

УДК 622.861:625.131.7:004.94

Мелихов Михаил Владимировичкандидат технических наук, научный сотрудник,
Горный институт

Кольского научного центра РАН,

184209, Мурманская обл.,

г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24

e-mail: mmelikhov@inbox.ru**ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА
ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ
МЕРОПРИЯТИЙ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ
ЗАЩИТЕ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ***Аннотация:*

В настоящее время одним из основных инженерно-технических способов решения проблемы, связанной с обеспечением безопасности открытых горных работ при существующем риске развития опасных геологических процессов, является внедрение различных технологий инженерной защиты. Как показывает практика, непрофессиональный уровень принимаемых проектных решений зачастую приводит к преждевременному отказу, а иногда и полному разрушению конструкций защитных сооружений со всеми вытекающими отсюда экономическими последствиями. Выполнение комплекса мер, при котором обеспечивается достаточность и полнота проводимых исследований, строгое соответствие и соблюдение проектных решений требованиям действующих норм и правил (в том числе соблюдение квалификационных требований), должный уровень надзора со стороны ответственных организаций и должностных лиц с обязательным осуществлением геотехнического сопровождения на всех этапах строительства служит гарантией качества противоаварийных работ. Широко применяемые при геотехническом мониторинге защитных конструкций визуальные методы контроля по объективным причинам не дают высоко достоверной качественной и количественной информации о реальном состоянии геосистемы «инженерная защита - породный массив» и прогноза его изменения во времени. В решении поставленной задачи только комплексное использование информационных технологий и данных инструментального геомониторинга способствует правильному (а в некоторых случаях и оперативному) принятию технических решений с обеспечением высокого качества их исполнения. Представленная в данной статье экспресс-методика геотехнического сопровождения мероприятий по инженерной защите в скальных массивах, заключающаяся в комплексности использования современных междисциплинарных методов геомониторинга, компьютерного моделирования и технико-экономического обоснования, направлена на повышение эффективности и надежности принимаемых проектных решений на основе малобюджетных исследований.

Ключевые слова: скальный массив, опасные геологические процессы, инженерная защита, геотехническое сопровождение, экспресс-метод, надежность и отказ крепи, геомониторинг, технико-экономическое обоснование, компьютерное моделирование, малобюджетные исследования.

DOI: 10.25635/2313-1586.2020.01.038

Melikhov Mikhail V.Candidate of Technical Sciences, Research Worker,
Mining Institute – Subdivision

of the Federal Research Centre «Kola Science

Centre of the Russian Academy of Sciences»,

184209 Apatity, Murmansk region, 24 Fersman Str.

e-mail: mmelikhov@inbox.ru**EXPRESS-TECHNIQUE
OF GEOTECHNICAL SUPPORT
OF MEASURES ON ENGINEERING
PROTECTION IN ROCK MASSIVES***Abstract:*

Currently, one of the main engineering and technical ways to solve the problem associated with the safety of open-pit mining at the existing risk of dangerous geological processes is the introduction of various engineering protection technologies. As practice shows, the unprofessional level of design decisions often leads to premature failure, and sometimes complete destruction of structures of protective structures with all the ensuing economic consequences. The implementation of a set of measures, which ensures a sufficient volume and completeness of the research, strict accordance and observation with design solutions, the requirements of current standards and regulations (including observation with qualification requirements), the proper level of supervision, maintenance at all stages of construction could guarantee a quality of emergency response. Visual methods of control widely used for geotechnical monitoring of protective structures for objective reasons do not provide highly reliable qualitative and quantitative information about the real state of the “engineering protection - rock mass” geosystem and forecast its changing over time. In solving this task, only the integrated use of information technologies and data of instrumental geomonitring contributes to the correct (and in some cases, operational) technical decision-making with ensuring the high quality of their implementation. The express-techniques of geotechnical support of engineering protection measures in rock massifs presented in this article, which consists in the comprehensive use of modern interdisciplinary geomonitring methods, computer modeling and feasibility studies, is aimed at improving the efficiency and reliability of design decisions made on the basis of low-budget studies.

