимо дополнительное изучение свойств вмещающего породного массива – проведение экспериментальных натурных и лабораторных экспериментов для каждого перспективного метода с оценкой его применимости в целях прогнозирования опасных геомеханических процессов и явлений.

Инженерно-геологические условия Санкт-Петербурга

Самым полным систематизированным описанием геологического строения территории города является «Геологический атлас Санкт-Петербурга» [1]. Издание отражает фактически все особенности состояния геологической среды на территории города. В него вошли сведения о геологическом строении в возрастном интервале от докембрия до современности; гидрогеологическая и инженерно-геологическая характеристика территории и др. Работа [2] дополняет «Геологический атлас», рассматривая особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга и их влияние на безопасность строительства и эксплуатации подземных сооружений.

Основные черты инженерно-геологического строения подземного пространства Санкт-Петербурга можно представить в следующем упрощенном виде. Территория располагается в пределах северо-западной части Русской плиты, которая имеет двухэтажное строение с нижним этажом – кристаллическим фундаментом, и верхним – осадочным чехлом, на поверхности в черте города распространены насыпные и намывные грунты.

Осадочный чехол. Верхняя часть осадочного чехла состоит из песчано-глинистых грунтов четвертичного возраста. Их мощность в среднем составляет 20–30 м, локально достигая 100–130 м в палеодолинах. Разрез четвертичных отложений сложен ледниковыми образованиями (моренами).

Нижняя толща осадочного чехла представлена песчано-глинистыми образованиями котлинского горизонта верхнего венда (последний геологический период неопротерозоя, непосредственно перед кембрием). Его верхняя часть мощностью до 150 м представлена переслаивающимися глинами, алевролитами и песчаниками (верхняя пачка мощностью не менее 25–30 м), далее глинами, алевролитами и песчаниками (нижняя пачка). На юге города в строении верхней толщи выделяют нижнекембрийские «синие» глины.

Ниже глин залегает водоносный горизонт с напорами более 90 м, где преобладают песчаники и алевролиты (гдовские слои), их мощность, как правило, не превышает 30 м.

Кристаллический фундамент. Кристаллические породы архей-протерозойского возраста (граниты, гнейсы, дио-

¹ В настоящее время в практике проектирования и строительства подземных сооружений верхнекотлинские глины часто называют «протерозойские глины», что не совсем точно, поскольку их возраст – верхний венд (верхний отдел протерозоя) [1; 2].



риты и другие магматические и метаморфические породы) в пределах города залегают на глубинах 180–240 м.

Основная часть перегонных тоннелей и подземных станционных комплексов петербургского метрополитена, а также глубокие тоннельные канализационные коллекторы расположены в толще верхнекотлинских глин (а также в толще нижнекембрийских «синих» глин, появляющихся в разрезе на юге города). В работе [2, с. 16] приведено подробное описание этих пород, в сокращенном виде приведем его здесь.

Верхнекотлинские глины представляют собой плотные (плотность 2,17–2,24 г/см³) твердые алевроитовые (пылеватые) тонкослоистые разности зеленовато-серого цвета с редкими прослоями песчаников, часто с бурыми пленками органического вещества на плоскостях напластования. Тонкодисперсная часть верхнекотлинских глин ($d < 0,002$ мм) состоит из гидрослюда и каолинита – средне- и малоактивных глинистых минералов. Выделяется несколько стадий литификации – это определяет высокую степень уплотнения и обезвоживания, однако эти глины способны размокать при действии вод, особенно при их высокой степени дезинтеграции.

Нижнекембрийские глины отличаются от верхнекотлинских как по внешнему виду, так и по составу, состоянию и физико-механическим свойствам. Характеризуются как алевроитовые неяснослоистые разности, содержат сульфиды (пирит) и органические соединения до 4%. По физическому состоянию (консистенции) нижнекембрийские глины более влажные и пластичные, чем верхнекотлинские глины.

В настоящее время установлено, что толщу коренных глинистых отложений верхнего венда и нижнего кембрия следует оценивать как трещиновато-блочную среду, имеющую зональное строение по глубине [2, с. 16].

Зональное строение толщ коренных глин может быть охарактеризовано изменением параметров физических свойств, а также степенью их трещиноватости (и микротрещиноватостью, которая часто не фиксируется визуально). Наличие трещиноватости в глинах существенно сказывается на их прочности, деформационной способности, а также водопроницаемости [2, с. 16]. В связи с этим очевидны неоднородность инженерно-геологических условий массивов коренных глин по глубине и по площади территории города, наличие большого количества нарушенных зон.

Результаты экспериментальных исследований прочности рассматриваемых пород на одноосное сжатие также приведены в [2]. У ненарушенных верхнекотлинских глин этот показатель, как правило, составляет в среднем около 2,4–2,8 МПа. В зонах тектонических разломов прочность на сжатие верхнекотлинских глин снижается в несколько раз. Значения прочности на одноосное сжатие нижнекембрийских глин ниже и изменяются в довольно широких пределах с заметным влиянием масштабного эффекта – 0,12–0,81 МПа [2, с. 19].

Строительство сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге

В настоящее время строительство сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге в зависимости от конкретных инженерно-геологических, гидрогеологических и других условий ведется двумя способами – щитовым или горным. При щитовом способе строительства разработка грунта в забое ведется под защитой металлической оболочки с возведением под ее защитой тоннельной обделки.

