

Контроль и управление геомеханическим состоянием и устойчивостью конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров на основе сбора и анализа больших данных

М.В. Рыльникова¹, Д.А. Клебанов¹✉, В.В. Рыбин², И.Ю. Розанов²

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

² Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация
✉ Klebanov_d@ipkonran.ru

Резюме: При освоении месторождений твердых полезных ископаемых горнодобывающие предприятия сталкиваются с большим количеством проблем, связанных с необходимостью разработки и внедрения новых эффективных технологических решений по обработке информации о состоянии горнотехнической системы. Одним из способов решения указанных задач является использование на всех этапах освоения месторождений технологии больших данных, которые способны обеспечить устойчивое развитие горнопромышленных комплексов и эффективное управление геотехнологическими процессами на всех этапах освоения месторождений. Одним из важнейших процессов при открытой разработке месторождений является контроль геомеханических процессов, которые протекают в массиве горных пород и фиксируются системой мониторинга. В статье представлен подход к организации многоуровневой комплексной системы мониторинга устойчивости прибортового массива пород действующих карьеров на основе сбора и анализа больших данных. Предлагаемый подход базируется: 1 – на учете свойств и состояния массива горных пород, 2 – на учёте масштабного уровня контролируемых объектов. Все виды данных от различных типов источников информации должны быть собраны в единую информационную систему, где информация будет использована для автоматизированного расчета критериев оптимальной работы горнотехнической системы. Такой подход соответствует представлениям об иерархично-блочном строении массива пород, в пределах которого ведутся горные работы открытым способом и формируется карьерная выемка. Реализация предлагаемого подхода к контролю устойчивости бортов карьеров требует оснащения горнодобывающих предприятий широким диапазоном средств мониторинга и контроля, организации специальных геомеханических служб, организации единой информационной системы для анализа больших данных, что позволяет обеспечить необходимый уровень безопасности открытых горных работ.

Ключевые слова: большие данные, горнотехническая система, освоение недр, открытая разработка месторождений, геомеханический мониторинг, управление объемами данных, устойчивость бортов карьеров, безопасность ведения горных работ

Благодарности: Статья написана в рамках выполнения гранта Российского научного фонда №22617600142, <https://rscf.ru/project/22617600142/>

Для цитирования: Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Рыбин В.В., Розанов И.Ю. Контроль и управление геомеханическим состоянием и устойчивостью конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров на основе сбора и анализа больших данных. *Горная промышленность*. 2024;(4):121–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-121-128>

Control and management of geomechanical state and stability of structural elements of mining engineering elements in open-pit mines based on Big Data collection and analysis

M.V. Rylnikova¹, D.A. Klebanov¹✉, V.V. Rybin², I.Yu. Rozanov²

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

✉ Klebanov_d@ipkonran.ru

Abstract: When developing solid mineral deposits, mining companies face a large number of challenges related to the need of designing and implementing new efficient technological solutions to process information on the state of the mining engineering system. One of the ways to address these challenges is application of the Big Data technologies at all the field development stages.

Big Data can ensure sustainable development of mining complexes and efficient management of geotechnological processes at all the mining stages. Among the most important processes in surface mining is the control of geomechanical processes that take place in the rock mass and that are recorded by the monitoring system. The article presents an approach to organising a multilevel integrated system for monitoring the stability of the near-wall rock mass of operating open pits based on Big Data collection and analysis. The proposed approach is based on accounting for (1) the properties and the state of the rock mass, (2) the scale level of the controlled structures. All kinds of data from different types of information sources should be collected in a single information system, where this information will be used for automated calculation of criteria for optimal operation of the mining engineering system. This approach is consistent with the concepts of hierarchical-block structure of the rock mass, within which the open-pit mining operations are performed and the open-pit excavation is created. Implementation of the proposed approach to control the stability of open pit walls requires equipping the mining operations with a wide range of monitoring and control equipment, organization of special geomechanical services, creation of a unified information system to analyze the Big Data, which will make it possible to ensure the required level of safety of surface mining operations.

Keywords: big data, mining engineering system, subsoil development, open pit mining, geomechanical monitoring, data volume management, pit wall stability, safety of mining operations

Acknowledgements: The article was prepared within the framework of the Russian Science Foundation Grant No.22617600142, <https://rscf.ru/project/22617600142/>

For citation: Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Rybin V.V., Rozanov I.Yu. Control and management of geomechanical state and stability of structural elements of mining engineering elements in open-pit mines based on Big Data collection and analysis. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):121–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-121-128>

Введение

Современная горнодобывающая промышленность, играющая ведущую стратегическую роль в развитии национальной экономики России, сталкивается с множеством проблем, связанных с необходимостью разработки и внедрения новых эффективных технологических решений по обработке информации о состоянии горнотехнической системы (ГТС) при освоении месторождений твердых полезных ископаемых. По мнению ряда исследователей, использование на всех этапах освоения месторождений технологии больших данных (Бод) в эпоху ускоренного развития информационных и коммуникационных технологий призвано обеспечить устойчивое развитие горнопромышленных комплексов и эффективное управление геотехнологическими процессами [1].