Key words: rock mass, geological hazard processes, engineering protection, geotechnical assistance, express-method, reliability and failure of the support, geomonitring, feasibility study, computer modeling, low-budget research.

Введение

Современные тенденции формирования глобального рынка инженерной защиты (ИЗ) направлены, главным образом, на расширение инфраструктуры и сохранение ее наиболее значимых объектов. По данным международной консалтинговой компании *McKinsey&Company*, в ближайшие 10 – 15 лет только для поддержания существующей глобальной дорожно-транспортной системы необходимо будет затратить не менее 57 трлн американских долларов [1]. Можно констатировать, что при интенсивном освоении отдельных территорий нашей планеты обеспечение природной и техногенной безопасности уже не представляется возможным без проведения специальных инженерно-технических мероприятий. Сегодня крупнейшими инвестиционными площадками, безусловно, являются развитые страны, такие как США, некоторые страны Европейского союза, Китай и Япония. В России данная сфера пока находится в начальной стадии развития, тем не менее, согласно проведенным исследованиям маркетингового агентства *Discovery Research Group*, объем рынка ИЗ уже достигает 39,9 млрд руб. при ежегодном росте до 20 % [2]. Инновационная деятельность компаний-производителей ИЗ прежде всего связана с разработкой высокотехнологических решений (рис. 1) в дорожной и горнодобывающей отраслях, гражданском и гидротехническом строительстве [3 – 7]. Лидирующему положению всемирно известных компаний во многом способствует производство и реализация широкого ассортимента собственной конкурентоспособной продукции, создаваемой при активном сотрудничестве с частными или государственными научно-исследовательскими и проектными организациями, в том числе в области IT-технологий и робототехники.

Анализ и оценка качества противоаварийных работ

Показателями качества противоаварийных работ являются

- достаточность и полнота проводимых исследований;
- строгое соответствие и соблюдение проектных решений требованиям действующих норм и правил, в том числе соблюдение квалификационных требований;
- должный уровень надзора со стороны ответственных организаций и должностных лиц с обязательным осуществлением геотехнического сопровождения на всех этапах строительства.

Преждевременный отказ ИЗ в большинстве случаев связан с непрофессиональным уровнем принимаемых проектных решений. Различают причины отказов защитных сооружений, допущенные на стадии проектирования и строительства. Первая группа вызвана слабой инженерно-геологической изученностью или полным отсутствием детальных изысканий, некачественными или совсем непригодными для характерных условий материалами и конструкциями, а вторая — низкой квалификацией персонала, слабым уровнем надзора и организации работ, отсутствием специализированного опыта у подрядной компании.

В качестве примера ниже приведен неудачный опыт внедрения ИЗ на карьерах, ведущих добычу железной руды в Северо-Западном регионе российской Арктики [8]. В период 2010 – 2013 гг. на рассматриваемых объектах был произведен экспериментальный монтаж разных анкерно-тросово-сетчатых систем зарубежного производства с использованием поверхностных и глубинных анкеров (рис. 2).

В первом случае (рис. 2 а) произошел частичный отказ навешенной на откос противокаменной системы вследствие критического смещения сетчатого полотна к основанию нижней бермы, что обусловлено изначально неправильным учетом расчетных баллистических характеристик проявляющегося на данном участке скально-обвального процесса при выборе параметров конструкции защитного сооружения.

