

УДК 622.838:622.33

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ РАЗРЕЗОВ И ОТВАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ



Ю. И. КУТЕПОВ,
зав. лабораторией, проф.,
д-р техн. наук,
kouteпову@mail.ru



Н. А. КУТЕПОВА,
главный научный сотрудник,
д-р техн. наук



М. Р. ПОНОМАРЕНКО,
научный сотрудник,
канд. техн. наук



Ю. Ю. КУТЕПОВ,
старший научный сотрудник,
канд. техн. наук

Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Интенсификация открытого способа добычи угля сопровождается вводом в эксплуатацию новых участков месторождений с весьма сложными инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями, отработкой угольных пластов на больших глубинах, увеличением высоты бортов разрезов и внешних отвалов. В настоящее время глубина открытых горных выработок крупнейших предприятий РФ приближается к 400 м. Например, борта Бачатского разреза в Кузбассе достигли высоты 360 м, а в перспективе планируется отработку месторождения открытым способом вести до глубины 500 м [1]. Отвалы вскрышных пород в угледобывающих районах, как правило, превышают 100-метровую высоту, наблюдается тенденция их интенсивного наращивания. Разрабатываются проекты 300-метровых отвалов, ведется научная проработка технических решений по формированию сверхвысоких отвалов – до 500 м [2].

В связи с ростом масштабов горнотехнических объектов повышается и мера ответственности специалистов в части обоснования устойчивых параметров бортов и отвалов на этапе проектирования и своевременного выявления признаков

Рассмотрены общие требования к программе мониторинга объектов горнодобывающей отрасли, учитывающие современный научно-технический уровень методов и приборной базы для маркшейдерско-геодезических и гидрогеологических наблюдений. Разработан объектно-ориентированный методический подход к организации геомеханического мониторинга, основанный на выявлении потенциально опасных зон, для оценки состояния которых устанавливаются непрерывные инструментальные наблюдения с использованием наиболее эффективных технических средств; при этом весь объект контролируется посредством геодезических методов с большим площадным покрытием.

Ключевые слова: горнотехнические сооружения, устойчивость бортов, комплексный мониторинг, маркшейдерско-геодезические наблюдения, гидрогеологические наблюдения, геомеханические расчеты

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.10

опасных деформаций на этапе эксплуатации сооружений. Многолетние исследования в области прогнозирования устойчивости откосных сооружений позволили наработать точные математические методы решения геомеханических задач и компьютерные средства их реализации, учитывающие особенности геологической структуры массива, тектоническую нарушенность, гидрогеологические условия, физико-механические свойства пород, геомеханические модели деформационного поведения пород под нагрузкой и др. [3–9]. Однако многообразие факторов, влияющих на состояние откосов породных массивов и являющихся, в свою очередь, труднопрогнозируемыми на длительный период, делает задачу полного их учета при прогнозе устойчивости горнотехнических объектов трудновыполнимой. Поэтому обеспечение безопасных условий эксплуатации открытых горных выработок и высоких отвалов достигается организацией регулярных наблюдений, выполняемых с использованием различных методов и современных технических средств в рамках научно обоснованной системы комплексного геомеханического мониторинга, включенной в основные технологические процессы открытой разработки месторождений еще на этапе проектирования сооружений.

Программа геомеханического мониторинга должна обеспечивать контролирование всех основных показателей состояния устойчивости сооружения, выявление на ранних стадиях признаков развития деструктивных процессов и опасных деформаций для своевременной реализации мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций, социальных и экологических ущербов, значительных технико-экономических затрат

на ликвидацию последствий аварий. О масштабах ущербов можно судить на примере произошедшего в 2015 г. оползня на отвале разреза «Заречный» в Кузбассе, объемы которого составили 27 млн м³, а ликвидация последствий, по скромным подсчетам, обошлась в сумму более 9 млрд руб. [2].