Основное отличие традиционных логических исследований от исследования Бод заключается в том, что первые, как правило, сосредоточены на причинно-следственных связях, в то время как при исследовании Бод используется аналитическая индукция, применимая к огромному количеству специфической информации при освоении земных недр для статистического поиска, сравнения, синхронизации и классификации с использованием методов корреляционного анализа. Подразумевается, что существует определенная закономерность в отношениях между значениями двух или более переменных, а также скрытые корреляционные связи в наборах данных. В этом случае определение неочевидных на первый взгляд взаимосвязей между данными, поступающими из разных источников в пределах одной горнотехнической системы, позволит открывать и исследовать новые модели, знания и законы, обеспечивающие рациональное управление технологическими процессами горного предприятия. Кроме того, научное сообщество отмечает, что причинно-следственные связи параметров горнотехнических систем весьма зависимы от вмешательства человеческого фактора, тогда как исследования Бод способны в значительной степени снизить это влияние за

счет интеллектуального анализа данных для поиска корреляционных зависимостей и отбраковки случайных и фоновых значений.

Одним из важнейших процессов при открытой разработке месторождений является контроль геомеханических и геотехнологических процессов. Рассмотрим данный процесс как совокупность способов и методов, собирающих информацию о горном массиве.

Формирование на горных предприятиях систем контроля, управления и безопасности геомеханических процессов должно отвечать нескольким основным требованиям. Прежде всего система мониторинга должна быть комплексной, взаимодополняющей и многоуровневой. Иными словами, система должна сочетать нескольких методов исследований, которые взаимно дополняют друг друга и дают информацию о состоянии массива горных пород на различных масштабных уровнях.

Задачи контроля и оценки устойчивости функционирования горнотехнических систем методами геомеханического мониторинга

По длительности проведения различают два вида мониторинга: долгосрочный и оперативный [2]. Долгосрочный мониторинг организуется и функционирует длительный период отработки карьера (5 и более лет). Оперативный мониторинг обеспечивает контроль устойчивости участков бортов и уступов карьеров (разрезов) в локальных зонах, в зонах критических или развивающихся деформаций, в рабочих зонах и на участках расположения внутрикарьерной инфраструктуры.

Основными задачами долгосрочного мониторинга являются [2]:

- обнаружение признаков и прогноз развития крупномасштабных деформаций;
- своевременное оповещение технического руководителя о превышении критериев безопасности;
- разработка превентивных мероприятий по противодействию развитию деформаций.

Основными задачами оперативного мониторинга являются [2]:

- обнаружение признаков развития деформаций в рабочей зоне;
- оперативный контроль устойчивости откосов;
- своевременное оповещение технического руководителя о развитии деформационных процессов;
- разработка мероприятий по обеспечению устойчивости откосов бортов карьеров.

Кроме того, учитывая иерархично-блочное строение массива горных пород, виды и объемы областей деформирования и разрушения в зависимости от задач и масштабов мониторинга также можно подразделять на региональный и локальный уровни.

В задачи регионального мониторинга входит [3]:

- наблюдение за процессами деформирования массива горных пород, вмещающего эксплуатируемое месторождение;
- районирование карьера на отдельные участки по выявленному характеру процесса деформирования массива;
- выявление участков борта карьера, потенциально опасных с точки зрения устойчивости.

К задачам локального мониторинга относятся [3]:

- наблюдения за выявленными потенциально опасными участками деформирования массива горных пород;
- контроль состояния потенциально опасных участков бортов;
- прогнозирование развития процессов обрушения;
- анализ причин, характера и параметров деформаций и обрушений пород;
- разработка мероприятий по устранению локальных нарушений в массиве бортов.

Применяемые методы могут варьироваться в зависимости от конкретного горнотехнического объекта, но, как правило, состоят из комплекса геодезических, сейсмических и локальных методов контроля геомеханического состояния массива горных пород как на поверхности, так и в прибортовой зоне [4–6].

Характеристика основных методов комплексной системы мониторинга геомеханического состояния массива горных пород в соответствии с классификацией цифровых источников данных

С учетом классификации цифровых источников данных горнотехнических систем [7] рассмотрим каждую из систем геомеханического мониторинга как отдельный источник информации. Данная классификация является наиболее полной для горнотехнической системы с точки зрения определения источников цифровых данных и организации их сбора по признаку объекта их получения, поскольку классификация позволяет на этапе проектирования для каждого физического объекта обосновать порядок ввода источника информации в эксплуатацию, определить параметры получаемых сигналов и принципы их трансформации в цифровую форму и при необходимости установить требования к частоте получаемых данных, а также формат, пригодный для обработки, анализа, длительного хранения и условий использования данных.

