

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ СВОЙСТВ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

В.А. Хакулов¹, В.А. Шаповалов¹, В.Н. Игнатов², М.В. Игнатов¹, Ж.В. Карпова¹

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова,
Нальчик, Россия, e-mail: vkh21@yandex.ru

² Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова,
Новочеркасск, Россия

Аннотация: Добыча значительной части минерального сырья связана с тенденцией ухудшения горно-геологических условий из-за роста изменчивости структурных и прочностных свойств обрабатываемых скальных массивов. Отсутствие оперативных методов получения достоверной информации порождает проблему субъективного завышения удельного расхода взрывчатых веществ и бурения, что сопровождается разрушением массива за пределами проектных контуров отбойки, интенсивным образованием искусственной трещиноватости, снижением устойчивости пород, нарушением и усложнением технологии горных работ. В этих условиях рентабельность горного производства снижается как из-за роста прямых затрат, так и из-за усложнения геотехнологии, снижения уровня безопасности проведения горных работ. Кроме того, связанное с перерасходом ВВ выполняемое углов откоса уступов и рабочего борта карьера приводит к дополнительным потерям рабочих площадей карьера, снижающим производительность по горной массе на каждый погонный метр фронта работ. Таким образом, изменчивость обрабатываемых массивов горных пород и низкая достоверность методов мониторинга состояния массивов не позволяют выделять геомеханическую составляющую в потере производительности горных комплексов, тем самым снижают эффективность проектирования и текущего управления горными работами. В этих условиях растет актуальность создания объективных методов мониторинга и анализа эффективности геомеханического обеспечения безопасности и эффективности геотехнологии. Предложены апробированные решения по созданию методологии, аппаратно-программных комплексов мониторинга и анализа эффективности геомеханического обеспечения процессов горных работ.

Ключевые слова: мониторинг геомеханического состояния и трансформации свойств массивов, выполняемое углов откоса уступов, районирование по взрываемости, геомеханическое обеспечение безопасности и эффективности геотехнологии, искусственная трещиноватость, удельный расход взрывчатых веществ и бурения.

Для цитирования: Хакулов В. А., Шаповалов В. А., Игнатов В. Н., Игнатов М. В., Карпова Ж. В. Совершенствование методологии мониторинга геомеханического состояния и трансформации свойств массивов горных пород для обеспечения безопасности и эффективности геотехнологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9. – С. 68–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_68.

Improving methodology of monitoring geomechanical behavior and property transformation in rock mass toward safe and efficient geotechnology

V.A. Khakulov¹, V.A. Shapovalov¹, V.N. Ignatov², M.V. Ignatov¹, Zh.V. Karpova¹

¹ H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia, e-mail: vkh21@yandex.ru

² M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russia

Abstract: Mineral mining mostly features a trend of worsening of geological conditions due to increased variability of structure and strength properties in rock masses. The lack of on-line methods to acquire reliable information brings a problem connected with the subjective overevaluation of powder factor and intensity in drilling and blasting, which ends with failure of perimeter blasting, intense induced fracturing, instability of rocks, and with technological violations and complications. In this case, profitability of mining drops due to direct cost escalation, complication of geotechnology and decreased safety. Furthermore, flattening of pitwall slopes because of excessive powder factor leads to extra loss of active areas in open pits, which reduces production output per each meter of mining front. In this manner, rock mass variability and low integrity of monitoring methods make it impossible to distinguish the geomechanical component in inefficiency of mining systems, which impairs geomechanical safety and weakens geotechnology performance. Under the circumstances, it is very urgent to create objective methods of geomechanical monitoring and analysis toward enhanced safety and efficiency of geotechnology. This article describes some approved decisions on methodology and software/hardware systems for geomechanical monitoring and analysis in the course of mining.

Key words: monitoring of geomechanical behavior and property transformation in rock mass, pitwall slope flattening, blastability zoning, geomechanical safety and efficiency of geotechnology, induced fracturing, powder factor and drilling intensity.

For citation: Khakulov V. A., Shapovalov V. A., Ignatov V. N., Ignatov M. V., Karpova Zh. V. Improving methodology of monitoring geomechanical behavior and property transformation in rock mass toward safe and efficient geotechnology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9):68-83. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_68.