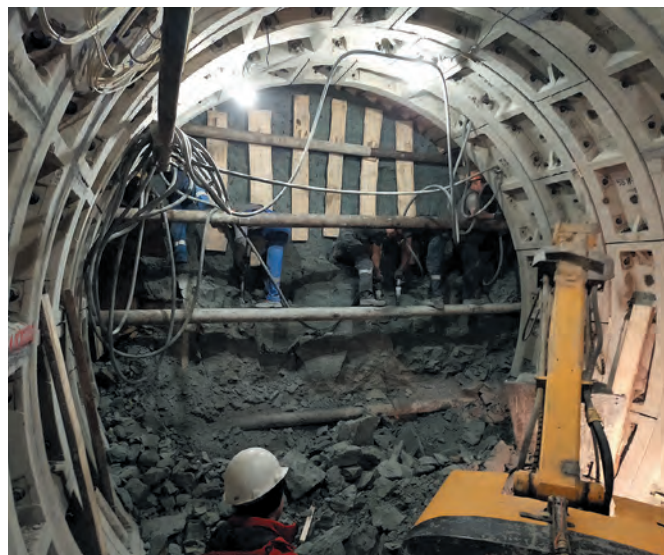


Рис. 1
Процесс разработки горным способом верхнекотлинской коренной глины с использованием отбойных молотков при строительстве вспомогательной выработки

Fig. 1
The process of mining the Upper Kotlin bedrock clay using jackhammers during the construction of an auxiliary subway working

Горный способ подразумевает ручную разработку верхнекотлинских (нижнекембрийских) коренных глин с использованием отбойных молотков, установку временного крепления из металлических расстрелов и деревянной затяжки (рис. 1), служащего защитой от вывалов, и возведение тоннельной обделки при помощи тубингоукладчика.

Откатка отбитой породы осуществляется вагонетками после их наполнения при помощи породопогрузочной машины.

Анализ [4] существующих технологических схем, методов сооружения и применяемого проходческого оборудования для строительства выработок различного назначения в условиях строительства показывает, что технологическая схема бесщитовой проходки с помощью отбойных молотков и большой долей ручного труда является наименее производительной и эффективной с точки зрения проведения выработок. Указанный способ обладает наименьшим уровнем механизации работ по разработке грунта. Учитывая параметры прочности вмещающих пород, а также значительную глубину заложения подземных сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге, очевидным становится наличие риска возникновения заколов и вывалов до потери устойчивости забоев и стенок незакрепленных выработок, особенно вблизи зон геологических нарушений.

При строительстве сравнительно коротких вспомогательных выработок (притоннельных выработок, людских ходков и др.), а также выработок сложной геометрии (специальных камер, переходных коридоров и др.) горный способ строительства является безальтернативным.

Аварийность при строительстве подземных сооружений в Санкт-Петербурге

Одним из показательных примеров является авария в забое пересадочного узла строящейся станции метрополитена в Санкт-Петербурге [5, с. 32–35] в октябре 1989 г. – обрушение грунта в забое переходного коридора пересадочного узла строящейся станции «Владимирская-2» на действующую станцию «Владимирская».



Строительство верхнего пересадочного узла велось в толще коренных глин, характеризующихся на участке как слоистые плотные твердые сухие аргиллитоподобные, мощность которых в кровле составляла 6–6,5 м. Такая инженерно-геологическая обстановка оценивается для условий Санкт-Петербурга как относительно благоприятная.

Разработку породы производили отбойными молотками по ярусам с отгрузкой погрузочной машиной. Обделку монтировали укладчиком, установленным на трубчатые прогоны, которые перемещали по мере продвижения забоя.

21 октября 1989 г. произошел вывал породы из забоя объемом 10–15 м³ в зоне ряда расстрелов. Через час вновь произошел вывал из лба и кровли забоя объемом около 2 м³, при этом были снесены три расстрела. Усилия проходчиков по подкреплению забоя успеха не имели, и очередным вывалом породы снесло всё крепление кровли, лба забоя и забутовку. В кровле образовался купол высотой до 7 м с объемом вывала 170 м³.

В связи с невозможностью ведения дальнейших работ по подкреплению и забутовке полости из-за опасности новых обрушений породы и создавшейся угрозы для жизни людей было принято решение прекратить работы в забое и обеспечить локализацию зоны вывала.

22 октября были обнаружены осадки жилого дома, расположенного вблизи зоны строительства и приняты первоочередные меры к локализации и ликвидации вывала. Однако в тот же день вновь произошло обрушение, более мощное, чем все предыдущие. Подход в забой через отверстие в шельге свода оказался запечатанным, а укладчик обделки и погрузочная машина – перемещенными к фурнели. Было принято решение срочно закрепить откос завала набрызгом бетона и производить нагнетание раствора в пространство обрушения.

Анализ аварии показал, что причинами вывалов и, как следствие, деформаций (осадок) земной поверхности стали повышенная трещиноватость массива коренных глин в зоне переходного коридора и резкое нарастание горного давления на временную крепь со стороны разуплотненного породного массива под влиянием ранее пройденных выработок станционного узла, а также дополнительное динамическое воздействие на ослабленный трещиноватый массив от вибраций при движении поездов действующего метрополитена.