Традиционные геодезические методы включают в себя такие классические методы, как нивелирные измерения I, II, III и IV классов и дальномерные измерения с помо-

щью тахеометров, и до сих пор остаются популярными в отечественной практике геомеханического мониторинга. Измерения выполняются как на базе системы фундаментальных геодезических пунктов, сформированной по периметру карьерной выемки, горного и земельного отводов горнодобывающего предприятия, так и на основе систем временных реперов, размещенных в пределах зон потенциальной неустойчивости откосов бортов. При выполнении подобных измерений объем получаемой информации зависит от размеров геомеханического полигона и количества опорных и рабочих пунктов. В среднем за одно измерение объем информации может составлять не более 1–2 Мб.

Также к числу геодезических методов относятся методы спутниковой геодезии, позволяющие контролировать перемещения в пределах всего геоблока, включающего в себя горный и земельный отводы горнодобывающего предприятия. Измерения выполняются приемниками, использующими в основном наиболее развитые в настоящее время системы GPS и ГЛОНАСС навигации. Приемники устанавливаются на фундаментальные пункты полигона. В основном для измерения медленных смещений в масштабе всего борта применяется методика статических измерений с последующей обработкой данных в специализированных программных комплексах. Объем получаемых данных также зависит от количества измеряемых пунктов и в среднем составляет 5 Мб в сутки от каждого приемника (инструмент находится на фундаментальном пункте 24 ч и запись осуществляется 1 раз в 30 с).

На рис. 1 приведен пример фундаментального полигона, на котором выполнялись как GNSS измерения, так и дальномерные измерения с помощью тахеометра.

Наземное и воздушное лазерное сканирование применяется в основном для картирования и изучения геологических структур в массиве горных пород, а также для создания цифровой модели рельефа (ЦМР). Однако при сравнении двух моделей уступов можно установить объем измененного рельефа местности и тем самым определить участки борта карьера или вмещающего массива, которые подвержены наибольшей деформации и разрушению. В данном случае объем получаемой информа-

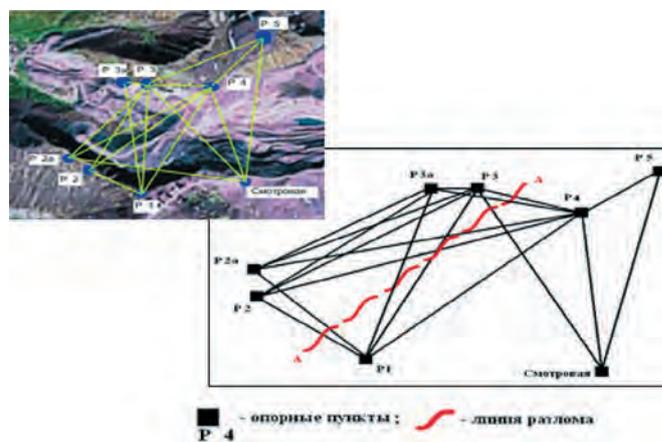


Рис. 1
Общая конфигурация сети фундаментальных пунктов в карьере

Fig. 1
A general layout of the permanent bench mark grid in the open-pit mine

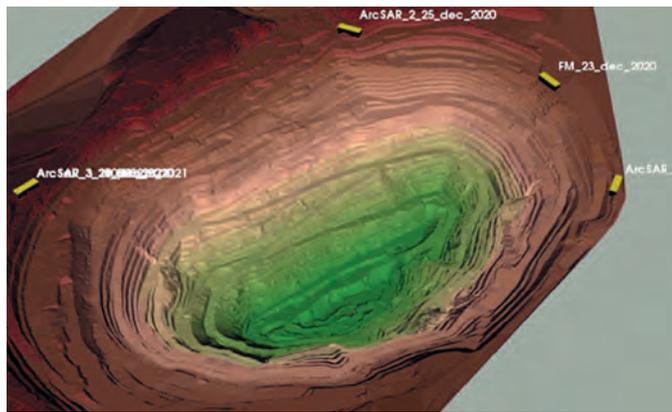


Рис. 2
Схема организации системы радарного мониторинга в карьере: коричневым цветом отмечена верхняя часть бортов карьера; зелёным – глубинная часть карьера; жёлтые прямоугольники – места установки радаров устойчивости, их номер и тип

Fig. 2
A schematic representation of the radar monitoring system in the open pit: brown colour indicates the upper part of the open pit walls; the deep part of the open pit is marked in green; the yellow boxes indicate the locations of the stability radars, their number and type

ции зависит от размера объекта мониторинга, а также выбранной детализации и в среднем может составлять от 500 Мб до 1,5–2 Гб в сутки.

