

УДК 662.83

Ломов Михаил Андреевич
младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН;
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: 9241515400@mail.ru

Константинов Александр Викторович
младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: alex-sdt@yandex.ru

Терешкин Андрей Александрович
научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ПОРОД

Аннотация:

Безопасность ведения горных работ в значительной степени зависит от изученности напряженного состояния массива горных пород, их физико-механических свойств и структурных особенностей, во многом определяется своевременностью и точностью учета параметров геомеханических процессов при обосновании технологических решений. Для предотвращения аварий вследствие динамических проявлений горного давления, внезапных обрушений выработанного пространства, оползневых и других опасных геологических процессов необходимы информация о состоянии горного массива и прогноз развития геомеханических процессов. К настоящему времени для решения широкого круга задач при планировании и производстве горных работ в сложных горно-геологических и удароопасных условиях накоплен большой опыт создания и применения методов и технических средств изучения, оценки и контроля геомеханического состояния массивов горных пород. В данной работе выполнены обобщение и систематизация данных о подходах, методах и технических средствах оценки и контроля удароопасности и опыте их применения для прогнозирования и предупреждения опасных геодинамических явлений при подземном освоении недр.

Ключевые слова: геомеханика, горное давление, напряженное состояние, горные удары, прогноз, методы, контроль

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.083

Lomov Mikhail A.
Junior Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS,
680000, Khabarovsk, 51 Turgeneva Str.
e-mail: 9241515400@mail.ru

Konstantinov Alexander V.
Junior Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: alex-sdt@yandex.ru

Tereshkin Andrey A.
Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: andrey.tereshkin@bk.ru

PROSPECTIVE METHODS OF ASSESSMENT AND CONTROL OF THE GEOMECHANICAL STATE OF ROCK MASSES

Abstract:

Safety of mining operations largely depends on the study of the stress state of the rock mass, their physical and mechanical properties and structural features, and it is largely determined by the timeliness and accuracy of the parameters of geomechanical processes in the justification of technological solutions. In order to prevent accidents due to dynamic aspects of rock pressure, sudden caving of the mined-out space, landslide and other hazardous geological processes, it is necessary to provide information on the state of the rock mass and forecast on the development of geomechanical processes. By now to solve a wide range of problems in the planning and execution of mining operations in complex mining and geological and bump-hazardous conditions, the extensive experience has been accumulated in the creation and application of methods and technical means for studying, evaluating and monitoring the geomechanical state of rock masses. The paper summarizes and systematizes the data on approaches, methods and technical means of assessment and control of bump hazard and experience of their application for forecasting and prevention of hazardous geodynamic phenomena in the underground mining.

Key words: geomechanics, rock pressure, stress state, rock bumps, forecasting, methods, control

Введение

Большинство рудных месторождений Российской Федерации, Южной Африки, КНР и других горнодобывающих стран характеризуются крайне сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями. Отсутствие должного внимания геомехани-

ческим процессам при освоении месторождения, а также комплексного геомеханического мониторинга приводит к разрушениям различного масштаба, гибели людей и к выходу из строя горного оборудования. Безопасность ведения горных работ в значительной степени зависит от изученности напряженного состояния массива горных пород, их физико-механических свойств и структурных особенностей, во многом определяется своевременностью и точностью учета параметров геомеханических процессов при обосновании технологических решений. Для предотвращения аварий вследствие обрушений выработанного пространства, оползневых процессов и других проявлений необходимы информация о состоянии горного массива и прогноз развития геомеханических процессов.

При ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород имеет место техногенная сейсмичность, задачам мониторинга и профилактики которой должно уделяться пристальное внимание. Первостепенное значение в этом вопросе принадлежит краткосрочному прогнозу, методика определения критериев для которого все чаще становится проблематичной.

Значительный вклад в создание и развитие теории горных ударов, разработку средств и методов геомеханического мониторинга внесли представители сибирской и уральской научных школ горной геомеханики, а также ученые: Петухов И.М., Линьков А.М., Козырев А.А., Захаров В.Н., Кузнецов С.В., Маловичко А.А., Шкуратник В.Л., Mendecki A.J., McGarr A., Lynch R.A. и др. [4 - 7].