Изученность вопроса

Научно-практические основы организации и выполнения геомеханического мониторинга разработаны известными учеными, среди которых наибольший вклад принадлежит И. В. Баклашову, Н. С. Булычеву, Н. П. Влоху, А. М. Гальперину, М. В. Курлене, Н. Н. Мельникову, И. М. Петухову, Л. А. Пучкову, К. Н. Трубецкому, Е. И. Шемякину, Г. Л. Фисенко и другим. Применительно к открытым горным работам одним из первых документов, регламентирующих необходимость и методы наблюдений, можно считать «Инструкцию по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах...» [10]. В данном документе рассмотрен «комплекс маркшейдерских и инженерно-геологических наблюдений, необходимых для решения вопросов по обеспечению устойчивости откосов, и мероприятий по предотвращению нарушений устойчивости откосов и обеспечению безопасности работ на действующих карьерах». Инструкцию использовали в качестве основного нормативного документа при открытой разработке месторождений полезных ископаемых (МПИ) в течение 50 лет. В настоящее время, несмотря на изменение методик геодезических измерений и применение современных приборов, она востребована как справочное пособие при организации инструментальных наблюдений за состоянием бортов и отвалов.

С 2020 г. в качестве нормативного документа, утвержденного Ростехнадзором, используют Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности, которые устанавливают требования к «организации систем наблюдений за развитием деформационных процессов». В соответствии с этим документом, объектами мониторинга являются борта карьера (разреза), участки борта, уступы и отвалы. Методы и методику контролирования их состояния определяют в зависимости от природных и горнотехнических факторов, к числу которых отнесены класс горных пород и тип возможных деформаций. Соответствующие рекомендации по составу системы мониторинга даны обобщенно в виде перечисления эффективных методов, среди которых основное внимание уделено наземным инструментальным маркшейдерским наблюдениям с указанием необходимой периодичности их выполнения.

Помимо нормативно-методических документов, общие положения и методологические принципы организации мониторинга объектов открытой разработки МПИ приводятся в специальной технической литературе [11, 12]. Анализ указанных работ свидетельствует, что, несмотря на актуальность проблемы и имеющийся практический опыт реализации различных видов контроля на отдельных объектах, отсутствует общая методология организации геомеханического мониторинга

горнотехнических объектов, позволяющая выбрать оптимальную программу и технические средства наблюдений для конкретных сооружений в зависимости от сложности горно-геологических условий, технологических параметров, ожидаемых изменений компонентов геологической среды и связанных с этим опасных деформационных процессов.

Общие требования к организации и выполнению мониторинга

На сегодняшний день к числу основных тенденций в сфере мониторинга относятся следующие:

- совершенствование технологий дистанционного площадного мониторинга – наземных и аэрокосмических (лазерное сканирование, радиолокационное зондирование, аэрофото-съемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и др.) [13–17];
- повышение степени автоматизации проведения измерений (использование роботизированных тахеометров и др.) [18];
- существенное увеличение общего объема получаемых данных, появление понятия «большие данные» применительно к горнотехническим объектам [19], совершенствование технологий их обработки (в частности, применение методов искусственного интеллекта [20, 21]);
- совершенствование технологий сбора, интеграции и визуализации мониторинговых данных на основе использования геоинформационных и веб-технологий [22, 23];
- разработка и создание информационно-аналитических систем мониторинга в соответствии с общей тенденцией цифровой трансформации горнодобывающей отрасли [22, 24, 25].

К числу основных требований при организации и выполнении геомеханического мониторинга можно отнести следующие.

1. В части состава методов и технических средств мониторинга:

- комплексность – выполнение инженерно-геологических, гидрогеологических и маркшейдерско-геодезических наблюдений для оценки условий разработки МПИ и контроля различных параметров горнотехнических объектов [26–30];
- обеспечение многоуровневого мониторинга за счет комплексного применения методов наземных и аэрокосмических наблюдений, а также глубинного зондирования [13, 31–33];
- соответствие мировому научно-техническому уровню – применение современных методов и средств съемки [34, 35], а также технологий обработки, интеграции и визуализации результатов мониторинга [22];
- площадное покрытие – использование методов и средств, обеспечивающих максимальный пространственный охват наблюдений с целью получения наиболее полной картины на территории исследуемого объекта и в зоне его влияния.