Одним из самых эффективных и широко используемых в отечественной и зарубежной практике методов мониторинга устойчивости бортов и уступов карьеров является метод наземных радарных измерений. Измерения, выполняемые радаром, основаны на использовании эффекта наложения (интерференции) электромагнитных волн. Ключевыми преимуществами данных систем являются периодичность измерений, которая в среднем составляет около 2 мин, и то, что измерения могут выполняться при любых погодных условиях, а также значительной запыленности и загазованности. В среднем один радар передает 2 Гб информации в сутки.

На рис. 2 представлена схема организации системы радарного мониторинга, в которой используется 4 радара.

Сейсмические методы включают в себя прежде всего систему микросейсмического контроля, с помощью которой можно отслеживать процессы роста и раскрытия трещин в законтурном массиве и тем самым прогнозировать начало потери устойчивости ещё до первых её проявлений непосредственно на контуре карьерной выемки (так называемый пассивный сейсмический метод) (рис. 3) [8]. Данная система является автоматизированной и способна самостоятельно выделять «полезную» информацию для дальнейшей обработки. Объем поступаемых «полезных» данных зависит от характеристик тех процессов, которые происходят в самом карьере (например, выполнение технологических операций), а также от событий, которые происходят в законтурном массиве. В среднем объем данных при фиксации одного события составляет 20 Мб.

Помимо микросейсмических методов хорошо зарекомендовали себя геофизические методы, основанные на принципах разведочной геофизики (активные сейсмические методы). В частности, широко применяются методы сейсмической томографии, требующие организации

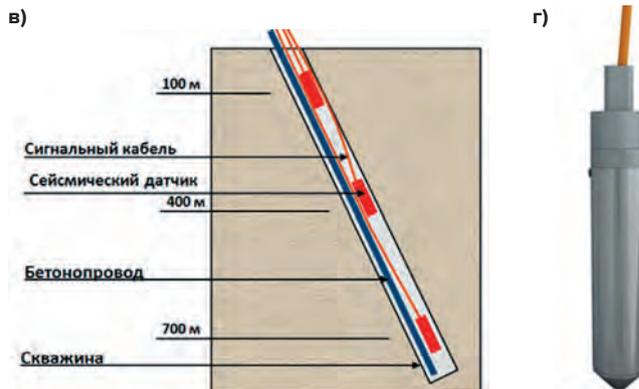
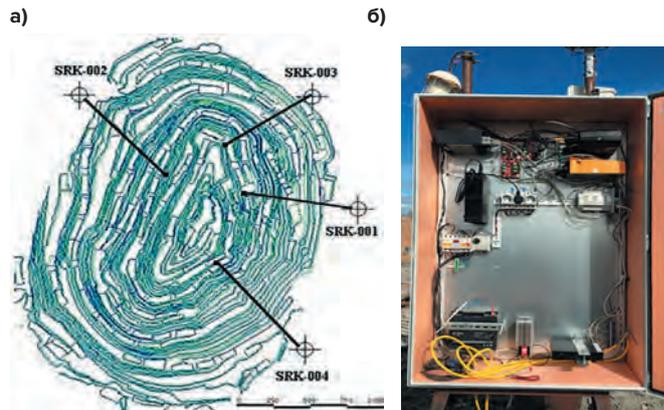


Рис. 3
Организация системы микросейсмического контроля законтурного массива горных пород: а – расположение скважины с размещением сейсмических датчиков на контуре бортов карьера; б – пункт регистрации результатов мониторинга у устья скважины; в – схема расположения датчиков в скважинах; г – вид сейсмического датчика

Fig. 3
Arrangement of the microseismic control system of the surrounding rock mass: а – location of boreholes with seismic sensors at the edge of the pit walls; б – a station for recording the monitoring results at the borehole head; в – layout of the sensors in the boreholes; г – a view of the seismic sensor

стационарного полигона в пределах карьера и дающие там более точный результат, и сейсмопрофилирования, эксплуатирующие временные полигоны и не требующие предварительной подготовки, но обеспечивающие меньшую точность результатов [9]. Геофизические методы разведочной геофизики применяются в выявленных зонах локальной неустойчивости в карьере (рис. 4). В данном случае объем информации зависит от длины полигона и составляет в среднем 40–50 Мб.

