

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СКАЛЬНЫХ ОТКОСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

АБРАМОВ Н. Н., МЕЛИХОВ М. В.

Рассмотрены проблемы обеспечения безопасности скальных откосов на объектах капитального строительства в условиях природных и техногенных воздействий. В развитие этого направления разработан современный методический подход геотехнического сопровождения работ по защите склонов от скально-обвальных явлений. Отличием предложенного подхода является комплексность решения задачи, заключающаяся в том, что на основе полученных данных о фактическом состоянии породного массива путем натурного сейсмомониторинга и результатов численного моделирования его геомеханического состояния используются графо-аналитические методы технико-экономического анализа рекомендуемых вариантов крепи. Это дает возможность оперативно оценивать степень аварийности обследуемого объекта для эффективного осуществления мероприятий по повышению его безопасности. Методические приемы реализованы на действующих предприятиях и могут быть применены на других объектах в условиях скальных массивов.

Ключевые слова: объекты капитального строительства; скально-обвальные явления; численная модель; геотехнический мониторинг; инженерная защита.

В период эксплуатации объектов капитального строительства нередко возникают проблемы, связанные с обеспечением геодинамической безопасности прилегающих к ним склонов от проявлений геологических и техногенных процессов. Мировые статистические данные свидетельствуют о росте показателей смертности людей: в частности, число погибших от оползней в первом десятилетии нынешнего столетия выросло в 8–10 раз [1]. В горном деле смертельный травматизм вследствие деформаций выработок стабильно лидирует среди прочих причин и составляет 24 % от общего количества аварий [2]. Стоит отметить, что только крупные по масштабу аварии получают широкую огласку и они, как правило, происходят при комплексном сочетании факторов, поэтому возникает сложность в установлении истинных причин аварий. Для борьбы с негативным воздействием геологических процессов применяются специальные технологии инженерной защиты. В обеспечении их эффективной и надежной работы по-прежнему велика роль человеческого фактора. Зачастую непрофессиональный уровень принимаемых проектных решений, включая отсутствие контроля за их исполнением, в силу разных причин влечет за собой преждевременный отказ сооружений. Гарантией качества проводимых мероприятий может служить только должный уровень их геотехнического сопровождения. Таким образом, проблема обеспечения геодинамической безопасности склонов при эксплуатации объектов капитального строительства является актуальной научно-практической задачей и в условиях

Абрамов Николай Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией теории и технологии подземного строительства. 184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24, Горный институт КНЦ РАН. E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru

Мелихов Михаил Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории теории и технологии подземного строительства. 184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24, Горный институт КНЦ РАН. E-mail: mmelikhov@inbox.ru

современного рынка нуждается в совершенствовании подходов для правильного и оперативного принятия проектных решений.

Методика геотехнического сопровождения работ по инженерной защите склонов. Авторами предложен современный методический подход геотехнического сопровождения работ по инженерной защите склонов от скально-обвальных явлений. Его отличительной особенностью является комплексность использования методов геомониторинга породного массива, современных средств моделирования его геомеханического состояния и методов технико-экономического анализа способов защиты. Блок-схема предложенного алгоритма действий представлена на рис. 1.

Методология геомониторинга основывается: на первичной экспертной оценке состояния склонов с применением балльной шкалы опасности объекта [3]; на результатах визуального осмотра; на использовании методик инструментальных наблюдений для оценки геомеханических характеристик пород, нарушенности массива и качества межблоковых контактов массива с выделением различных по состоянию участков, методик геодезических и высокоточных деформационных наблюдений для оценки подвижек породных блоков на потенциально опасных участках склонов [4, 5]; методик обоснования параметров крепи [6–8] с оценкой ее эффективности.

Применение современных средств численного моделирования в решении данной задачи позволяет получить представление о состоянии объекта по усредненным упругим и плотностным характеристикам, а также выполнить прогнозную оценку его напряженно-деформированного состояния (НДС) и определить коэффициент запаса устойчивости (КЗУ) после проведения инженерно-технических мероприятий. При этом применяется стадийный подход к моделированию объекта. Изначально рассчитывается общая устойчивость породного массива, что позволяет скорректировать методику проведения натурных наблюдений. После сопоставления фактических результатов мониторинга с геомеханической моделью ее наиболее опасные зоны детализируются. Далее, с учетом полученных данных и реальных деформационных процессов, выбираются и обосновываются рациональные параметры конструкции рекомендуемой крепи. По результатам численного моделирования определяются изменения НДС и КЗУ породного массива при выбранных параметрах крепи, по которым оценивается эффективность проводимых мероприятий.