Горное давление на временную крепь забоя оказалось существенно выше принятого при расчетах, что привело к разрушению крепи и образованию вывала. Обнаружившаяся в процессе проходки повышенная трещиноватость коренных верхнекотлинских глин и динамика ее развития в зоне забоя переходного коридора не могли быть спрогнозированы имеющимися на тот момент средствами инженерно-геологических изысканий [5, с. 35].

Выполненные в 2022 г. расчеты на основе метода конечных элементов, реализованные в программном комплексе PLAXIS 3D, позволили описать произошедшее в 1989 г. обрушение, обосновать геомеханические процессы во вмещающем массиве на разных этапах сооружения выработки [6].

В качестве другого характерного примера возникновения вывала в забое можно привести ситуацию при строительстве одной из вспомогательных горных выработок Лахтинско-Правобережной линии метрополитена от станции «Спасская» до станции «Большой проспект» весной 2020 г. (рис. 2). Выполнялась проходка выработки камеры

сездов диаметром 9,9 м (вчерне) в условиях уже построенных годом ранее перегонных тоннелей диаметром 5,6 м. Важной чертой данной аварии является тот факт, что проходка горной выработки была по технологическим причинам приостановлена в марте и в течение месяца никаких работ на забое не производилось. В апреле, при возобновлении проходки, из лба забоя произошел вывал объемом 25 м³ со смещением крепления забоя. После вывала забой был забетонирован, выполнено устройство опережающих забой горизонтальных анкеров, через дополнительные скважины было произведено нагнетание для закрепления массива впереди забоя. Затем была выполнена проходка оставшихся выработок.

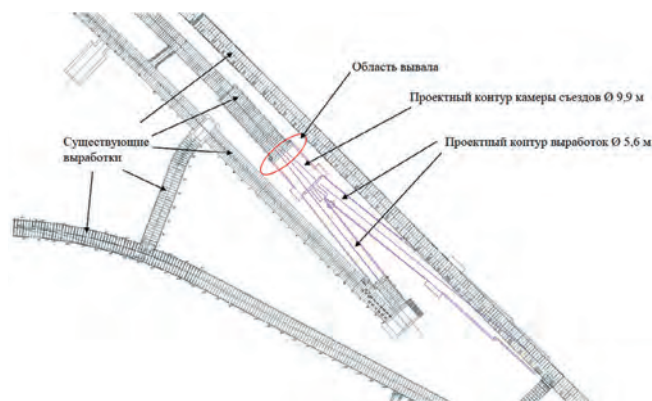


Рис. 2
Взаимное расположение
выработок в районе вывала

Fig. 2
Mutual arrangement of
subway workings in the area
of the rock fall out

В связи с риском возникновения аварийных ситуаций разрабатываются и применяются различные способы и средства, снижающие вероятность негативных геомеханических процессов в ходе строительства в толще верхнекотлинских глин. Проведено исследование устойчивости забоя при проведении тоннеля на глубине 8 м от подошвы четвертичных отложений, выведена закономерность влияния значения отпора крепи на напряженно-деформированное состояние [7]. Анализу влияния крепи лба забоя на напряженно-деформированное состояние посвящены работы [8; 9]. Способ крепления лба забоя анкерами описан в патенте [10]. Вместе с тем необходимо уделять особое внимание прогнозным методам в составе комплексного геотехнического мониторинга (ГТМ) при строительстве.

Методы оперативного прогнозирования опасных геомеханических процессов и явлений

Нештатные ситуации различного масштаба, в той или иной степени отражающиеся на деформациях земной поверхности, имеют место при строительстве сооружений метрополитена во всех районах Санкт-Петербурга. Очевидно, что при интенсификации строительства сети метрополитена в городе риск возникновения подобных опасных геомеханических явлений будет возрастать. В связи с чем крайне необходима разработка современных методов их предупреждения и прогнозирования.

В первую очередь локальное снижение прочностных и деформационных свойств в массиве по трассе тоннеля должно учитываться еще на этапе проектирования при оценке устойчивости забоя тоннеля и расчете параметров крепи.



Существующие методы прогноза деформаций породного массива и земной поверхности, основанные на полупирических или аналитических методах расчета, не позволяют в полной мере описать геомеханические процессы, происходящие при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации [11, с. 5].

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. Прогноз в таких случаях для оптимистичного и пессимистического вариантов может отличаться в разы [12].

Поэтому другим, оперативным, уровнем прогноза опасных геомеханических явлений при строительстве подземных сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге должны стать надежные инструментальные методы, применяемые непосредственно в процессе строительства в составе ГТМ.

Системы ГТМ при строительстве и эксплуатации подземных сооружений модернизируются новыми техническими средствами контроля, которые в настоящее время разрабатываются и внедряются за рубежом и в России.

В качестве примеров могут быть приведены такие технологии, как мониторинг пространственных геометрических параметров лба забоя с помощью лазерного сканирования и технологии высокоскоростной видеосъемки и распознавания изображений, дающие возможность предупреждать об обрушении фрагментов размером порядка 1 см через 0,1 с после обнаружения движений падающих объектов на забое строящегося тоннеля [13]. Непрерывно совершенствуется и развивается метод регистрации акустической эмиссии при строительстве тоннелей [14]. Основными препятствиями к его применению остается большое количество не дифференцируемых промышленных помех (шумов), сопутствующих проходке горным способом и необходимость создания плотного надежного контакта между датчиком и обследуемым объектом.