Также в выявленных опасных зонах неустойчивости в карьере применяются локальные методы контроля. Эти методы, как правило, основаны на использовании специально пробуренных в опасных зонах скважинах. К числу локальных методов относятся: телевизионная съёмка стволов скважин, позволяющая давать количественную оценку изменения уровня трещиноватости в массиве горных пород с глубиной, оценивать уровень обводненности отдельных участков массива, выделять различные варианты геофизического каротажа, в частности, ультразвукового, позволяющие получать геофизическую

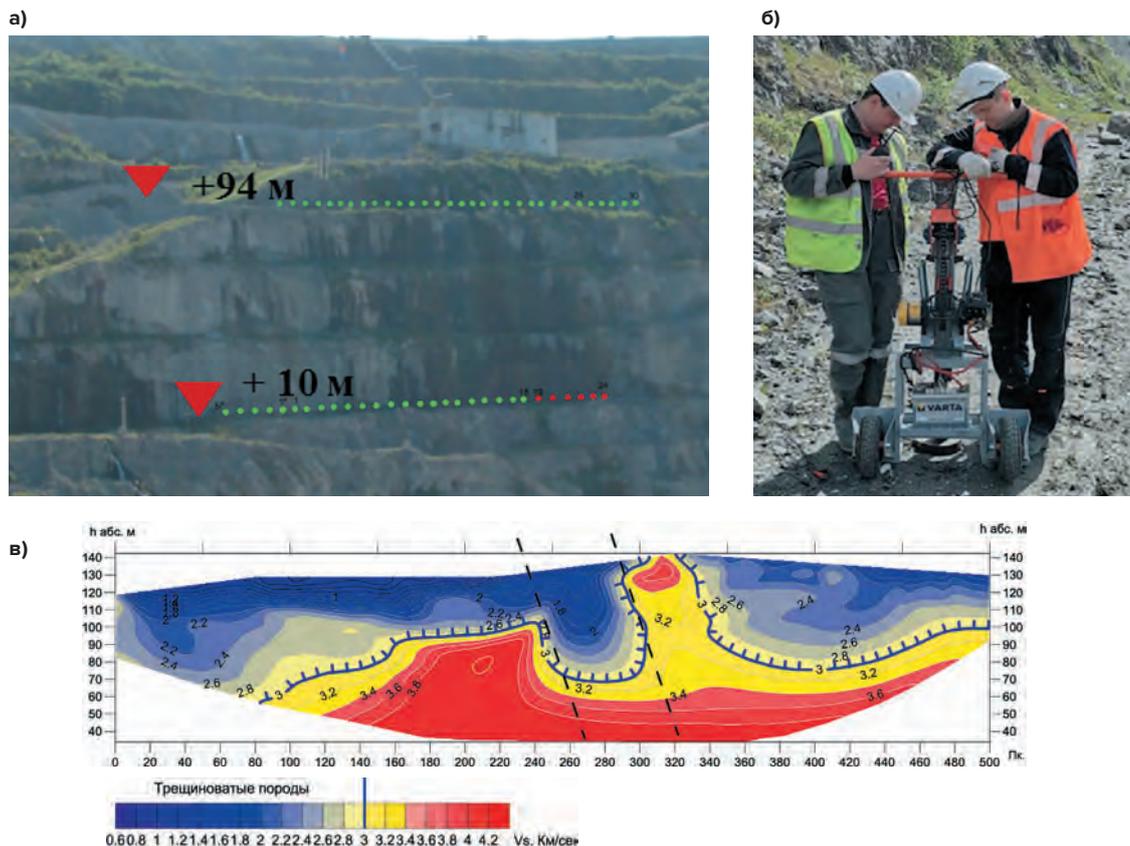


Рис. 4
Общая схема сейсмического полигона (а), общий вид применяемого оборудования, обеспечивающий источник сейсмических импульсов (б), и скоростная модель поперечных (VS) волн исследуемого участка борта карьера (в)

Fig. 4
A general layout of the seismic test site (a), a general view of the equipment used, providing the source of seismic pulses (б) and a velocity model of transversal (VS) waves of the investigated part of the open pit wall (в)

и геомеханическую информацию в глубинном массиве горных пород (рис. 5). Объем получаемой видеoinформации зависит от количества наблюдаемых скважин и их длины. В среднем для одной скважины длиной 50 м объем составляет 200–300 Мб.

Для наблюдений за скрытыми смещениями в массиве горных пород, а также для определения местоположения поверхности скольжения в борту карьера используются датчики мониторинга глубинных деформаций, такие как различного рода инклинометры, скважинные экстензометры, рефлектометры и др.