Опыт реализации разработанного методического подхода. Приведен пример реализации разработанного подхода при укреплении породного гнейсо-гранитового склона водоотводящего канала ГЭС на Кольском полуострове.

По общей первичной оценке геомеханического состояния вмещающих пород, выполненной в численной модели на основе исходных проектных данных о геологическом строении вмещающего массива, состояние склонов на исследуемом объекте стабильно. Расчетный КЗУ породного массива составил 1,35.

Однако на общем благоприятном фоне был выделен участок склона, подсеченный структурной трещиной естественного происхождения. На этом участке также наблюдалась хорошо развитая система трещин, образованная вследствие некачественного проведения буровзрывных работ при формировании склона. Совокупное воздействие природных и техногенных факторов создало аварийную ситуацию, проявляющуюся в вывалообразовании скальных обломков на обнажениях склона при активизации сезонных процессов выветривания или вымывания водой материала трещин.

По результатам экспертной балльной оценки степени опасности, основывающейся на учете инженерно-геологических характеристик породного массива,

обследуемый участок склона отнесен ко II классу, т. е. к опасному. Данный класс предусматривает выполнение мероприятий по профилактике и креплению ослабленных породных массивов.

Оценка фактического состояния массива и состояния трещинных контактов выполнена с использованием метода сейсмической пространственно-временной томографии (СПВТ), а также современных деформационных и геодезических методов контроля подвижек отдельных блоков массива. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены томограммы скоростей продольных V_p и поперечных V_s сейсмических волн, полученные по профилям при глубинном сейсмопрофилеировании склона. На представленных профилях наглядно прослеживаются структурные особенности вмещающего массива, определяющие его устойчивость.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма геотехнического мониторинга состояния скальных откосов

В качестве критериев состояния массива использованы хорошо себя зарекомендовавшие в различных горно-геологических условиях геофизические показатели нарушенности пород [4, 5]:

$$B_e = (V_{p0}/V_{pi})^2 - 1; \quad K = \mu_i/\mu_0 = f\left(\left(V_s/V_p\right)^2\right),$$

где V_{p0} , V_{pi} – скорости продольных волн в монолитном и нарушенном массиве; μ_i , μ_0 – коэффициент Пуассона для нарушенного и сохранного массивов соответственно; V_s – скорость поперечной волны. Величины V_{p0} и μ_0 определены по результатам измерений скоростей продольных и поперечных волн в лабораторных

условиях для представительной выборки отобранных образцов (для конкретного случая приняты: $V_{p0} = 5,67$ км/с; $\mu_0 = 0,27$). В физическом отношении показатель B_e характеризует снижение скоростей продольных волн на нарушенных участках массива при его просвечивании. Показатель K демонстрирует вариации коэффициента Пуассона, вызванные изменением состояния отдельных участков (например, намоканием), вмещающих трещинные контакты заполнителя, по сравнению с величиной μ_0 , характерной для ненарушенного массива естественной влажности. Данный показатель определяется по соотношению скоростей V_s/V_p (рис. 2, б, д).