Методы оценки и контроля геомеханического состояния массивов горных пород

К настоящему времени для решения широкого круга задач при планировании и производстве горных работ в сложных горно-геологических и удароопасных условиях накоплен большой опыт создания и применения методов и технических средств изучения, оценки и контроля геомеханического состояния массивов горных пород.

Ведущими положениями концепции комплексного геодинамического мониторинга считаются использование детализированного геодинамического районирования, многоуровневого геодинамического прогноза, получение детализированной эмпирической информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) массива. При этом предусматриваются присутствие в массиве областей с наиболее разными сочетаниями напряжений и деформаций и необходимость персонального подхода к прогнозу и предупреждению рисков в областях с разными типами НДС. Комплексная система геомеханического мониторинга позволяет повысить надежность контроля развития процессов сдвижений горного массива. Обычные и комплексные исследования считаются первым шагом принятия проектных технологических решений, определяя их компетентность или же оптимизируя уже принятые решения.

Наиболее распространены в подземных условиях следующие геофизические методы:

1. Геоакустический (метод акустической эмиссии), базирующийся на регистрации акустических сигналов в массиве горных пород при различных нагрузках в диапазоне частот 1 – 100 кГц;
2. Сейсмоакустический, регистрирующий сейсмоакустические процессы в диапазоне частот 100 – 10000 Гц;
3. Микросейсмический, регистрирующий сейсмические волны, возбуждаемые в массиве горных пород, в диапазоне 30 – 500 Гц;
4. Электрометрический, базирующийся на зависимости электрического сопротивления горных пород от их напряженного состояния.

На начальной стадии освоения месторождений важная информация может быть получена в процессе лабораторных исследований образцов горных пород, в последние годы с применением современных трехосных испытательных установок, обеспечивающих всестороннее сжатие и другие виды нагружения. При этом, наряду с определением

параметров физико-механических свойств горных пород и руд и их поведением под нагрузкой, появляется возможность предварительно оценить напряженное состояние горных массивов на основе акустико-эмиссионного эффекта памяти (эффекта Кайзера) [1 – 4]. В отдельных лабораторных экспериментах методы акустической эмиссии сочетаются с динамическим инфракрасным контролем состояния образцов горных пород [5, 6].

Результаты исследований последних десятилетий указывают на определяющее участие в формировании напряженно-деформированного состояния (высокий уровень которого на отдельных участках является одной из главных причин горных ударов) современных тектонических движений, обусловленных геодинамическими процессами в земной коре. Параметры и характер поля напряжений в массивах рудных месторождений зависят от особенностей их тектонической структуры, в том числе блокового строения, которые тесно связаны с долгоживущими крупными разломами, контролирующими образование и играющими важную роль в региональном геодинамическом развитии. Исходя из этого при решении проблемы предотвращения горных ударов на месторождениях, приуроченных к тектонически активным районам, в одном ряду с исследованием горно-технических и геомеханических условий стоит анализ региональной геодинамики и взаимосвязи ее с техногенными геомеханическими процессами.

Ценную информацию о параметрах полей напряжений позволяют получить геолого-структурные методы, основанные на общих тектонофизических представлениях и базирующиеся на изучении деформационных структур земной коры и решении обратной задачи по реконструкции ориентировки векторов главных нормальных напряжений. Методические приемы решения обратных задач по реконструкции поля напряжений разработаны М.В. Гзовским, О.И. Гущенко, П.Н. Николаевым, С.И. Шерманом и др. [7 – 10]. В последние годы для изучения геодинамики и тектонического строения земной коры получили широкое развитие методы дистанционного зондирования Земли с использованием космоснимков с высокой степенью разрешения и ГИС-технологий [11, 12]. Использование достоинств геолого-структурных методов оценки напряжений массива пород при решении многих задач горной практики в значительной степени связано с развиваемым в последние годы методом геодинамического районирования месторождений (ГРМ), объединяющим комплекс геоморфологических и тектонофизических методов [13].