2. В части реализации методов мониторинга:

- необходимость выполнения мониторинга в он-лайн-режиме, что обуславливает оперативность, регулярность и автоматизацию выполнения наблюдений, сбора результатов, их визуализацию и доведение итогового набора данных до лиц, принимающих решения [22].

3. В части организации мониторинга:

- простота выполнения наблюдений;
- осуществление наблюдений без нарушения рабочих процессов горного предприятия;
- удобный доступ к результирующим данным, что также напрямую влияет на оперативность анализа обстановки.

Методический подход к организации геомеханического мониторинга состояния горнотехнических объектов

Для достижения требуемой эффективности контролируемого устойчивости горнотехнических сооружений и оптимизации затрат на организацию и ведение наблюдений программа геомеханического мониторинга должна быть объектно-ориентированной. Обоснование программы объектно-ориентированного мониторинга осуществляют на основе анализа физико-географических, инженерно-геологических, гидрогеологических условий МПИ, технологических процессов строительства и эксплуатации горнотехнического сооружения с учетом возможного влияния различных внешних факторов (см. рисунок). Результатом проведенного многофакторного анализа является идентификация опасностей при функционировании сооружения, т. е. выявление наиболее вероятного вида нарушения устойчивости (деформации), механизма и динамики его развития, иницирующих факторов, оценка потенциально опасных зон. Объектами мониторинга становятся локальные потенциально опасные участки, при этом виды наблюдений и технические средства выбирают для контроля наиболее значимых и динамично изменяющихся показателей состояния сооружений. Комплекс контролируемых показателей должен быть достаточным для объективной оценки устойчивости сооружения, выполняемой на основании сравнения с допустимыми значениями (критериями безопасности) или расчетными методами.

Применение разработанного методического подхода продемонстрируем на примере разработки программы комплексного геомеханического мониторинга состояния бортов при разработке угольных месторождений.

Программа комплексного геомеханического мониторинга состояния бортов угольных разрезов

Месторождения каменного угля характеризуются, как правило, весьма сложными геолого-тектоническим строением и гидрогеологическими условиями. Углевмещающие толщи представлены чередующимися слоями терригенных отложений: известняками, песчаниками, алевролитами



Схема организации геомеханического мониторинга устойчивости горнотехнических сооружений

и аргиллитами, залегающими в виде различных пликвативных форм (складок) с многочисленными крупными и мелкими нарушениями дизъюнктивного характера. Обводненность углевмещающих комплексов изменяется на различных участках в зависимости от литологического состава пород, условий их залегания, характера трещиноватости. Повышенную естественную водообильность имеют покровные песчано-глинистые отложения в верхней части месторождений, коренные породы коры выветривания, а также трещиноватые породы в зонах тектонических нарушений.

Проведение горных работ в подобных условиях сопровождается развитием горно-геологических процессов, влияющих на безопасность технологических процессов, к числу которых относятся:

- осыпи и обрушения на откосах уступов из коренных (полускальных) пород;
- оползни покровных отложений на верхних уступах;
- деформации поворота (изгиба) крутопадающих слоев, проявляющиеся на бермах уступов и в прибортовой полосе у верхней бровки бортов в виде заколов, с просадкой поверхности и расслоением толщи пород;
- оползни контактного типа на участках с согласным падением слоев в сторону отработанного пространства.