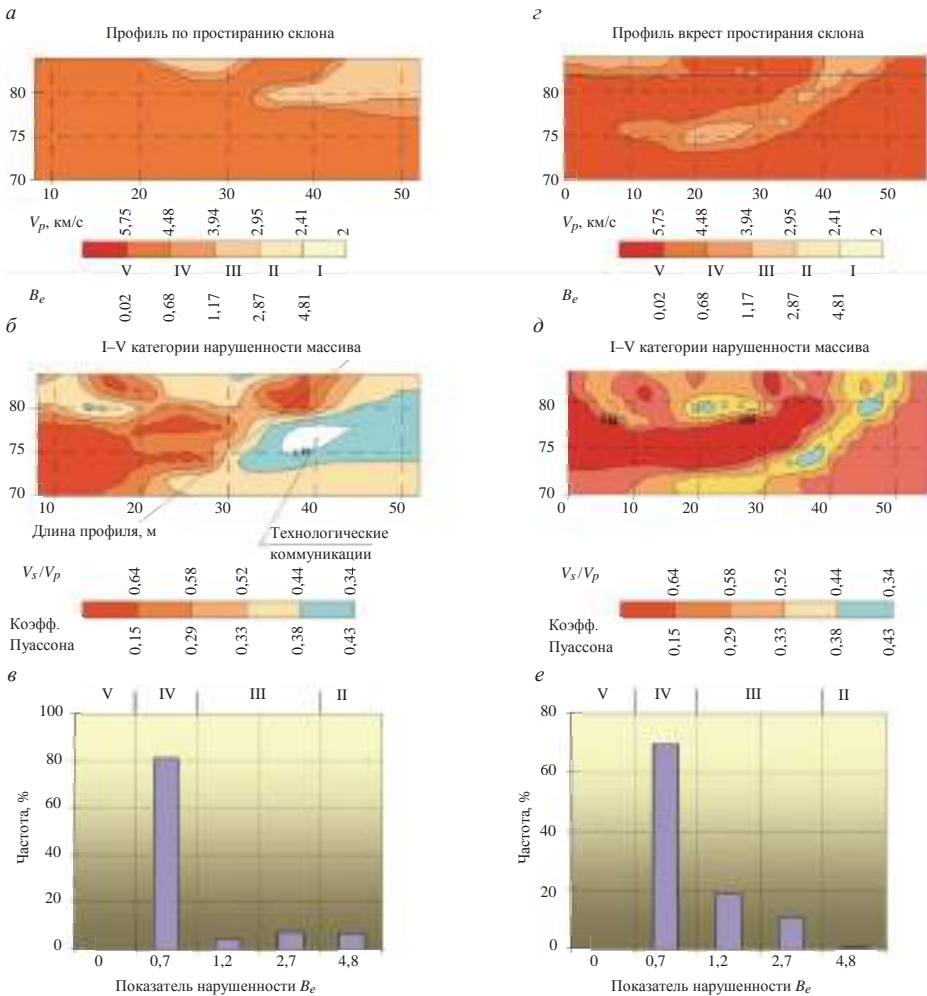


Рис. 2. Томограммы скоростей продольных сейсмических волн V_p (а, z), категорирование разреза по нарушенности B_e (в, е) и распределение в разрезе соотношений V_s/V_p и коэффициента Пуассона (б, д) по профилям

Интерпретация результатов натурного геомониторинга позволила установить объемы массива, подлежащие закреплению. Это, в первую очередь, приповерхностная зона объемом 204 м³, примыкающая к обнажению канала (зона № 1) по правому берегу. Выявленные более глубокие структурные нарушения (рис. 2, д) на состояние устойчивости откосов по показателям B_e и $K = 1,0-1,18$ не влияют. Результаты сейсмотомографического мониторинга подтверждены результатами организованных на измерительном полигоне береговых откосов деформационных наблюдений за мелко- и среднеблоковыми смещениями на малых базах

с помощью высокоточных струнных дистометров JSETH (Швейцария), а также долгосрочным геодинамическим контролем смещений по геодезическим маркам на крупных структурных нарушениях. Действующие со стороны массива сдвигающие характеристики, учет которых необходим при обосновании крепи, определены с помощью инструментов моделирования объекта.