Геофизические методы по размеру изучаемых площадей и охвату объемов подразделяются на локальные и региональные. Первые (ультразвуковой, метод регистрации ЕЭМИ, метод ИК-радиометрии) разработаны для оценки удароопасности краевых частей массива в пределах выработки, целика и других отдельных участков горного массива ограниченного размера. Региональные методы (в основном микросейсмический и сейсмоакустический) дают возможность осуществлять геомеханический контроль на больших базах, в пределах всего шахтного поля или отдельных его участков.

С учетом многофакторности условий проявления горных ударов и техногенной сейсмичности для их прогноза требуется непрерывный многопараметрический мониторинг происходящих в горном массиве геомеханических и геодинамических процессов. В мировой горной практике в основе существующих систем мониторинга лежат методы регистрации деформаций в массиве, инфракрасного и электромагнитного излучения, акустической и сейсмоакустической эмиссии, которые часто используются совместно или после применения методов математического моделирования. В работе японских ученых рассмотрена комплексная система контроля удароопасности забоя тоннеля, включающая электрический потенциометр, акустическую аппаратуру, инфракрасный датчик температуры породы, датчик температуры воздуха и влажности выработки, а также реперную станцию по измерению конвергенции и нагрузок на опорные элементы крепи [14].

Анализ публикаций последних лет показывает, что создание и применение систем комплексного геомеханического мониторинга является одним из наиболее перспективных подходов в решении наиболее сложных проблем горной геомеханики [15 – 21]. В состав таких систем входят деформационные и микросейсмические измерительные комплексы, а также средства регистрации акустической эмиссии, электромагнитного излучения и другие приборы. При этом измерительные комплексы регионального геомеханического мониторинга дополняются приборами для локального контроля состояния массива горных пород, и все они объединяются в единую интегрированную наблюдательную сеть [22].

В работе [23] рассмотрен современный геодинамический полигон в районе Стрельцовского рудного поля, в состав которого входят современные измерительные комплексы, имеющие различную базу измерений и обеспечивающие эффективную регистрацию и углубленный анализ широкого спектра изменяющихся в пространстве и времени параметров геофизических волновых полей (геоакустических, микросейсмических, деформационных и др.). Технические средства геодинамического полигона Стрельцовского рудного поля интегрированы в единую наблюдательную сеть (рис. 1), обеспечивающую информационный обмен со скоростью передачи до 15,2 Мбит/с; поддержание единого времени на всех системах с точностью не менее 15 мс; ведение единой базы данных. Основной интегрирующей платформой геодинамического полигона Стрельцовского рудного поля выступает программный комплекс Mineframe [24], предназначенный для комплексного решения горно-геологических и технологических задач.