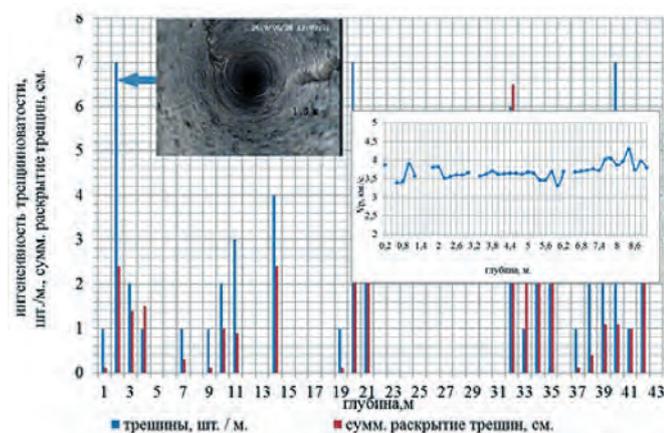


Рис. 5
Сопоставительный анализ результатов исследования приборного массива пород комплексом локальных методов (телевизионной съёмки ствола скважины и ультразвукового каротажа околоскважинного массива пород)

Fig. 5
Benchmarking studies of the survey results of the near-wall rock mass using a set of local methods (video survey of the borehole and ultrasonic logging of the near-borehole rock mass)

Инклинометр представляет собой прибор, размещаемый в наблюдательной скважине, как правило, обсаженной стальной или полиэтиленовой трубой для регистрации бокового смещения. В процессе деформации обсадные трубы скважины перемещаются и искривляются согласно сдвижениям в массиве. Эти изменения автоматически измеряются определением наклона чувствительного элемента инклинометра. Методы инклинометрии позволяют определять пространственную ориентировку стволов наблюдательных скважин, интенсивность их искривления в процессе деформирования массива, ориентировку искривления в пространстве и, соответственно, смещение в массиве горных пород.

Скважинные экстензометры используются для наблюдения за изменениями расстояния между одним или более анкерами, закрепленными в скважине и ее устье. По этим изменениям определяются смещения массива горных пород в направлении вдоль оси скважины. Экстензометры чаще всего используют для мониторинга выявленных структурных нарушений, которые влияют на устойчивость откосов. Объем информации, получаемый от такого рода датчиков сдвижения, приблизительно составляет 2 Мб в сутки.

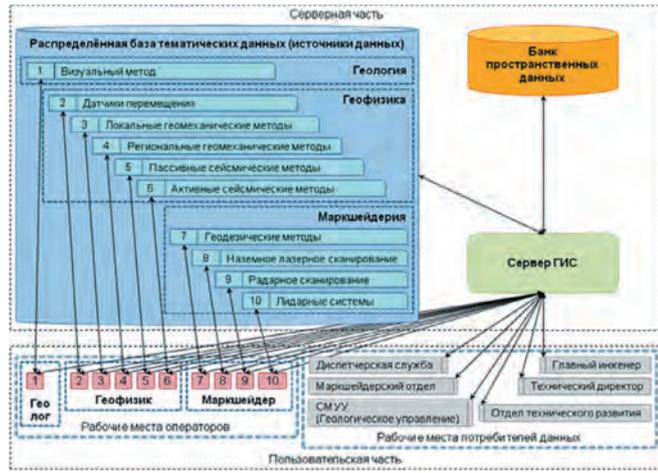


Рис. 6
Структурная схема организации системы мониторинга устойчивости конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров на основе сбора и анализа больших данных
Источник: [4]

Fig. 6
A structural diagram of arranging a system to monitor the stability of structural elements of mining engineering elements in open-pit mines based on Big Data collection and analysis
Source: [4]

Организация системы сбора, хранения, анализа, сортировки и оперативного контроля показателей для принятия мер реагирования

Организация и работа комплексной системы мониторинга, которая включает описанные методы, должна осуществляться специально организованной геомеханической службой горного предприятия при методическом сопровождении научной организации. При этом некоторые работы, связанные с мониторингом устойчивости, применением отдельных методов контроля, могут выполняться подрядными организациями, располагающими соответствующими специалистами и оборудованием.

Взаимодействие между геомеханической службой и руководством горнодобывающего предприятия должно быть организовано на базе горной геоинформационной системы, общая схема которой показана на рис. 6. В рамках данной системы организуются автоматизированные рабочие места сотрудников геомеханической службы предприятия различной специализации (геолог, геофизик, маркшейдер, геомеханик и др.), информация о геомеханической ситуации передаётся на рабочее место технического директора (главного инженера), главных специалистов предприятия, в диспетчерскую службу и др. (см. рис. 6).