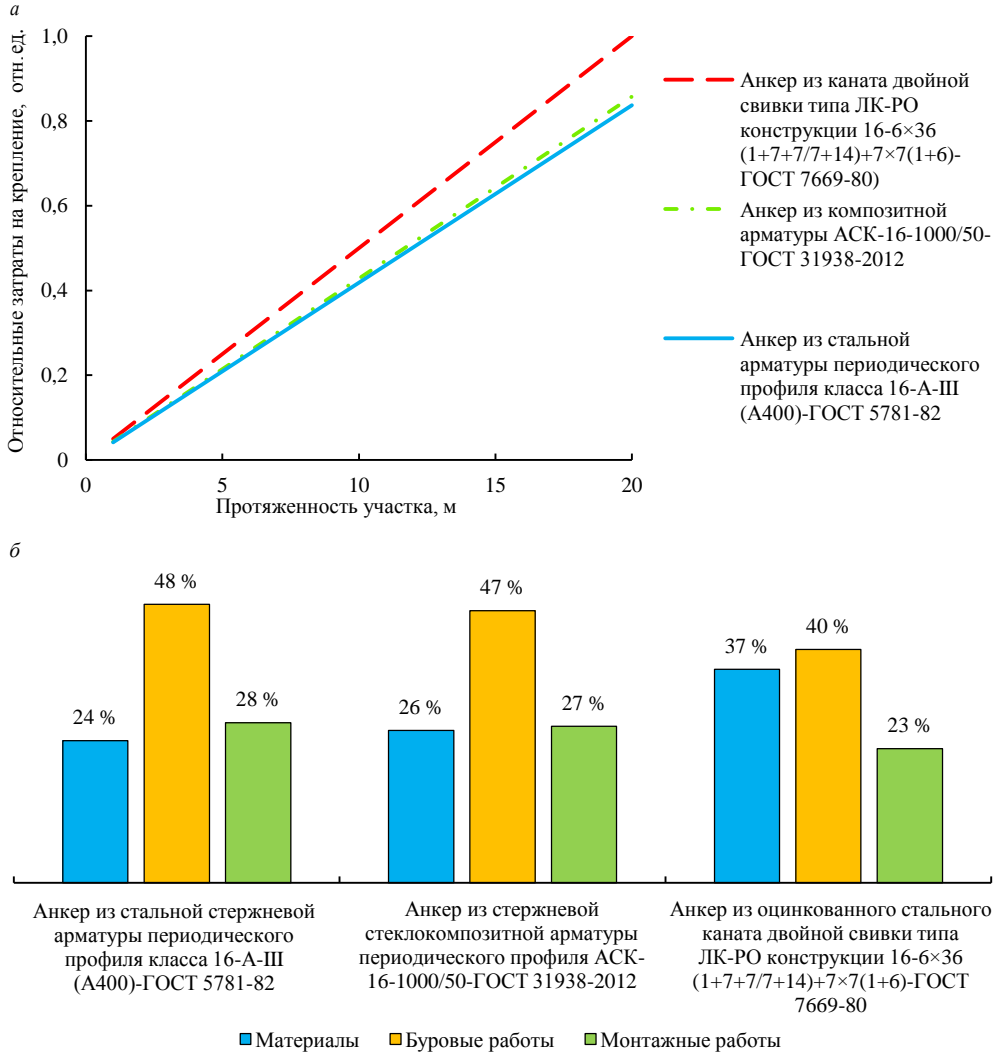


Рис. 3. Сравнительная технико-экономическая оценка вариантов крепления склона:
а – график зависимости общих относительных затрат по креплению от протяженности участка; *б* – соотношение статей затрат на крепление

Выбор способа инженерной защиты склона осуществлялся по его целевому назначению на основе технико-экономического сравнения затрат по наиболее перспективным вариантам с использованием средств компьютерного моделирования. Результаты графоаналитического сравнения вариантов защиты, представленные на рис. 3, позволили обосновать наиболее экономичную крепь с оптимальными конструктивными параметрами. Конкретный выбор способа инженерной защиты остается за проектными и эксплуатирующими организациями.

Завершающим этапом предложенного методологического подхода к защите опасного по устойчивости участка склона явилась оценка эффективности пред-

ложенных мероприятий. На стадии проектирования, как это отмечалось ранее, эту задачу решают с использованием численного моделирования в несколько этапов. На рис. 4 приведен пример ее решения для контролируемого склона в численной конечно-элементной модели.

По результатам моделирования установлено, что общий КЗУ массива пород при выбранном способе и параметрах крепления за счет перераспределения напряжений в зоне заделки элементов крепи увеличится на 11,2 %. После монтажа анкеров не ожидается пластификации пород вблизи их оголовок и корней, а возникающие напряжения в районе закрепленных пород способствуют повышению устойчивости, необходимой для обеспечения долговременной безопасности объекта.