Введение

Добыча значительной части минерального сырья связана с обработкой скальных массивов полезного ископаемого и вмещающих пород. При этом наблюдается тенденция к ухудшению горно-геологических условий обработки месторождений. Из-за роста изменчивости структурных и прочностных свойств обрабатываемых массивов горных пород эффективность работы современного оборудования снижается. В настоящее время сформировалась тенденция к продвижению технологий и оборудования, менее

зависимых от изменения горно-геологических условий, в частности, менее зависимых от изменчивости структурных и прочностных свойств массивов горных пород [1 – 3]. Например, использование экскаваторов большой емкости ковша в теории позволяет увеличить предельный размер негабаритных фракций и снизить зависимость от изменчивости структурных и прочностных свойств массивов горных пород [2 – 4]. Но на практике производительность экскаваторов зависит от факторов, которые имеют как геомеханическую, так и технологическую

составляющие [5]. Эти составляющие существующими методологиями плохо разделяются [3–6].

Обычно хорошо выделяются технологические факторы, вызывающие полные простои горных комплексов, такие как отсутствие горной массы, отсутствие транспорта, отсутствие электроэнергии. Например, наличие жесткой технологической связи продвижения горных работ на верхних и нижележащих горизонтах может вызвать простои оборудования, причины этих простоев однозначно классифицируются. В то же время из-за высокого удельного веса субъективной информации, из которой сложно выделить геомеханическую составляющую о состоянии массивов горных пород, сложно реализуется объективный факторный анализ потерь производительности работающего горного комплекса. В этих условиях важен мониторинг геомеханического обеспечения как безопасности, так и эффективности геотехнологии от-

крытыми горными работами по двум направлениям:

- обеспечение безопасности открытых горных работ через соответствие конструкции борта и параметров элементов системы разработки геомеханическому состоянию массивов горных пород. То есть предельные значения угла наклона рабочего и нерабочего борта карьера устанавливают в зависимости от структурных и прочностных свойств массивов горных пород;
- повышение эффективности горных работ через приведение параметров геотехнологии в соответствие с геомеханическим состоянием массивов горных пород. Параметры разработки, и в частности параметры буровзрывных работ, приводят в соответствие со структурными и прочностными свойствами разрабатываемых массивов горных пород.

Необходимо отметить, что геомеханическое обеспечение отработки месторождений, представленных однородными устойчивыми массивами горных пород, обычно не вызывает особых затруднений как в части обеспечения безопасности, так и в части обеспечения эффективности геотехнологии. В то же время изменчивость массивов горных пород по структурным и прочностным свойствам затрудняет своевременное получение достоверной информации. В результате субъективного завышения удельного расхода взрывчатых веществ и бурения снижается эффективность проектирования и проведения массовых взрывов. Из-за роста расхода бурения увеличивается время подготовки блоков под взрыв, появляется тенденция распыления буровзрывных работ при отбойке блоков частями. Распыленность буровзрывных работ не позволяет создать достаточных запасов отбитой горной массы для обеспечения бесперебойной работы горного оборудования. При этом имеет место жесткая зависимость трудоемкости произ-

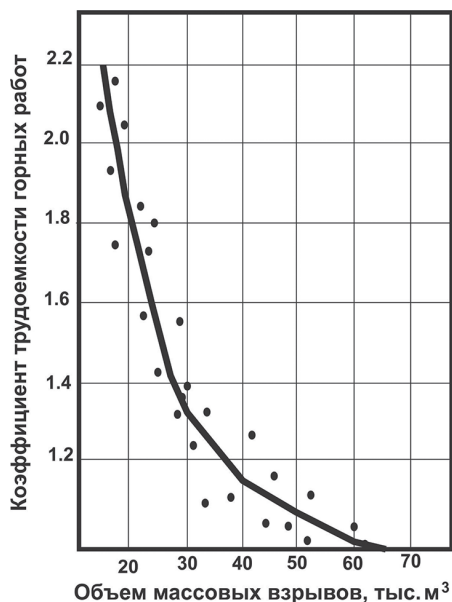


Рис. 1. Зависимость коэффициента трудоемкости производства горных работ от объемов отбойки
Fig. 1. Dependence of the coefficient of labor intensity of mining operations on the volume of breaking

водства горных работ от концентрации горных работ, выражающейся через объемы массовых взрывов (рис. 1) [7].

Кроме того, завышение удельного расхода, особенно по оконтуривающему ряду, приводит к разрушению массива за пределами проектных контуров отбойки и выполаживанию углов откоса уступов. Например, в масштабах «Мукуланского» карьера под откосами уступов терялось до 130 м рабочей площади по ширине.

Около 22% рабочих площадей теряется из-за снижения до 45° (вместо 60° по проекту) среднего угла откоса уступов. В свою очередь потери рабочих площадей карьера снижают производительность по горной массе до 2 тыс. м³ на 1 пог. м фронта работ.