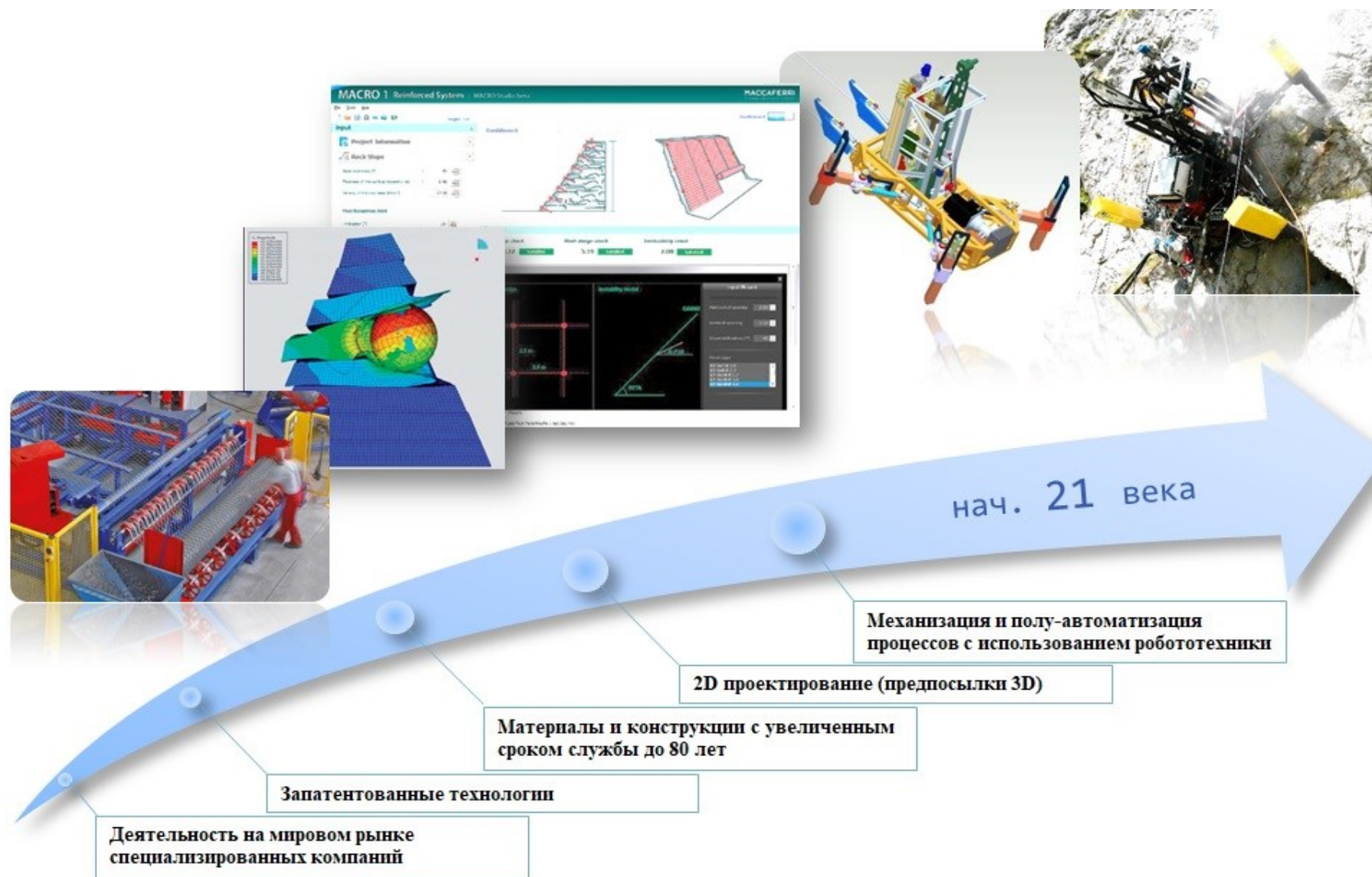


Рис. 1 – Краткая характеристика современного технического уровня в сфере инженерной защиты