Родственным для метода регистрации акустической эмиссии является бесконтактный метод регистрации электромагнитной эмиссии или электромагнитного излучения (ЕЭМИ) [15].

Метод ЕЭМИ, или ЕИЭМПЗ (метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли)

Метод основан на взаимосвязи параметров электромагнитного излучения и степени напряженно-деформированного состояния (НДС) в массивах горных пород различного состава.

Впервые в транспортном тоннелестроении исследования методом регистрации естественного электромагнитного излучения проводились специалистами Ленметрогипротранс [16] при строительстве тоннелей Байкало-Амурской магистрали (БАМ) в 1980-х годах. Методом ЕИЭМПЗ (в варианте регистрации интенсивности счета импульсов электромагнитного излучения) контролировались динамические проявления горного давления при проходке. Этот же метод был впервые применен для определения горно-геологических условий впереди забоев на строящемся Северо-Муйском тоннеле.

Применяемая в те годы аппаратура регистрации электромагнитного излучения горных пород фиксировала

только количество импульсов в единицу времени, но не их амплитуды, что не позволяло даже качественно оценить энергию протекающего процесса и, следовательно, адекватно не отражало реальную ситуацию изменений напряженно-деформированного состояния на участке наблюдений. Поэтому однозначной интерпретации результатов наблюдений не получалось, особенно на новых участках с неизвестной динамикой изменения НДС.

В 2009–2014 гг. в результате экспериментальных исследований при строительстве «Олимпийских» тоннелей в Сочи обосновано применение метода ЕЭМИ для обнаружения и контроля изменений НДС крепи и вмещающего породного массива при изменениях напряжений 5–20% от разрушающих, разработана методика оперативной идентификации и прогнозирования относительно слабых геомеханических процессов в массиве горных пород по регистрации электромагнитного излучения [16].

В настоящее время спектр аппаратурных решений для метода ЕЭМИ достаточно широк. Сравнение характеристик четырех наиболее известных вариантов: Cerescope (Германия), YDD16/KBD5 (Китай), EMRR-3 (РФ), Angel-M (РФ) – проведено в работе [17, с. 3286].

Аппаратура метода ЕЭМИ

При проведении опытных лабораторных и натурных работ в строящихся горных выработках петербургского метрополитена регистрация параметров ЕЭМИ выполнялась при помощи аппаратуры типа «Ангел». Это собственно аппаратура «Ангел» производства ВНИМИ (1998 г.), а также ее модификация Angel-M (2015 г.), аппаратура ERA-EMI, производства компании «ERA» и собственные разработки научно-исследовательского отдела ОАО «НИПИИ «Ленметрогипротранс» – аппаратура EMI-PM, EMI-1K и EMI-3K. Всё перечисленное оборудование принципиально состоит из двух частей – приемного блока и приемной антенны.

Результаты, показанные в данной статье, получены с использованием аппаратуры со следующими техническими характеристиками.

Основные технические характеристики приемного блока:

- полоса регистрируемых частот: 5000–150000 Гц;
- частота дискретизации сигнала: 467000 Гц;
- разрядность аналого-цифрового преобразования: 16 бит;
- аналоговые фильтры: ФНЧ – 1-го порядка, ФВЧ – 1-го порядка;
- коэффициент усиления: 30.

Основные технические характеристики приемной антенны:

- полоса регистрируемых частот: 5000–150000 Гц;
- резонансная частота: 25000 Гц;
- аналоговые фильтры: ФВЧ – 2-го порядка;
- коэффициент усиления предусилителя: 100.

Цифровая фильтрация и визуализация результатов регистрации ЕЭМИ производятся по специальному алгоритму, интерпретации подвергаются как сам сигнал, так и его спектральные характеристики и рассчитанные автоматически показатели структуры излучения.

Результаты опытной регистрации ЕЭМИ в строящихся горных выработках петербургского метрополитена

В 2015–2016 гг. проводилась экспериментальная регистрация естественного электромагнитного излучения горных пород при строительстве вспомогательных горных



выработок Невско-Василеостровской линии от ст. «Приморская» до ст. «Новокрестовская» (ныне ст. «Зенит»).

В результате этих работ были проанализированы параметры регистрируемых сигналов и установлены некоторые закономерности генерации импульсов электромагнитного поля в горных породах в зависимости от уровня их геодинамической активности. Особое внимание уделено рассмотрению особенностей электромагнитного излучения, генерируемого массивами коренных верхнекотлинских глин [18].

В условиях проходки вспомогательных выработок в Санкт-Петербурге в забоях, разрабатываемых в трещиноватых породах, зафиксированы относительно слабые сигналы ЭМИ, параметры которых близки полученным в ходе лабораторных и натуральных экспериментов на другом геологическом материале.

Весьма слабые сигналы удалось зарегистрировать в выработке в связи с тем, что это была вспомогательная выработка сложной конфигурации и небольшого объема, поэтому разработка проводилась вручную с применением отбойных молотков и использованием временной крепи из бревен, что значительно снизило уровень техногенных помех.

Для единичного электромагнитного сигнала, зарегистрированного в натуральных условиях в горной выработке, длительность импульса составляет от десятых долей до 40 мкс, частота от ~ 5–7 до 60 кГц. Амплитуды импульсов от 0,02 до 0,1 отн.ед. при фоне ~0,007 отн.ед. На рис. 3 показана визуализация одного из сигналов длительностью 5 с и увеличенные отдельные импульсы того же сигнала.