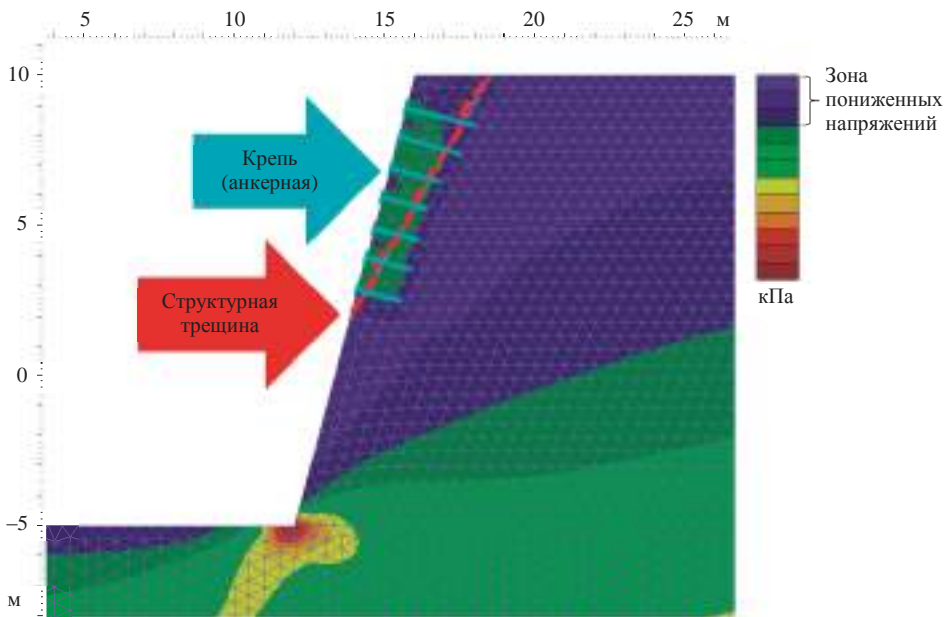


Рис. 4. Результаты численного моделирования в решении задач по укреплению склона

Таким образом, реализованный на действующем предприятии методический подход показал свою эффективность в решении задач по обеспечению геодинамической безопасности склонов. По аналогии подход может быть применен на других объектах капитального строительства в условиях скальных породных массивов.

Итак, в задачах инженерной защиты неустойчивых скальных склонов комплексное использование неразрушающих методов натурального геомониторинга состояния массива пород, методов технико-экономического анализа перспективных вариантов крепи и современных средств численного моделирования дает возможность оперативно оценивать степень аварийности объекта, а при необходимости выполнения мероприятий по повышению безопасности объекта – минимизировать экономические затраты на их проведение.

Предложенная методика геотехнического мониторинга, заключающаяся в использовании неразрушающих методов деформационно-геофизического контроля с учетом разработанных критериев оценки нарушенности пород и качества межтрещинных контактов, позволяет оперативно и с высокой надежностью локализовать и оценить мощность нарушенной зоны скального массива и его блочность, а также состояние межблоковых контактов до и после закрепления пород.

При обосновании технологии инженерной защиты неустойчивых склонов использование методов численного моделирования объекта, заверенных результатами натурных наблюдений, создает возможность рационального выбора параметров технологии с учетом воздействия ее элементов на породный массив.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Petley D. Global patterns of loss of life from landslides // *Geology*. 2012. Vol. 40. Issue 10. P. 927–930.
2. Patrick MacNeill. International Mining Fatality Database. Australia: NSW Department, 2008. 33 p.
3. Руководство по проектированию противооползневых и противообвальных защитных сооружений. М: Минстрой, ВНИИТС, 1983. 119 с.
4. Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А. Геофизический мониторинг при строительстве и эксплуатации объектов горнопромышленного комплекса и гидроэнергетики. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. 177 с.
5. Абрамов Н. Н., Епимахов Ю. А. Изучение изменчивости состояния и структуры массива пород в условиях вибрационных воздействий при эксплуатации дробильных комплексов // *Известия вузов. Горный журнал*. 2015. № 6. С. 79–85.
6. Жиров Д. В., Мелихова Г. С., Решетняк С. П., Рыбин В. В., Мелихов М. В. Инженерно-геологическое обоснование решений по закреплению и стабилизации скальных массивов пород в карьерах // *Глубокие карьеры*. ГИАБ. 2015. Спец. вып. № 56. С. 164–174.
7. Мелихов М. В. Принцип выбора способа защиты оборудования и персонала от падающих породных отделистостей в условиях крутых бортов карьера // *Государство и горная промышленность. Региональная практика и новые тенденции: сб. науч. тр. Мурманск: Северная ТПП, 2013. С. 144–151.*
8. Решетняк С. П., Мелихов М. В. Сравнительная экономическая оценка анкерного крепления в условиях рудного карьера АО «Ковдорский ГОК» // *Глубокие карьеры*. ГИАБ. 2015. Спец. вып. № 56. С. 378–389.