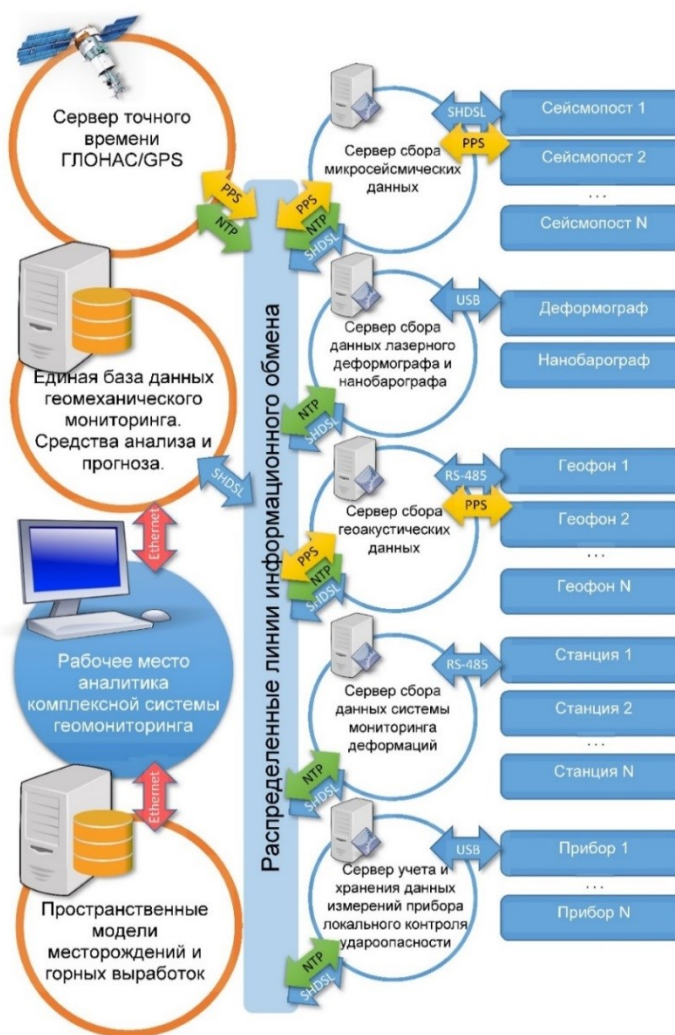


Рис. 1 – Структурная схема интеграции измерительных комплексов геодинамического полигона Стрельцовского рудного поля

Наглядно концепцию построения цифровой и программируемой системы геоакустического мониторинга массива горных пород можно рассмотреть на примере системы «Prognoz-ADS», разработанной в ИГД ДВО РАН. Она состоит из подземной и поверхностной частей и включает цифровые приемные преобразователи, объединенные в одном блоке ретранслятор, источник питания и синхронизатор, многопортовый расширитель RS-485 и центр приема и обработки потока АЭ-импульсов, управления датчиками и контроля всех узлов и трактов системы на базе персонального компьютера [25].

Одним из основных элементов системы являются цифровые приемники акустических сигналов (ЦП), в которых формирующиеся на выходе преобразователя аналоговые сигналы оцифровываются, буферизируются, обрабатываются и передаются по цифровым каналам связи в размещаемый на поверхности управляющий системой центральный компьютер. Важное достоинство разрабатываемого аппаратно-программного комплекса состоит в применении промышленного цифрового интерфейса RS-485 в системе передачи данных, что допускает последовательное соединение датчиков и существенно упрощает схему их коммутации.

В работе [26] рассмотрен геоакустический портативный прибор для локального контроля удароопасности «Prognoz L» [26], позволяющий не только регистрировать большое число параметров АЭ, но и осуществлять обработку и детальный анализ полученной информации, что значительно повышает надежность оперативной оценки геомеханического состояния массива горных пород.

Создание 3D-модели является относительно новой, но уже важной частью анализа геомеханического состояния массивов горных пород. Данный вид работ позволяет более детально исследовать и прогнозировать процессы, протекающие при разработке месторождения (рис. 2).