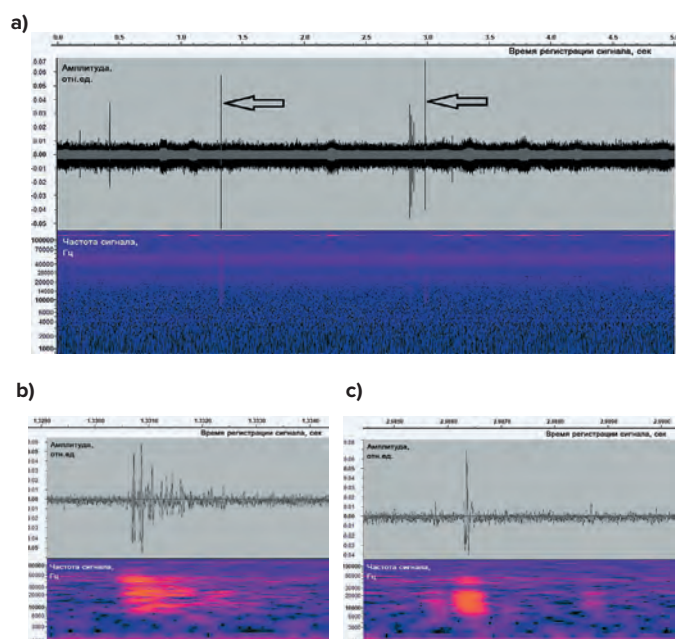


Рис. 3
Визуализация сигналов электромагнитного излучения в выработке с минимальным количеством помех: а – записанный сигнал, продолжительностью 5 с и его спектрограмма (стрелками показаны увеличенные импульсы); б, с – увеличенные отдельные импульсы того же сигнала и их спектрограммы

Fig. 3
Visualization of electromagnetic radiation signals in a working with a minimum amount of interference: а – a recorded signal, lasting 5 seconds and its spectrogram; б, с – enlarged individual pulses of the same signal and their spectrograms

Значительное количество импульсов ЕЭМИ наблюдалось в период активной проходки и в первые часы после проходки. Через несколько часов количество импульсов заметно снижалось, через 1–2 сут после остановки проходки в выработке наблюдались лишь единичные случаи возникновения импульсов в сигналах. Все зарегистрированные таким образом импульсы являются характерной конкретной областью массива со своими особенностями по степени трещиноватости, наличию включений, в частности слоев песка, уровню напряженного состояния массива в целом и др. Поэтому полученные данные являются лишь частным случаем и не претендуют на обобщение.

Дальнейшее изучение ЕЭМИ коренных глин при их разработке забоем в ходе строительства сооружений метрополитена заключалось в оценке параметров эмиссии в зависимости от расположения приемной антенны. Антенна располагалась в разных частях забоя, в разных направлениях относительно лба забоя. Также изучалась эмиссия массива при сверлении шпуров в лоб забоя в разных его частях и при расположении приемной антенны в шпурах.

Кроме того, изучались параметры электромагнитного излучения массива в спокойном состоянии – когда на забое не велись проходческие работы в течение определенного количества времени (часы, сутки, недели), и в период непосредственно проходки – когда одним или несколькими отбойными молотками производилось поэтапное раскрытие забоя, а измерения электромагнитной эмиссии велись в соседних точках. В ходе проведенных работ были получены аналогичные показанным выше сигналы, различающиеся в деталях по уровню фона и некоторым параметрам отдельных импульсов – их количеству на единицу времени, длительности, форме и частотной характеристике.

Наиболее яркие сигналы были получены при регистрации ЕЭМИ на забое в процессе активной проходки с работой одного отбойного молотка или группы. При измерениях в шпурах, выбуренных в забое, были получены единичные импульсы, по всей видимости, связанные с разгрузкой массива в области бурения отверстий. Аналогичные результаты были получены, например, в угольных шахтах [19].

Лабораторные исследования ЕЭМИ верхнекотлинских коренных глин

Отбор образцов производился непосредственно в период проходки горных выработок. Лабораторные испытания проводились в режиме одноосного сжатия образца с нарастанием приложенного усилия до момента разрушения образца. В режиме реального времени синхронно регистрировались сигналы датчиков нагрузки, ЕЭМИ и акустического датчика.

Системой нагружения образца является испытательный гидравлический пресс (модель ПГК1500Г200), создающий усилие до 150 тс, с установленной оснасткой для крепления образца. В оснастку вмонтирован тензометрический датчик нагрузки. Акустический датчик создан на базе вибропреобразователя KD35, снабженного усилителем заряда. В качестве датчика ЕЭМИ использовалась аналогичная антенна, применяемая при измерениях в натуральных условиях. Все датчики через аналоговые модули комплекса Angel-M подключались к регистратору, который реализован на базе модульной информационно-измерительной