Поступила в редакцию 6 февраля 2018 года

FEATURES OF PROVIDING GEODYNAMIC SAFETY OF THE ROCK SLOPES DURING OPERATION OF CAPITAL CONSTRUCTION OBJECTS

Abramov N. N., Melikhov M. V. – Mining Institute KSC RAS, Apatites, the Russian Federation. E-mail: abramov@goi.kolasc.net.ru

The above material deals with the problems of safety of rock slopes at capital construction objects in conditions of natural and technogenic influences. In the development of this direction, the modern methodical approach of geotechnical support of works on protection of slopes from rockfall events is developed. The peculiarity of the proposed approach is the complexity of the problem solution, which consists in the fact that based on the data about the actual state of rock mass by in-situ seismic monitoring and the results of its geomechanical condition numerical modelling, graphic-analytical methods of technical and economic analysis of the recommended lining options are used. This gives the opportunity to quickly estimate the emergency level of the investigated object for the effective implementation of measures to improve its security. Instructional techniques are implemented in existing plants and can be applied on other objects in rock mass conditions.

Key words: capital construction objects; rockfall events; numerical model; geotechnical monitoring; engineering protection.

REFERENCES

1. Petley D. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 2012, vol. 40, issue 10, pp. 927–930.
2. Patrick MacNeill. International Mining Fatality Database. Australia: NSW Department, 2008. 33 p.
3. *Rukovodstvo po proektirovaniu protivopolznevyykh i protivooobval'nykh zashchitnykh sooruzhenii* [Guideline for the design of landslide and rockfall protection structures]. Moscow, Minstroj, VNIITS Publ., 1983. 119 p.
4. Abramov N. N., Epimakhov Iu. A. *Geofizicheskii monitoring pri stroitel'stve i ekspluatatsii ob'ektov gornopromyshlennogo kompleksa i gidroenergetiki* [Geophysical monitoring under the construction and exploitation of the objects of mining industrial complex and hydroenergetics]. Apatites, KSC RAS Publ., 2010. 177 p.
5. Abramov N. N., Epimakhov Iu. A. [Examination of rock massif structure and state variability in conditions of vibrational impacts under drilling complexes exploitation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2015, no. 6, pp. 79–85. (In Russ.)
6. Zhiron D. V., Melikhova G. S., Reshetniak S. P., Rybin V. V., Melikhov M. V. [Engineering-geological substantiation of solutions on open pit rock mass strengthening and stabilization]. *Glubokie kar'ery. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). Spetsial'nyi vypusk – Deep Open Pits. Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). Special Edition*, 2015, no. 56, pp. 164–174. (In Russ.)

7. Melikhov M. V. [The principle of selecting the method of protecting equipment and staff from falling rock blocks in conditions of steep edges of an open pit]. *Gosudarstvo i gornaia promyshlennost'. Regional'naia praktika i novye tendentsii: sb. nauch. tr* [Collection of Works "State and mining industry. Local practice and new trends"]. Murmansk, Severnaya TPP Publ., 2013, pp. 144–151. (In Russ.)
8. Reshetniak S. P., Melikhov M. V. [Comparative economic estimation of anchor support in conditions of ore mine AO Kovdorsky GOK]. *Glubokie kar'ery. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhniceskii zhurnal). Spetsial'nyi vypusk – Deep Open Pits. Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). Special Edition*, 2015, no. 56, pp. 378–389. (In Russ.)
-