Программа комплексного геомеханического мониторинга состояния устойчивости бортов и уступов угольных разрезов

Виды работ	Методы и технические средства	Решаемые задачи
Визуальные наблюдения	Осмотр состояния бортов, уступов, сооружений, фотофиксация, простейшие измерения с использованием рулетки, компаса, навигационной системы телефона	Выявление дефектов, нарушений, признаков развития опасных деструктивных процессов, способных привести к развитию локальных и глобальных оползней
Гидрогеологический мониторинг	Режимные наблюдения по сети гидрогеологических скважин на земной поверхности в зоне влияния разреза	Контролирование уровней приповерхностного водоносного горизонта
	Режимные наблюдения в опасных зонах по глубоким скважинам, оборудованным дистанционными датчиками и автоматизированными системами сбора и передачи данных	Изучение гидрогеологической структуры прибортового массива, наблюдения за изменением гидродинамического режима подземных вод, получение данных для расчетов устойчивости бортов, оценка эффективности работы дренажных устройств
Деформационный мониторинг	Наземные маркшейдерские наблюдения по профильным реперным линиям	Измерение деформаций земной поверхности в пределах ширины призмы возможного оползания бортов, в опасных зонах (при необходимости)
	Наземная радиолокационная съемка с использованием радара; геодезические наблюдения с использованием стационарного роботизированного тахеометра	Непрерывный контроль деформаций поверхности откосов при ведении горных работ вблизи опасных зон
	Автоматизированный контроль глубинных деформаций инструментального массива на базе стационарных цифровых инклинометров и экстензометров	Измерение послонных горизонтальных и вертикальных перемещений пород в прибортовом массиве в опасных зонах
	Космическая радарная интерферометрия с использованием радиолокационных изображений с космического аппарата	Получение площадной картины распределения деформаций (оседаний) на всей территории разреза и прилегающей территории
Геомеханические расчеты	Расчет коэффициента запаса устойчивости бортов на базе разработанных гидрогеомеханических моделей с использованием методов численного моделирования	Контроль состояния устойчивости бортов и уступов по диагностическим профилям; обоснование критериев безопасности для ведения гидрогеологического мониторинга

Среди указанных горно-геологических явлений, сопровождающих ведение горных работ на угольных разрезах, наибольшую опасность представляют оползневые процессы, а также деформации от изгиба и поворота слоев, которые также потенциально могут привести к оползневым смещениям крупных породных блоков. Участки развития этих деформаций классифицируются как «опасные зоны» по геомеханическим условиям, подлежат регистрации в специальных журналах и картированию, регулярному контролированию визуальными и инструментальными методами.

Оптимальная пространственная структура расположения технических средств мониторинга определяется на основании районирования бортов разреза по уровню потенциального оползневого риска с учетом комплекса характеристик, таких как падение породных слоев в сторону выработанного пространства, результирующий угол борта, наличие видимых оползневых тел, выходов подземных вод, крупных трещин, подработанных участков подземными выработками, степень обводненности, коэффициент запаса устойчивости и др. По результатам многофакторного анализа выделяются потенциально опасные геомеханические зоны, подлежащие контролированию с использованием инструментальных методов гидрогеологического и деформационного мониторинга. Для ведения мониторинга с использованием автоматизированных систем должны быть обоснованы критерии безопасности – значения

напоров и скоростей деформаций, соответствующие допустимому и предельному уровню снижения коэффициента запаса устойчивости бортов в опасных зонах. Общая программа комплексного мониторинга ориентирована на контролирование состояния бортов разреза и прилегающей территории с применением визуальных, маркшейдерско-геодезических, гидрогеологических и геомеханических методов (см. таблицу).

Организация геомеханического мониторинга с учетом сложности условий функционирования горнотехнических сооружений

При организации комплексного геомеханического мониторинга горнотехнические объекты следует рассматривать не просто как некие обособленные породные массивы с определенной формой, строением и свойствами, а как динамические природно-технические системы (ПТС), в которых геологические процессы инициируются технологическими воздействиями и протекают под влиянием целого комплекса внешних факторов природного и техногенного характера. Эффективным методом многофакторного анализа условий функционирования ПТС с целью разработки оптимальной программы мониторинга является их типизация по степени сложности. Развитие метода отражено в работах, предлагающих типизацию детальных ПТС разработки угольных МПИ [1], типизацию условий устойчивости отвалов угольных месторождений Кузбасса [2].