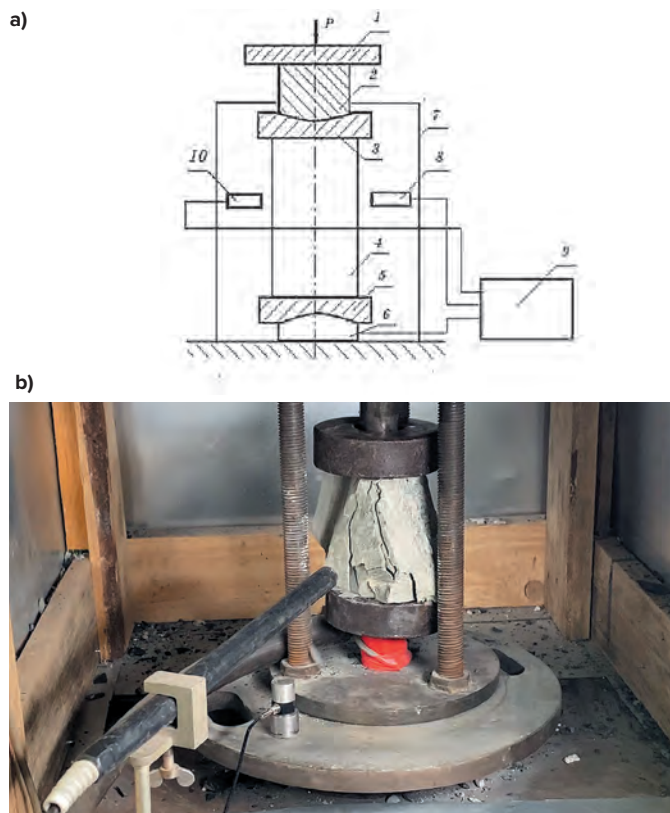


Рис. 4
Схема испытаний (а) и внешний вид экспериментальной установки (б) для регистрации акустической и электромагнитной эмиссии в процессе разрушения образца верхнекотлинской глины на прессе одноосного сжатия: 1 – верхняя плита испытательного гидравлического пресса; 2 – шток; 3 – верхняя подкладная пята; 4 – образец; 5 – нижняя подкладная пята; 6 – датчик нагрузки; 7 – экранирующий чехол; 8 – датчик ЕЭМИ; 9 – регистратор; 10 – акустический датчик

Fig. 4
Scheme of testing and external view of the experimental setup for recording acoustic and electromagnetic emission during the destruction of the Upper Kotlin clay sample on a uniaxial compression press: 1 – top plate of the test hydraulic press; 2 – rod; 3 – upper lining heel; 4 – sample; 5 – lower lining heel; 6 – load sensor; 7 – shielding case; 8 – electromagnetic sensor; 9 – signal receiver; 10 – acoustic sensor

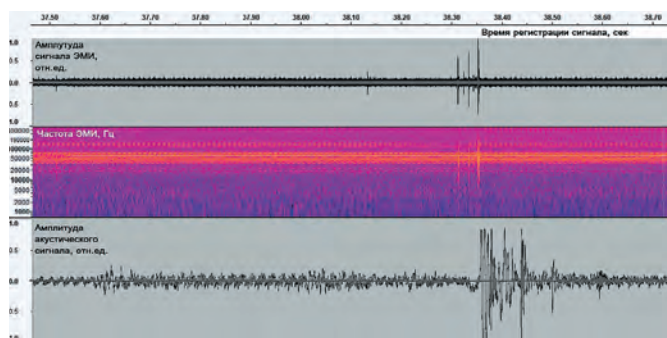


Рис. 5
Результаты регистрации ЕЭМИ и акустической эмиссии в момент разрушения образца верхнекотлинской глины в ходе лабораторных испытаний

Fig. 5
The results of registration of electromagnetic and acoustic emission at the moment of destruction of the upper Kotlin clay sample during laboratory tests

системы QMBox. Схема испытаний и внешний вид экспериментальной установки представлены на рис. 4.

В ходе проведенных лабораторных испытаний были выявлены дифференцируемые в процессе фильтрации сигналы импульсы ЕЭМИ, которые наблюдались в течение всего процесса деформирования образца, а также интенсивные импульсы ЕЭМИ, которые по времени на 0,5–0,8 с предвещали момент полного разрушения образца (рис. 5). Экстраполируя полученные данные на натурные условия горной выработки, можно предположить, что при возникновении неконтролируемого деформирования вмещающего массива коренных глин и начале формирования зоны вывала породы из забоя, эти процессы могут быть заблаговременно идентифицированы.

Ограничения исследований и обобщение результатов

Различия в параметрах полученных импульсов в ходе как лабораторных, так и натуральных экспериментов, являются темой отдельной работы. Учесть в рамках данной статьи все особенности сигналов, такие как количество импульсов в единицу времени, формы этих импульсов, их частотную и амплитудную характеристики при разных условиях измерений, не представляется возможным, эти работы продолжаются.

Несмотря на то что натурные измерения проводились достаточно продолжительное время на целом ряде строящихся объектов, зафиксировать непосредственно развитие опасного геомеханического процесса в массиве коренных глин в ходе проходческих работ не удалось. Вместе с тем полученные результаты показывают, что существует очевидная взаимосвязь между динамическими воздействиями на разрабатываемый массив коренных верхнекотлинских глин, геомеханическими процессами перераспределения напряженно-деформированного состояния в этом массиве и появлением ярких импульсов электромагнитного излучения на регистрируемых сигналах ЕЭМИ, являющихся электромагнитным откликом среды. Эти выводы подтверждаются и лабораторными испытаниями образцов.