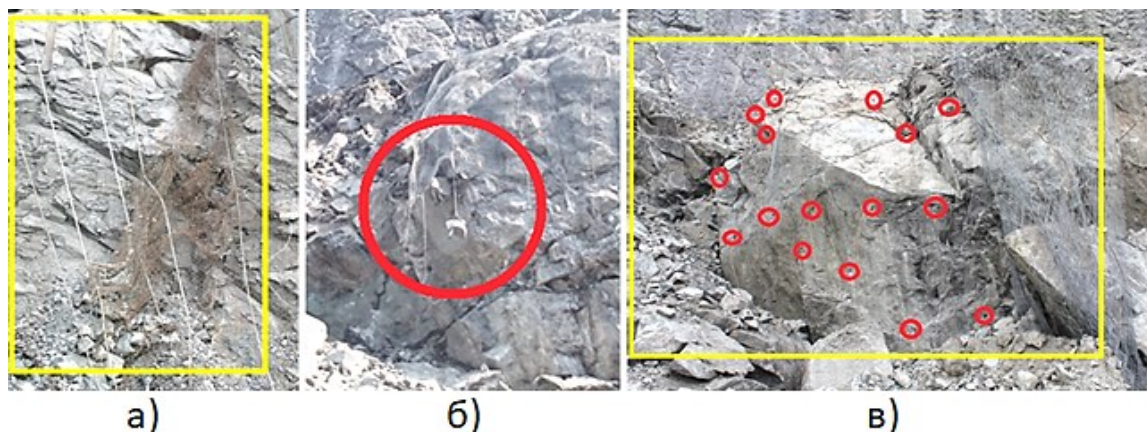


Рис. 2 — Неудачный опыт анкерно-тросово-сетчатого крепления на рудных карьерах в Северо-Западном регионе российской Арктики [8]:

● и ■ – «видимый» отказ анкеров и тросово-сетчатого покрытия
(фото: а - Решетняк С.П., б и в - Мелихов М.В.)

Во втором случае (рис. 2 б) наблюдался также частичный отказ поверхностной крепи в зоне повышенной трещиноватости породного массива. Группа из трех крайних малоглубинных несущих анкеров не выдержала фактических нагрузок из-за недостаточной их проектной глубины, в результате чего они были вырваны из породного массива вместе с замковой частью.

В третьем случае (рис. 2 в) допущенные ошибки в проектировании при выборе конструкций анкеров применительно к конкретным инженерно-геологическим и гидрологическим условиям, а также в технологии их монтажа привели к полному отказу крепи. Здесь были применены глубинные 20 – 25 –метровые анкеры с целью повышения устойчивости группы структурно нарушенных уступов. По результатам визуального обследования выявлено, что в локальных зонах на образовавшейся после разрушения поверхности откоса не наблюдались выходы отверстий буровых скважин, одна часть анкеров была срезана, а другая часть выдернута и деформирована. На рис. 2 в показан самый нижний уступ, доступ к верхним уступам полностью отсутствовал.

Причиной отказов ИЗ во всех вышеприведенных случаях явилось отсутствие должного научно-методического сопровождения. Целенаправленные детальные инженерные изыскания в районе опытно-промышленных участков не были проведены, а исходные данные для проектирования противообвальных сооружений взяты на основе предшествующих укрупненных исследований. Окончательная приемка результатов работ, за исключением последнего случая, осуществлена на основе визуального осмотра по завершении гарантийного срока стояния сооружений (на практике обычно он составляет 1 год). В последнем случае обрушение группы уступов вместе с анкерно-тросово-сетчатой крепью произошло на заключительной стадии работ и только по счастливому стечению обстоятельств не привело к чрезвычайной ситуации. Отсюда следует, что проведение геотехнического сопровождения мероприятий по ИЗ должно быть обязательным в обеспечении безопасности данного вида работ. Впоследствии разрушенные уступы на одном из приведенных карьеров подлежали разному в рамках оптимизации его границ, тем самым затраты ожидаемо не окупились по причине слабой обоснованности проектных решений.