Общий методический подход к организации деформационного мониторинга объектов открытой разработки МПИ с учетом установленного класса сложности рассмотрен в работах [26, 27]. В соответствии с существующими методиками и нормативными документами, а также с учетом достигнутых параметров карьеров и разрезов, особенностей ведения открытых горных работ выделяют частные показатели сложности данных объектов, характеризующие инженерно-геологические, гидрогеологические, физико-географические и горнотехнические условия открытой разработки МПИ, включая тип месторождений по горным породам; деформационные процессы и поведение массивов; конструктивные особенности; степень обводненности; общую сейсмичность; форму и высоту рельефа территории; особенности климатических условий. Анализ выделенных показателей выполняют с применением методов экспертной оценки; многокритериальный анализ сложности горнотехнического объекта базируется на методах нечеткого логического вывода и теории планирования эксперимента [26]. Одним из преимуществ разработанной методики, помимо возможности анализа комплексного влияния различных факторов на сложность объекта, является возможность повышения достоверности выполняемого анализа за счет расширения используемого набора частных показателей.

В соответствии с получаемым на основе применения разработанной методики количественным значением сложности объект классифицируют как простой, средней сложности, сложный или особо сложный. Каждому классу сложности соответствует своя программа выполнения деформационного мониторинга. Выбор методов осуществляют с учетом сформулированных выше требований к организации и выполнению мониторинга: чем сложнее объект наблюдений, тем более высокий уровень автоматизации, оперативности, площадного покрытия и точности мониторинга требуется обеспечить. Таким образом, мониторинг сложных и особо сложных объектов рекомендуется выполнять на базе наиболее полного комплекса автоматических площадных методов, в то время как для мониторинга простых объектов зачастую достаточно визуальных наблюдений.


Заключение

Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений относится к ключевым задачам обеспечения безопасности функционирования горного производства и снижения экономических затрат на ликвидацию последствий аварийных ситуаций. Несмотря на наличие нормативных требований, обязывающих предприятия осуществлять эффективный контроль состояния горнотехнических сооружений с применением современных методов и технических средств, не допуская остановки технологических процессов, общая научно обоснованная методология организации геомеханического мониторинга в настоящее время отсутствует.

Предложен методический подход к организации объектно-ориентированного геомеханического мониторинга, обеспечивающий требуемую эффективность контролирования устойчивости горнотехнических сооружений и оптимизацию материально-технических затрат на организацию и ведение наблюдений. Данный подход научно обоснован и имеет положительный опыт внедрения, что позволяет рекомендовать его для использования при разработке программ мониторинга устойчивости бортов карьеров и отвалов на этапах эксплуатации, рекультивации и ликвидации сооружений.

На сегодняшний день существует потребность в разработке нормативно-методической базы, регламентирующей программу и пространственную организацию геомеханического мониторинга, выбор методов, технических средств и регламента наблюдений на базе универсального методического подхода в зависимости от природных и технических особенностей горнотехнических сооружений. Перспективным направлением в совершенствовании системы геомеханического мониторинга является создание информационно-аналитической системы он-лайн-мониторинга на базе геоинформационных и веб-технологий.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 69–74
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.10

Geomechanical monitoring of slope stability in pitwall and dumps in coal mining

Information about authors

Yu. I. Kutepov¹, Head of Laboratory, Professor, Doctor of Engineering Sciences, koutepovy@mail.ru

N. A. Kutepova¹, Chief Researcher, Doctor of Engineering Sciences

M. R. Ponomarenko¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences

Yu. Yu. Kutepov¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Extensive development of coal production involves growing operations at new sites with complicated geological and hydrogeological conditions and deep-level coal occurrence, which forces steeper slopes of pitwall and external dumps. The geomechanical monitoring of slope stability in pitwall and dumps is a key mission of safe performance of mines and reduction of expenditures connected with elimination of contingencies and after-effects. The authors propose a methodical approach to a subject-oriented geomechanical monitoring to ensure required efficiency of the stability control at geotechnical facilities at optimized material and technical support of the arrangements and activities. The approach is science-based and practically approved.