Заключение

Результаты, полученные в ходе настоящей работы, являются важными предпосылками возможности выполнения оперативного прогноза опасных геомеханических процессов и явлений при строительстве подземных сооружений метрополитена в Санкт-Петербурге. Дальнейшая более углубленная оценка потенциальной возможности прогноза опасных геомеханических процессов и явлений в массиве верхнекотлинских коренных глин требует выполнения массовых экспериментальных натурных и лабораторных исследований.

На данном этапе предложением по практическому применению может быть разработка формализованного протокола измерений в процессе проходки горных выработок и набора статистического массива экспериментальных данных для дальнейшего анализа.



Список литературы

1. Бахарев Т.С., Жамойда В.А., Зубарев С.Э., Кляйн Й., Мишин В.И., Могиленко Ю.А. и др. *Геологический атлас Санкт-Петербурга*. СПб.: Комильфо; 2009. 57 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geologicheskii-atlas-sankt-peterburga.pdf>
2. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. *Развитие городов и геотехническое строительство*. 2011;(1):1–47. Режим доступа: <http://urban-development.ru/2011/2.pdf>
3. Кулагин Н.И. (ред.) *Размыв: история преодоления*. М.: ТА Инжиниринг; 2005. 119 с.
4. Лавренко С.А., Чуприн А.В., Дунаев А.А., Ракитин И.В. Обоснование эффективности трехмассовых ударных систем для ударных исполнительных органов при проходке выработок метро Санкт-Петербурга. В кн.: *Высокие технологии и инновации в науке: сборник избранных статей Международной научной конференции, г. Санкт-Петербург, 29 марта 2020 г.* СПб.: ГНИИ Гуманитарный национальный исследовательский институт «Нацразвитие»; 2020. С. 115–120.
5. Власов С.Н., Маковский Л.В., Меркин В.Е. *Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов*. 2-е изд. М.: ТИМР; 2000. 201 с.
6. Протосеня А.Г., Алексеев А.В., Вербило П.Э. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива. *Записки Горного института*. 2022;254:252–260. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.26>
7. Трушко В.Л., Шоков А.Н. Геомеханическое обоснование устойчивости лба забоя выработок большого сечения в протерозойских глинах. *Записки Горного института*. 2012;195:146–148. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/6122>
8. Беляков Н.А., Карасев М.А. Анализ влияния опережающего крепления лба забоя тоннеля анкерами на развитие геомеханических процессов в породном массиве. В кн.: *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации*. М.: Академическая наука; 2015. С. 120–127.
9. Лебедев М.О., Карасев М.А., Беляков Н.А. Влияние крепления лба забоя тоннеля на развитие геомеханических процессов в породном массиве. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2016;(3):24–32.
10. Лебедев М.О., Протосеня А.Г., Карасев М.А., Беляков Н.А. *Способ крепления лба забоя тоннеля*. Патент № 2723422 РФ. Опубл. 11.06.2020. Бюл. № 17.
11. Карасев М.А. *Прогноз геомеханических процессов в слоистых породных массивах при строительстве подземных сооружений сложной пространственной конфигурации в условиях плотной городской застройки: дис. ... д-ра техн. наук*. СПб.; 2017. 307 с.
12. Лебедев М.О., Романевич К.В., Басов А.Д. Оценка взаимного влияния подземных сооружений метрополитена при строительстве и эксплуатации. *Геотехника*. 2018;10(1–2):82–92.
13. Tani T., Koga Y., Hayasaka T., Honma N. A novel watcher system for securing works at tunnel face. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (eds) *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art. Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3–9, 2019, Naples, Italy*. CRC Press; 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429424441>
14. Zhang L., Chao W., Liu Z., Cong Y., Wang Z. Crack propagation characteristics during progressive failure of circular tunnels and the early warning thereof based on multi-sensor data fusion. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2022;8(5):172. <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00482-3>
15. Sharma S.K., Chauhan V.S., Sinapius M. A review on deformation-induced electromagnetic radiation detection: history and current status of the technique. *Journal of Materials Science*. 2021;56(7):4500–4551. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05538-x>
16. Безродный К.П., Исаев Ю.С., Басов А.Д., Романевич К.В. Проблемы оценки напряженно-деформированного состояния горных пород методом ЕЭМИ. В кн.: *Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: труды Всероссийской конференции*. Новосибирск: Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН; 2011. Т. 1. С. 233–238.
17. Frid V., Wang E.Y., Mulev S.N., Li D.X. The fracture induced electromagnetic radiation: approach and protocol for the stress state assessment for mining. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021;39(4):3285–3291. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01682-6>
18. Романевич К.В., Басов А.Д. О возможности применения метода регистрации естественного электромагнитного излучения для контроля устойчивости выработок Петербургского метрополитена. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2016;3(1):163–167.
19. Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P., Wang S. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018;15(4):1093–1103. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa26d>