Таблица 1
Объемы информации при организации системы мониторинга устойчивости конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров

Table 1
Volumes of information in arranging a system to monitor the stability of structural elements of mining engineering elements in open-pit mines

Тип источника данных	Частота генерации данных	Объем данных, передаваемых от источника в год	Тип данных
Нивелирные измерения 1, 2, 3 и 4-го классов	1–2 МБ за съемку. Съемка производится 4–10 раз в год	20 МБ	Текстовый файл
Спутниковый мониторинг реперных точек (геодезический метод)	5 МБ в сутки (в зависимости от кол-ва точек контроля)	1825 МБ	Текстовый файл
Радарный метод мониторинга	2 ГБ в сутки. На некоторых предприятиях в рамках одной горнотехнической системы используется несколько радаров.	730 000 МБ	Формат данных может быть различным в зависимости от фирмы производителя. Как правило, данные должны содержать информацию об индикаторе (номер) ячейки (пикселя), координаты центра пикселя, о фазе сигнала, амплитуде, коэффициенте отражения и т.д.
Наземное или воздушное лазерное сканирование	1,5–2 ГБ в сутки	730 000 МБ	Формат данных также может различаться и содержать в себе облако точек и следующую информацию: координаты точки, дальность до точки, вертикальный и горизонтальный углы, амплитуду сигнала, коэффициент отражения, а также информацию о реальном цвете объекта (RGB)
Сейсмический метод мониторинга	20 МБ за одну фиксацию 1 точки. В среднем 5–10 точек на ГТС	8000 МБ	Текстовый файл
Геофизический метод мониторинга деформаций бортов	40–50 МБ за одно измерение	16 000 МБ	Текстовый файл
Телевизионная съемка стволов скважин	200–300 Мб за съемку	800 МБ	Видео
Скважинные экстензометры	2 Мб в сутки	7300 МБ	Текстовый файл

Обобщив и просуммировав данные, которые собираются от различных источников геомеханического мониторинга массива горных пород, получаем, что в год комплексная система мониторинга, где информация собирается как дискретно, при фиксации события, связанного с деформацией массива горных пород, так и непрерывно, формирует не менее 1,5 ТБ данных в год.

Обобщенная таблица, которая включает объемы информации при организации системы мониторинга устойчивости конструктивных элементов горнотехнических конструкций карьеров, представлена в табл. 1.

С учетом формирования производных показателей от собираемых разноразмерных данных и их объема можно классифицировать собираемые и расчетные параметры как Большие данные.

При этом объем информации от различных источников данных напрямую не зависит от скорости получения данных, так, например, данные георадаров могут превышать десятки гигабайт, а данные сейсмодатчиков и нивелирные измерения о состоянии горного массива – не более 15–20 Гб в год. Классификация с точки зрения объема получаемой информации имеет значение для создания систем хранения данных, при этом методы обработки данных зависят в основном от типа данных, а не объема получаемой информации. Исходные данные от всех источников загружаются в так называемые Data Lake – облака данных, которое принимает любые файлы всех форматов. Источник данных тоже не имеет никакого значения. Уже потом, когда данные сохранены, с ними можно работать – извлекать по определенному шаблону в классические базы данных или анализировать и обрабатывать прямо внутри data lake (озеро данных) [10].

Пока методы автоматизированного анализа всей информации из вышеописанных источников не применяются в России, хотя каждый из методов мониторинга формирует информацию, которая самостоятельно имеет ценность и рассматривается каждой из служб как значи-

мая. Таким образом, для применения в будущем для решения различных задач оптимизации работы горнодобывающего предприятия с развитием методов обработки больших данных преимуществом может служить использование систем сбора неструктурированной информации и применение методов анализа всех видов данных из систем мониторинга. За счет того, что данные собираются из различных источников и не проходят первичной трансформации и агрегации, возможно формулировать неявные гипотезы и проверять их реализуемость. Например, для оптимизации декадного планирования горных работ определить критичные показатели данных каждого из методов мониторинга.

Заключение

Предлагаемый подход к организации многоуровневой комплексной системы мониторинга устойчивости прибортового массива пород действующих карьеров на основе сбора и анализа больших данных базируется, с одной стороны, на учёте свойств и состояния массива горных пород, с другой стороны, на учёте масштабного уровня контролируемых объектов. Все виды данных от различных типов источников информации должны быть собраны в единую информационную систему, где информация будет использована для автоматизированного расчёта критериев оптимальной работы горнотехнической системы. Такой подход в полной мере соответствует представлениям об иерархично-блочном строении массива пород, в пределах которого ведутся горные работы открытым способом и формируется карьерная выемка. Реализация предлагаемого подхода к контролю устойчивости бортов карьеров требует оснащения горнодобывающих предприятий широким диапазоном средств мониторинга и контроля, организации специальных геомеханических служб, организации единой информационной системы для анализа больших данных, что позволяет обеспечить необходимый уровень безопасности открытых горных работ.