An advantage of the proposed procedure, alongside with the feasibility of analyzing the integrated influence of different factors on a mining facility and its complexity, is the improved reliability of the analysis owing to an expanded set of partials. Selection

of monitoring techniques pursues the monitoring arrangement and implementation standards: a more complex subject of observation requires a higher level of automation, operational efficiency, coverage and accuracy. Thus, monitoring of complex and extremely complex facilities should use a complete package of automated terrestrial methods while simple facilities quite often do with visual inspection.

A promising trend of perfection of a geomechanical monitoring system is the on-line information-and-analysis monitoring using geoinformation and web technologies.

Keywords: geotechnical facilities, slope stability, integrated monitoring, geodesy and surveying, hydrogeological survey, geomechanical designs.

References

- Sergina E. V. Integrated monitoring of nature-and-technology systems in open pit coal mining : Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Saint-Petersburg, 2015. 165 p.
- Vasileva A. D. Geotechnical validation of high dump slope stability in coal fields in Kuzbass : Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Saint-Petersburg, 2019. 186 p.
- Zhabko A. V. A new concept of slope stability design. *GIAB*. 2022. No. 10. pp. 104–124.
- Zhabko A., Volkomorova N., Zhabko N. Theoretical basis for calculation of the quarries sides for collapse. *Ural Mining Decade : XVIII Scientific Forum*. 2020. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 177. 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202017701004
- Protosenya A. G., Kutepov Yu. Yu. Stability estimation of hydraulic fills in undermined areas. *GIAB*. 2019. No. 3. pp. 97–112.
- Trushko V. L., Protosenya A. G. Prospects of geomechanics development in the context of new technological paradigm. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 162–166.
- Mazurov B. T., Mustafin M. G., Panzhin A. A. Estimation Method for Vector Field Divergence of Earth Crust Deformations in the Process of Mineral Deposits Development. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 238. pp. 376–382.
- Read J., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design. Collingwood : CSIRO Publishing, 2009. 487 p.
- Martin D., Stacey P. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks. Leiden : CRC Press/Balkema, 2018. 416 p.
- Guidance for observation of edge, slope and dump deformations on pits and for development of operations for their provision and stability. Leningrad, 1971. 187 p.
- Sharon R., Eberhardt E. (Eds.). Guidelines for Slope Performance Monitoring. Leiden : CRC Press/Balkema, 2020. 330 p.
- Cheskidov V., Grobler H., Kurenkov D., Lipina A. Slope Monitoring Systems Design for Mining Enterprises. *Proceedings of V International Innovative Mining Symposium*. 2020. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 174. 01025. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401025
- Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I., Volkov M. A., Grinyuk A. P. Satellite methods within integrated land surface deformation monitoring in a mine field. *GIAB*. 2020. No. 12. pp. 103–113.
- Ismagilov R. I., Zakharov A. G., Badtiev B. P., Senin N. V., Pavlovich A. A. et al. Experience of Using (Testing) Ground Penetrating Radar on Construction Site for Steeply Inclined Conveyor Complex in Southern Pit of Mikhailovsky GOK. *Gornaya promyshlennost*. 2020. No. 3. pp. 84–90.
- Ismagilov R. I., Zakharov A. G., Badtiev B. P., Senin N. V., Sharikov I. S. et al. Unmanned aerial vehicles for prompt solution of theoretical and applied problems: A case-study of Varichev Mikhailovsky GOK. *Gornaya promyshlennost*. 2020. No. 3. pp. 26–30.
- Gusev V. N., Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Study of a set of factors influencing the error of surveying mine facilities using a geodesic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 173–179.
- Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O., Mustafin M. G. Creating highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodeziya i kartografiya*. 2022. Vol. 83, No. 11. pp. 40–49.
- Moseykin V. V., Galperin A. M., Cheskidov V. V., Punevsky S. A. Enhancement of automated remote slope monitoring in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017. No. 12. pp. 82–86. DOI: 10.17580/gzh.2017.12.16
- Cheskidov V. V., Manevich A. I., Lipina A. V. Big data obtaining and analysis in the mining structures state monitoring practice. *Gornaya promyshlennost*. 2019. No. 2. pp. 86–88.
- Grishchenkova E. N. Development of a Neural Network for Earth Surface Deformation Prediction. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018. Vol. 36, Iss. 4. pp. 1953–1957.
- Naghadehi M. Z., Jimenez R., KhaloKakaie R., Jalali S.-M. E. A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 61. pp. 1–14.
- Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I., Shabarov A. N. Open pit mining monitoring support with information and analysis using web mapping technologies. *GIAB*. 2022. No. 8. pp. 56–70.
- Thiebes B., Bell R., Glade T., Jäger S., Anderson M. et al. A WebGIS decision-support system for slope stability based on limit-equilibrium modeling. *Engineering Geology*. 2013. Vol. 158. pp. 109–118.
- Feiyue Liu, Zhenqi Yang, Wenxue Deng, Tianhong Yang, Jingren Zhou et al. Rock landslide early warning system combining slope stability analysis, two-stage monitoring, and case-based reasoning: a case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2021. Vol. 80, Iss. 11. pp. 8433–8451.
- Verbilo P. E., Iovlev G. A., Petrov N. E., Pavlenko G. D. Application of information modeling technologies for surveying support of mining operations. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 60–79.
- Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I. Mining Complexity Assessment to Substantiate Deformation Monitoring at Open Pit Mines. *Journal of Mining Science*. 2021. Vol. 57, No. 6. pp. 986–994.
- Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I. Using the typification of mining-engineering facilities to substantiate deformation monitoring of opencast mining. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2020. No. 4(60). pp. 115–122.
- Cheskidov V. V., Kurenkov D. S., Manevich A. I. Modern methods and means of effective control in mines toward ecological and industrial safety. *GIAB*. 2017. No. 6. pp. 188–199.
- Glazunov V. V., Burlutskiy S. B., Shuvalova R. A., Zhdanov S. V. Improving the reliability of 3D modelling of a landslide slope based on engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 771–782.
- Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Pospekhov G. B., Straupnik I. A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *GIAB*. 2022. No. 12. pp. 77–93.
- Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. Integrated Multi-Level Geomonitoring of Naturaland-Technical Objects in the Mining Industry. *Journal of Mining Science*. 2018. Vol. 54, No. 4. pp. 535–540.
- Ismagilov R. I., Kozub A. V., Badtiev B. P., Pavlovich A. A. Implementation monitoring of safety at the construction area of a steep-inclined conveyor complex at the south open pit of Mikhailovsky GOK. *Gornaya promyshlennost*. 2020. No. 1. pp. 120–126.
- Melikhov M. V. Features of geoinformation space monitoring of mining natural-technical systems. *GIAB*. 2022. No. 12-1. pp. 29–41.
- Cheskidov V., Kassymkanova K.-K., Lipina A., Bornman M. Modern Methods of Monitoring and Predicting the State of Slope Structures. *Proceedings of IV International Innovative Mining Symposium*. 2019. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 105. 01001. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501001
- Mustafin M. G., Kologrivko A. A., Vasiliev B. Yu. Accuracy of digital terrain modeling based on periodic airborne laser scanning of a mining object. *Gornyi Zhurnal*. 2023. No. 2. pp. 56–62. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09