References

1. Bakharev T.S., Zhamoida V.A., Zubarev S.E., Klein J., Mishin V.I., Mogilenko Yu.A. et al. *Geological atlas of St. Petersburg*. St. Petersburg: Komilfo; 2009. 57 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geologicheskii-atlas-sankt-peterburga.pdf>
2. Dashko R.E., Aleksandrova O.Yu., Kotyukov P.V., Shidlovskaya A.V. Peculiarities of engineering-geological conditions of St. Petersburg. *Razvitie gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo*. 2011;(1):1–47. (In Russ.) Available at: <http://urban-development.ru/2011/2.pdf>
3. Kulagin N.I. (ed.) *Razmyv: a story of overcoming*. Moscow: TA Inzhiniring; 2005. 119 p. (In Russ.)
4. Lavrenko S.A., Chuprin A.V., Dunaev A.A., Rakitin I.V. Substantiation of effective three-mass strike systems for shock executive body in penetration mining of Saint Petersburg metro. In: *High technologies and innovations in science: collection of selected articles of the International Scientific Conference, St. Petersburg, March 29, 2020*. St. Petersburg: Humanitarian National Research Institute “Natsrazvitie”; 2020, pp. 115–120. (In Russ.)
5. Vlasov S.N., Makovsky L.V., Merkin V.E. *Emergencies during the construction and operation of transport tunnels and subways*. 2nd ed. Moscow: TIMR; 2000. 201 p. (In Russ.)
6. Protosenya A.G., Alekseev A.V., Verbilo P.E. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:252–260. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.26>



7. Trushko V.L., Shokov A.N. Geomechanical substantiation of stability of the tunnel's face which situated in the proterozoic clay's. *Journal of Mining Institute*. 2012;195:146–148. (In Russ.) Available at: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/6122>
8. Belyakov N.A., Karasev M.A. Analysis of the influence of advanced fastening of the forehead of the tunnel face with anchors on the development of geomechanical processes in the rock mass. In: *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation*. Moscow: Akademicheskaya nauka; 2015, pp. 120–127. (In Russ.)
9. Lebedev M.O., Karasev M.A., Belyakov N.A. The influence of the front of the tunnel face support on the development of geomechanical processes at rock massif. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2016;(3):24–32. (In Russ.)
10. Lebedev M.O., Protosenya A.G., Karasev M.A., Belyakov N.A. *The method of fastening the forehead of the tunnel face*. Patent No. 2723422 RF. (In Russ.)
11. Karasev M.A. *Forecast of geomechanical processes in layered rock massifs during the construction of underground structures of complex spatial configuration in conditions of dense urban development*. Doctor's thesis. St. Petersburg; 2017. 307 p. (In Russ.)
12. Lebedev M.O., Romanevich K.V., Basov A.D. Mutual influence of underground metro facilities assessment during construction and operation. *Geotechnics*. 2018;10(1–2):82–92. (In Russ.)
13. Tani T., Koga Y., Hayasaka T., Honma N. A novel watcher system for securing works at tunnel face. In: Peila D., Viggiani G., Celestino T. (eds) *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art. Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC 2019), May 3–9, 2019, Naples, Italy*. CRC Press; 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429424441>
14. Zhang L., Chao W., Liu Z., Cong Y., Wang Z. Crack propagation characteristics during progressive failure of circular tunnels and the early warning thereof based on multi-sensor data fusion. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2022;8(5):172. <https://doi.org/10.1007/s40948-022-00482-3>
15. Sharma S.K., Chauhan V.S., Sinapius M. A review on deformation-induced electromagnetic radiation detection: history and current status of the technique. *Journal of Materials Science*. 2021;56(7):4500–4551. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05538-x>
16. Bezrodny K.P., Isaev Yu.S., Basov A.D., Romanevich K.V. Problems of assessing the stress-strain state of rocks by the EMR method. In: *Geodynamics and stress state of the Earth's interior: Proceedings of the All-Russian Conference*. Novosibirsk: Institute of Mining N. A. Chinakal SO RAN; 2011. Vol. 1, pp. 233–238. (In Russ.)
17. Frid V., Wang E.Y., Mulev S.N., Li D.X. The fracture induced electromagnetic radiation: approach and protocol for the stress state assessment for mining. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021;39(4):3285–3291. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01682-6>
18. Romanevich K.V., Basov A.D. Applicability of natural electromagnetic emission recording method to stability control in tunnels of Saint Petersburg subway. *Fundamental and Applied Issues of Mining*. 2016;3(1):163–167. (In Russ.)
19. Song D., Wang E., He X., Jia H., Qiu L., Chen P., Wang S. Use of electromagnetic radiation from fractures for mining-induced stress field assessment. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2018;15(4):1093–1103. <https://doi.org/10.1088/1742-2140/aaa26d>

Информация об авторах

Лебедев Михаил Олегович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru

Романевич Кирилл Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, ОАО «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: romanevichkirill@gmail.com

Мулёв Сергей Николаевич – директор по науке, АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: smuleva@yandex.ru

Старников Валерий Николаевич – инженер геофизической лаборатории, АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sibirval@mail.ru

Information about the authors

Mikhail O. Lebedev – Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director for Research Work OJSC “Scientific Research, Design and Survey Institute “Lenmetrogioprotrans”, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: lebedev-lmgt@yandex.ru

Kirill V. Romanevich – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Research Department of OJSC “Scientific Research, Design and Survey Institute “Lenmetrogioprotrans”, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: romanevichkirill@gmail.com

Sergey N. Mulev – Director for Science, JSC “Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Interdisciplinary Research Center “VNIMI”, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: smuleva@yandex.ru

Valery N. Starnikov – Engineer, Geophysical Laboratory, JSC “Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying – Interdisciplinary Research Center “VNIMI”, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: sibirval@mail.ru

Article info

Received: 15.12.2022

Revised: 23.01.2023

Accepted: 26.01.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.12.2022

Поступила после рецензирования: 23.01.2023

Принята к публикации: 26.01.2023