В обеспечении надежности эксплуатируемых защитных сооружений геотехническое сопровождение должно быть обязательным на всех этапах работ: в процессе проектирования, монтажа, эксплуатации и реконструкции. В современном представлении организация геомониторинга предусматривает проведение комплексных и при необходимости дополнительных исследований [9]. Состав работ регламентируется дей-

ствующей нормативно-технической документацией и охватывает весь цикл существования сооружений ИЗ. Тем не менее конкретный перечень работ и применяемой материально-технической базы четко не регламентируется, чем на практике часто пользуются участники договорных сторон. Ключевыми факторами такого во многом неправильного подхода служит недобросовестная рыночная конкуренция или недостаточное финансирование проводимых исследований, что в итоге редко способствует приемлемому качеству противоаварийных мероприятий. Сегодня при мониторинге геосистемы «ИЗ – породный массив» по экономическим соображениям широко применяются визуальные методы контроля. Однако их использование весьма ограничено и не может являться основным методом контроля: по объективным причинам они не дают высоко достоверной качественной и количественной информации о реальном состоянии объекта и прогноза его изменения во времени. Следовательно, в решении поставленной задачи только комплексное использование современных информационных технологий и данных инструментального геомониторинга способствует правильному (а в некоторых случаях и оперативному) принятию инженерно-технических решений с обеспечением приемлемого качества их исполнения.

Экспресс-методика геотехнического сопровождения

Горным институтом КНЦ РАН была разработана экспресс-методика геотехнического сопровождения мероприятий по ИЗ в скальных массивах (рис. 3) [10], отличающаяся комплексностью использования современных междисциплинарных методов на основе натурального сейсмического и инструментально-деформационного геомониторинга, информационных технологий пространственно-временного моделирования геомеханического состояния породного массива (первичного, детализированного и прогнозного после производства работ), а также технико-экономического обоснования проектных решений, что позволяет оперативно оценивать степень аварийности обследуемого объекта капитального строительства при выборе эффективных и надежных инженерно-технических средств обеспечения его геодинамической безопасности.

Геотехническому сопровождению, безусловно, предшествует анализ исходной документации. Методология геомониторинга основывается

- 1) на первичной экспертной оценке состояния склонов с применением балльной шкалы опасности объекта [11];
 - 2) результатах визуального осмотра; 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 [12, 13];
 - 3) методик обоснования параметров ИЗ с оценкой ее эффективности [4, 9, 14, 15].
- Выбор ИЗ объекта осуществляется на основе технико-экономического сравнения перспективных инженерно-технических решений с использованием сертифицированного программного обеспечения, что позволяет обосновать наиболее экономичный способ защиты с оптимальными конструктивными параметрами в пределах ограниченного времени. При выполнении геотехнических расчетов численными методами (конечно-элементное моделирование) задаются следующие условия:

- 1) наличие неблагоприятных инженерно-геологических и гидрогеологических процессов (карст, суффозия, просадки, горные подработки, структурные трещины, водонасыщенность и т. д.);
- 2) сейсмические, динамические и техногенные воздействия;
- 3) специфичность грунтов.



Рис. 3 – Блок-схема экспресс-методики геотехнического сопровождения ИЗ в скальных массивах [10]
(Мелихов М.В., Абрамов Н.Н., Кабеев Е.В.)

Применение современных средств численного моделирования в решении поставленной задачи дает возможность на основе натуральных данных получить первичное и уточненное представления о состоянии исследуемого объекта по усредненным упругим и плотностным характеристикам, а также выполнить прогнозную оценку его напряженно-деформированного состояния и определить степень его устойчивости по показателю КЗУ до и после проведения инженерно-технических мероприятий в течение регламентированного времени.

Представленная экспресс-методика геотехнического сопровождения способствует повышению качества проведения противоаварийных работ на основе малобюджетных исследований. Приведенные экспресс-методы инженерных изысканий обязательно должны быть заверены отбором образцов геологического керна в процессе опытно-промышленных испытаний. Общий временной ресурс выполнения всех этапов, как правило, составляет до 2 – 4 недель.