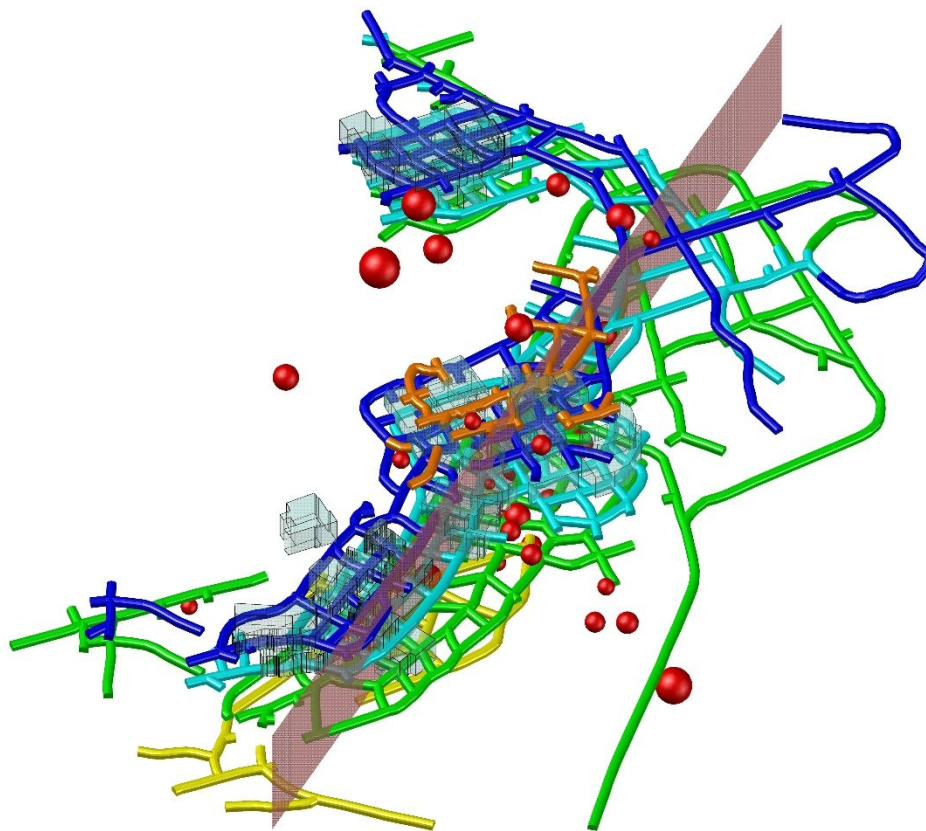


Рис. 2 – 3D модель Николаевского месторождения с нанесенными очагами сейсмоакустических событий

Методы анализа геомеханического состояния массивов горных пород опубликованы в следующих источниках:

- Лабораторные исследования образцов горных пород [1 – 4];
- Методические приемы решения обратных задач по реконструкции поля напряжений [7 – 10];
- Методы дистанционного зондирования Земли с использованием космоснимков с высокой степенью разрешения и ГИС-технологий [1 – 12];
- Метод геодинамического районирования месторождений, объединяющий комплекс геоморфологических и тектонофизических методов [13];
- Методы регистрации деформаций в массиве, инфракрасного и электромагнитного излучения, акустической и сейсмоакустической эмиссии [14 – 21];
- 3D-моделирование.

Заключение

По результатам анализа и обобщения литературных источников по проблеме предотвращения опасных геодинамических явлений могут быть сделаны следующие выводы:

- Для надежной оценки состояния массива необходимо создавать многоуровневые системы контроля, в которых сейсмический мониторинг можно вести совместно с геоакустическим, имеющим более высокую «разрешающую» способность», а также с использованием деформометров и других технических средств, позволяющих с высокой точностью определять деформации и иные параметры состояния массива горных пород. Применение современных микропроцессорных и информационных технологий создает условия для высокой степени автоматизации измерительных комплексов, регистрации и глубокой обработки геомеханической информации.

- Для прогнозирования опасных геодинамических явлений используются различные методики, критерии и показатели, характеризующие предельно напряженное состояние массива горных пород. Большинство из них базируется на пространственно-временных закономерностях и энергетических характеристиках, регистрируемых в массиве горных пород упругих импульсов (микросейсмических, акустических и др.), отражающих процесс формирования очага разрушения (горного удара или техногенного землетрясения).

Литература

1. Zhou K.P., Lin Y., Deng H.W., Li J.L., Liu C.J. Prediction of rockburst classification using cloud model with entropy weight // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – China. – 2016. – Vol. 26, Iss. 7. – P. 1995 - 2002.
2. Yoshikawa S., Mogi K. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression // Tectonophysics. 1981. – Vol. 74. – No. 3/4. – P. 323 - 339.
3. Ямщиков В.С. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти / В.С. Ямщиков, В.Л. Шкуратник, К.Г. Лыков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1990. – № 2. – С. 23 - 28.
4. Шкуратник В.Л. Методы определения напряжённо-деформированного состояния массива горных пород: Учебное пособие / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко. – М.: МГГУ, 2012. – 113 с.
5. Meifeng C. Prediction and prevention of rockburst in metal mines – A case study of Sanshandao gold mine // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2016. – Vol. 8, Iss. 2. – P. 204 - 211.
6. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – Vol. 28, Iss. 5. – P. 829 - 837.