Список литературы / References

1. Захаров В.Н., Гвишиани А.Д., Вайсберг Л.А., Дзеранов Б.В. Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем. *Горный журнал*. 2021;(11):45–52. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.11.06>
Zakharov V.N., Gvishiani A.D., Vaisberg L.A., Dzeranov B.V. Big Data and sustainable functioning of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(11):45–52. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.11.06>
2. Рыльникова М.В., Алексеев А.Б., Есина Е.Н., Зотеев О.В., Ливинский И.С., Макаров А.Б. и др. *Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов*. М.: ИПКОН РАН; 2022. 90 с.
3. Rozanov I.Yu., Zavyalov A.A. Specifics in organization of the slope stability monitoring in high-strength hard rock massif of the Kovdor deposit. In: Litvinenko V. (ed.) *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*. Vol. 1: Proceedings of the XV International Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO (St. Petersburg Mining University, Russia, 13–17 May 2019). London: CRC Press; 2019, pp. 229–234. <https://doi.org/10.1201/9781003014577-29>
4. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Каган М.М., Панасенко И.Г. Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия. *Горный журнал*. 2020;(1):53–57. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>
Rybin V.V., Konstantinov K.N., Kagan M.M., Panasenko I.G. Methodology of integrated stability monitoring in mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):53–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.10>

5. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Наговицын О.В. Структура комплексной системы мониторинга устойчивости объектов открытых горных работ с применением цифровых технологий. *Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых*. 2021;(4):70–77. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210407>
Rybin V.V., Konstantinov K.N., Nagovitsyn O.V. Structure of integrated stability monitoring in open pit mining using digital technologies. *Journal of Mining Science*. 2021;57(4):601–606. <https://doi.org/10.1134/S1062739121040074>
6. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Розанов И.Ю. Многоуровневый подход к организации мониторинга устойчивости бортов карьеров. *Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых*. 2021;(5):106–113. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210510>
Rybin V.V., Konstantinov K.N., Rozanov I.Y. A multilevel approach to pitwall stability monitoring. *Journal of Mining Science*. 2021;57(5):805–811. <https://doi.org/10.1134/S1062739121050100>
7. Захаров В.Н., Каплунов Д.Р., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Методические подходы к стандартизации сбора, хранения и анализа данных при управлении горнотехническими системами. *Горный журнал*. 2022;(12):55–61. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>
Zakharov V.N., Kaplunov D.R., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Methodical approaches to standardization of data acquisition, storage and analysis in management of geotechnical systems. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(12):55–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>
8. Каган М.М., Чернобров Д.С. Мониторинг сейсмоактивности прибортового массива карьера на основе сейсморегистраторов в глубоких скважинах за конечным контуром. *Горная промышленность*. 2023;(S1):84–88. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-84-88>
Kagan M.M., Chernobrov D.S. Monitoring of seismic activity in near-wall rock masses of open pits using seismic recorders in deep boreholes beyond the final pit boundary. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):84–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-84-88>
9. Рыбин В.В., Константинов К.Н., Старцев Ю.А. Оценка динамики изменения упругих характеристик массива пород в борту карьера. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023;(5):40–46.
Rybin V.V., Konstantinov K.N., Startsev Yu.A. Time history of elastic characteristics in pitwall rock mass. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2023;(5):40–46. (In Russ.)
10. Захаров В.Н., Клебанов Д.А., Макеев М.А., Радченко Д.Н. Анализ методов подготовки и преобразования информации, поступающей в хранилища данных для эффективного управления горнотехнической системой. *Горная промышленность*. 2023;(5S):10–17. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-10-17>
Zakharov V.N., Klebanov D.A., Makeev M.A., Radchenko D.N. Analysis of methods to prepare and transform information entering data repositories for effective management of the mining system. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):10–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-10-17>

Информация об авторах

Рыльникова Марина Владимировна – доктор технических наук, профессор, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: rylnikova@mail.ru

Клебанов Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, зав. лабораторией интеллектуальных систем и цифровых технологий, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: Klebanov_d@ipkonran.ru

Рыбин Вадим Вячеславович – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

Розанов Иван Юрьевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация

Information about the authors

Marina V. Rylnikova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: rylnikova@mail.ru

Dmitry A. Klebanov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory of Intelligent Systems and Digital Technologies, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: Klebanov_d@ipkonran.ru

Vadim V. Rybin – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief of Laboratory of Geomonitoring and Slope Stability, Rock Mechanics Department, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

Ivan Yu. Rozanov – Cand. Sci. (Eng.), Research Scientist, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.05.2024

Поступила после рецензирования: 04.07.2024

Принята к публикации: 08.07.2024

Article info

Received: 25.05.2024

Revised: 04.07.2024

Accepted: 08.07.2024