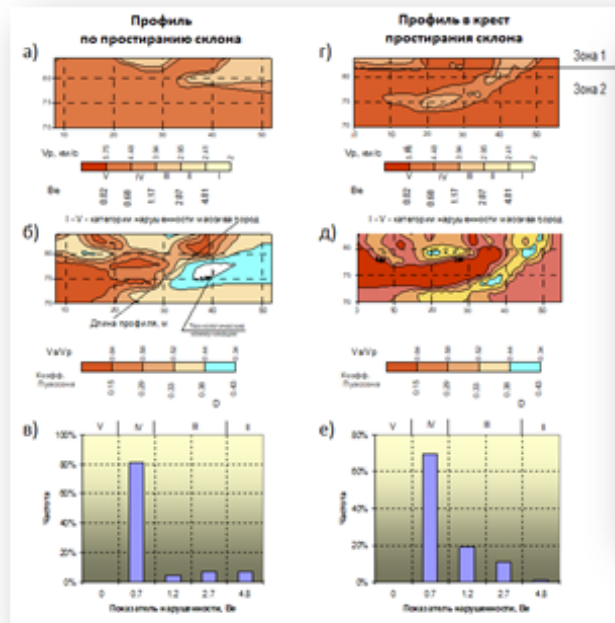
Результаты геотехнических расчетов и их анализ

Приведен опыт реализации разработанной экспресс-методики геотехнического сопровождения применительно к условиям гнейсо-гранитового скально-обвального склона на Кольском полуострове [10]. Использование данного подхода позволило оптимизировать параметры проектируемой анкерной крепи с существенной экономией затрат для предприятия.

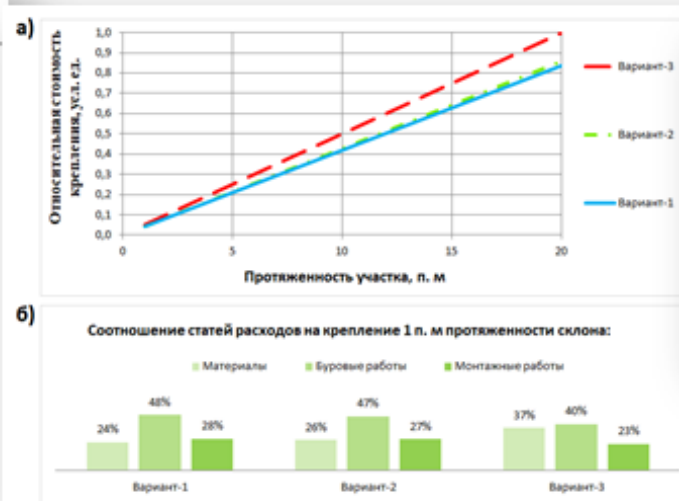
Первичная оценка геомеханического состояния вмещающих пород выполнена в численной модели на основе интерпретации исходных геологических данных. Ее результаты дали возможность говорить об общей стабильности состояния склонов на исследуемом объекте. Однако на общем благоприятном фоне был выделен участок склона, подсеченный структурной трещиной естественного происхождения. Также на этом участке 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. опасному), что предусматривает выполнение мероприятий по профилактике и креплению ослабленных породных массивов. Оценка фактического состояния породного массива и состояния трещинных контактов выполнена с использованием метода сейсмической пространственно-временной томографии [12, 16 – 19], а также современных деформационных и геодезических методов контроля подвижек отдельных блоков массива. В качестве иллюстрации на рис. 4, этап I приведены томограммы скоростей продольных и поперечных сейсмических волн, полученные по профилям при глубинном сейсмопрофилеировании склона. На представленных профилях наглядно прослеживаются структурные особенности вмещающего массива, определяющие его устойчивость. Интерпретация результатов натурального геомониторинга позволила установить объемы массива, подлежащие закреплению. Результаты сейсмотомографического мониторинга подтверждены результатами организованных на измерительном полигоне откосов деформационных наблюдений за мелко- и средне-блоковыми смещениями на малых базах с помощью высокоточных струнных дистометров, а также и долгосрочным геодинамическим контролем смещений по геодезическим маркам на крупных структурных нарушениях. Действующие со стороны массива сдвигающие характеристики, учет которых необходим при обосновании защиты, определены с помощью инструментов моделирования объекта.