7. Гзовский М.В. Основы тектонофизики / М.В. Гзовский. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
8. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений / О.И. Гущенко // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М.: Наука, 1979. – С. 7 - 25.
9. Шерман С.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения / С.И. Шерман, Ю.И. Днепровский. – Новосибирск: Наука, 1989. – 158 с.
10. Батугин А.С. Возможности и опыт оценки напряженного состояния горного массива в горнопромышленных районах методами тектонофизики / А.С. Батугин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № S1. – С. 180 - 194.
11. Усиков В.И. 3D-модели рельефа и строение верхней части земной коры Приамурья / В.И. Усиков // Тихоокеанская геология. – 2011. – № 6. – С. 14 - 33.
12. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии / Ж.Т. Кожаев, М.А. Мухамедгалиева, Б.Б. Имансакипова, М.Г. Мустафин // Горный журнал. – 2017. – № 2. – С. 39 - 44.
13. Петухов И.М. Геодинамика недр / И.М. Петухов, И.М. Батугина. – М.: Недра, 1996. – 217 с.
14. Aydan Ö. Multiparameter and Infrared Monitoring Systems for Real-Time Rockburst Susceptibility Evaluation and Their Applications to Practice in Japan // Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning and Mitigation. – Elsevier Inc, 2018. – P. 282 - 299.
15. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов / Н.Н. Мельников, А.И. Калашник, Н.А. Калашник, Д.В. Запорожец // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 4. – С. 3 - 10.
16. Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах / А.Н. Шабаров, С.В. Цирель, К.В. Морозов, И.Ю. Рассказов // Горный журнал. – 2017. – № 9. – С. 59 - 64.
17. Адушкин В.В. Новый подход к мониторингу техногенно-тектонических землетрясений / В.В. Адушкин, С.Б. Кишкина, Г.Г. Кочарян // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 3 - 14.
18. Построение системы мониторинга потенциально опасных участков Коробковского месторождения Курской магнитной аномалии / В.В. Адушкин, С.Б. Кишкина, В.И. Куликов, Д.В. Павлов, В.Н. Анисимов, Н.В. Салтыков, С.В. Сергеев, В.Г. Спунгин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 3 - 13.
19. Ma T.H., Tang C.A., Tang L.X., Zhang W.D., Wang L. Rockburst characteristics and microseismic monitoring of deep-buried tunnels for Jinping II Hydropower Station // Tunneling and Underground Space Technology. – China. – 2015. – Vol. 49. – P. 345 - 368.
20. Shan-chao Hu, Yun-liang Tan, Jian-guo Ning, Wei-Yao Guo, Xue-sheng Liu Multiparameter Monitoring and Prevention of Fault-Slip Rock Burst // Shock and Vibration. – 2017. – China. – 2017. – Volume 2017, Article ID 7580109, 8 p. <https://doi.org/10.1155/2017/7580109>
21. Riemer K.L., Durrheim R.J. Mining seismicity in the Witwatersrand Basin: monitoring, mechanisms and mitigation strategies in perspective // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2012. – Vol. 4(3). – P. 228 - 249.
22. Рассказов И.Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона / И.Ю. Рассказов. – М.: Горная книга, 2008. – 329 с.
23. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы / И.Ю. Рассказов, В.А. Петров, А.В. Гладырь, Д.В. Тюрин // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 17 - 21.

24. Подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ в системе MINEFRAME / С.В. Лукичев, О.В. Наговицын, И.Э. Семенова, О.В. Белогородцев // Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 53 - 58.

25. Автоматизированная система геомеханического мониторинга подземных сооружений и горных конструкций при их эксплуатации / И.Ю. Рассказов, А.Ю. Искра, В.А. Луговой, И.А. Барашиков // Технологии гражданской безопасности. - 2010. - Т. 7. № 3 (25). - С. 92 - 97.

26. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород / И.Ю. Рассказов, Д.С. Мигунов, П.А. Аникин, А.В. Гладырь, А.А. Терешкин, Д.О. Желнин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 3. – С. 169 - 179.