1 этап:
натурный геомониторинг
породного массива (ПМ)



2 этап:
ТЭО инженерной защиты (ИЗ)



3 этап:
численное моделирование
в геосистеме «ПМ-ИЗ»

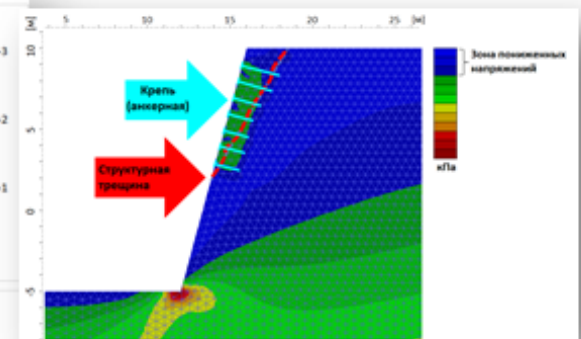


Рис. 4 — Пример интерпретации результатов геотехнического сопровождения мероприятий по инженерной защите объектов на скально-обвальных участках

Выбор способа ИЗ склона осуществлялся на основе технико-экономического сравнения прямых затрат с использованием специализированных САПР-платформ. Оценка и анализ результатов сравнения перспективных противообвальных сооружений (рис. 4, этап 2) позволили обосновать рациональный тип крепи с оптимальными конструктивными параметрами.

На завершающем этапе выполнена оценка надежности и эффективности противоаварийных мероприятий. На рис. 4, этап 3 приведен пример ее решения в численной конечно-элементной модели. По результатам численного моделирования установлено, что значение общего КЗУ массива пород при выбранном способе и параметрах крепления за счет перераспределения напряжений в зоне заделки элементов крепи увеличится до требуемой проектной величины. После монтажа крепи не ожидается пластификации пород вблизи оголовков и корней анкеров, а возникающие напряжения в районе закрепленных пород способствуют повышению устойчивости, необходимой для обеспечения долговременной безопасности эксплуатируемого объекта.

По аналогии методический подход может быть применен на других объектах капитального строительства при проектировании и сооружении ИЗ в условиях скальных массивов.

Заключение

В ходе проведенных теоретических исследований и экспериментальных работ сделаны следующие выводы и рекомендации:

- в обеспечении надежности проектируемых и эксплуатируемых сооружений ИЗ, а также безопасности проведения противоаварийных мероприятий геотехническое сопровождение должно быть обязательным на всех этапах работ (в процессе проектирования, монтажа, эксплуатации и реконструкции);

- анализ причин отказов ИЗ свидетельствует о том, что в постановке данной задачи в качестве основных методов геомониторинга рекомендуется применение только инструментальных методов контроля, а визуальные методы наблюдений следует использовать для первичного ознакомления с объектом;

- использование разработанной экспресс-методики в задачах проектирования ИЗ дает возможность оперативно оценивать степень аварийности объекта, а при необходимости выполнения мероприятий по повышению его безопасности минимизировать экономические затраты на их проведение;

- предложенная методика геомониторинга, заключающаяся в использовании неразрушающих методов деформационно-геофизического контроля с учетом геофизических критериев оценки нарушенности пород и качества межтрещинных контактов, позволяет 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 ИЗ неустойчивых склонов использование методов численного моделирования объекта, заверенных результатами натуральных наблюдений, позволяет выбрать рациональный тип и параметры защитного сооружения с учетом воздействия его элементов на породный массив, а также дать прогнозную оценку изменения их состояния в течение регламентируемого времени;

- для оперативного геотехнического мониторинга геосистемы «ИЗ - породный массив» при условии достаточного финансирования исследований рекомендованы современные средства автоматизированного контроля.

Литература

1. Инженерная защита в России — объективная необходимость [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://territoryengineering.ru/konstruirovanie-buduschego/inzhenernaya-zashhita-v-rossii-obektivnaya-neobhodimost/> (13.03.2019).

2. Рынок инженерной защиты территорий в России в I пол. 2016 г. вырос на 4,1 % [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://marketing.rbc.ru/articles/1571/> (13.03.2019).

3. Решетняк С.П. Анализ отечественной и зарубежной практики стабилизации устойчивости ослабленных карьерных откосов / С.П. Решетняк, М.В. Мелихов // Горная техника. – 2013. - № 2 (12). – С. 62 - 66.
4. Фисенко Г. Л. Укрепление откосов в карьерах / Г.Л. Фисенко, М.А. Ревазов, Э.Л. Галустьян. - М.: Недра, 1974. - 208 с.
5. Газиев Э.Г. Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления / Э.Г. Газиев. – М.: Стройиздат, 1977. – 160 с.
6. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ: Учебник для вузов / А.М. Гальперин. - М.: Изд-во МГГУ, 2003. - 473 с.
7. Современные проблемы механики скальных пород в энергетическом строительстве: сб. науч. тр. / И.Т. Айтматов, Э.Г. Газиев, В.Г. Лебедев и др. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 312 с.
8. Решетняк С.П. Сравнительная экономическая оценка анкерного крепления в условиях рудного карьера АО «Ковдорский ГОК» / С.П. Решетняк, М.В. Мелихов // Глубокие карьеры. ГИАБ. Специальный выпуск № 56.– 2015. – С. 378 - 389.
9. СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов: основные положения. - М.: Минрегион России, 2012. – 53 с.
10. Абрамов Н.Н. Особенности обеспечения геодинамической безопасности скальных откосов при эксплуатации объектов капитального строительства / Н.Н. Абрамов, М.В. Мелихов // Известия вузов. Горный журнал. – 2018. - № 4 – С. 46 - 53.
11. Руководство по проектированию противооползневых и противообвальных защитных сооружений / Минстрой; Всесоюзный научно-исследовательский институт транспортного строительства; Сост.: А. И. Песов. - М., 1983. - 119 с.
12. Абрамов Н.Н. Геофизический мониторинг при строительстве и эксплуатации объектов горнопромышленного комплекса и гидроэнергетики/ Н.Н. Абрамов, Ю.А. Епимахов // - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2010. - 177 с.
13. Абрамов Н.Н. Изучение изменчивости состояния и структуры массива пород в условиях вибрационных воздействий при эксплуатации дробильных комплексов / Н.Н. Абрамов, Ю.А. Епимахов // Известия вузов. Горный журнал. - 2015. - № 6. - С. 79 - 85.
14. Инженерно-геологическое обоснование решений по закреплению и стабилизации скальных массивов пород в карьерах / Д.В. Жиров, Г.С. Мелихова, С.П. Решетняк, В.В. Рыбин, М.В. Мелихов // Глубокие карьеры. ГИАБ. Специальный выпуск. - 2015. - № 56. - С. 164 - 174.
15. Мелихов М.В. Обоснование конструкции и технологии формирования проектных бортов рудных карьеров с использованием анкерно-тросово-сетчатых завес: Автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.22. - Апатиты, 2014. - 23 с.
16. Яновская Т.Б. Проблемы сейсмической томографии. Сборник научных трудов / Т.Б. Яновская // Проблемы геотомографии. - М.: Наука, 1997. - С. 86 - 97.
17. Сейсмическая томография. С приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике: Пер. с англ. / Под. ред. Г. Нолета. - М.: Мир, 1990. - 416 с.
18. Абрамов Н.Н. Методические аспекты сейсмотомографического мониторинга нарушенности скального массива / Н.Н. Абрамов // Известия вузов. Горный журнал. – 2014. – № 4. – С. 126 - 130.
19. Савич А.И. Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами / А.И. Савич, З.Г. Ященко. - М.: Недра, 1979. - 213 с.