Общеизвестно, что разрушение массива горных пород за пределами проектных контуров отбойки, связанное с завышением расхода на бурение и взрывчатых веществ сопровождается интенсивным процессом искусственного трещинообразования и ослабления массива горных пород. Прочностные свойства нарушенного взрывными работами массива снижаются на 45–75%. Это создает проблему понижения устойчивости борта карьера и снижения уровня безопасности проведения горных работ. Данная проблема особенно актуальна для глубоких или нагорных карьеров, когда для обеспечения высокопроизводительной работы, при минимальном текущем коэффициенте вскрыши, горные работы в зонах концентрации ведутся более широкими рабочими площадками.

Зоны концентрации в течение года формируются и расформируются в виде участков рабочей зоны по высоте. Процесс движения зон концентрации горных работ сопровождается консервацией (расконсервацией) участка борта карьера по высоте. Эта технология особенно уязвима из-за ошибок райониро-

вания массивов горных пород по взрываемости. Прежде всего, проявляется проблема заоткоски ослабленного искусственной трещиноватостью массива горных пород. Более того, при расконсервации зоны концентрации имеет место проблема ведения горных работ в стесненных условиях, на которую накладывается проблема безопасности и сложности технологии отработки ослабленных массивов горных пород. Для обеспечения безопасности и эффективности геотехнологии необходимо совершенствование методологии мониторинга геомеханического состояния и трансформации свойств массивов горных пород.

Необходимо отметить, что при снижении концентрации трудоемкость горных работ увеличивается. Для оценки влияния стесненных условий разработки на трудоемкость производства горных работ предлагается специальный коэффициент приведения трудоемкости производства горных работ. Коэффициент показывает, во сколько раз снижается значение среднемесячной производительности экскаватора на 1 м³ емкости ковша в рассматриваемой зоне относительно нормальных условий. Данный коэффициент для нормальных условий принимается равным 1. Для одной и той же зоны значение коэффициента приведения трудоемкости производства горных работ может меняться в пределах от 1 до 4,5 в зависимости от изменения степени влияния отрицательных условий разработки. То есть предлагается критерий правомерного сравнения объемов вскрыши, разных по трудоемкости (в силу стесненных условий разработки). Производительность экскаватора определяется по общеизвестным формулам, которые включают такие технические параметры, как емкость ковша, время цикла экскавации и ряд коэффициентов, учитывающих реальное наполнение ковша, а также удельный вес вспомогатель-

ных операций. При этом даже в цикле экскавации могут быть потери времени относительно минимальных паспортных значений как за счет геомеханической, так и за счет технологической составляющих. Так, например, если время черпания может увеличиваться в основном за счет характеристики экскавируемой горной массы и состояния подошвы уступа, то время поворота к транспортному средству на разгрузку и поворота в забой зависят от технологического параметра — угла поворота. От геомеханической составляющей напрямую зависит коэффициент разрыхления породы в ковше. Коэффициент наполнения ковша больше зависит от технологической составляющей. Даже в экскаваторных забоях с хорошо подготовленной в процессе взрывной отбойки горной массой коэффициент наполнения ковша постепенно снижается на протяжении технологического цикла отработки забойного блока. Максимальный коэффициент наполнения ковша наблюдается только в начальный период технологического цикла отработки забойного блока и при наличии компактного развала горной массы. По мере выемки из одного положения

экскаватора в глубину забойного блока высота развала горной массы в пределах радиуса черпания становится уже недостаточной для наполнения ковша. В результате за счет снижения коэффициента наполнения ковша наблюдается увеличение удельного веса неполных циклов. То есть по технологической причине снижается ритмичность погрузки горной массы в автосамосвалы. В то же время существующие методы мониторинга производительности карьерных экскаваторов из-за значительного влияния субъективной составляющей не позволяют выделять удельный вес именно геомеханической составляющей в потере производительности горных комплексов.

Изменчивость обрабатываемых массивов горных пород и низкая достоверность методов мониторинга состояния массивов не позволяют в процессе оперативного управления решать задачу обеспечения производительной работы оборудования. Для укрупненной оценки имеющихся резервов совершенствования технологии выполнен статистический анализ работы карьера «Мукуланский» за месяц. Данные, характеризующие про-

Укрупненный анализ горнотехнических условий работы экскаваторов
Aggregated analysis of mining conditions for excavators

№ пп	Экскаватор ЭКГ8И	Объем фактический, м ³	Часовая производительность, м ³	Средний объем отбойки, тыс. м ³	Коэффициент трудоемкости	Коэффициент использования, план/ факт	Средняя высота уступа, м	Средняя категория по взрываемости
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	№ 1	77 000	252,4	40,1	1,11	0,75/0,41	10,9	IV
2	№ 2	114 000	319	52,1	1,03	0,75/0,48	14,5	IV
3	№ 3	63 000	191	31,1	1,32	0,75/0,44	10,1	V
4	№ 4	31 800	192,7	28,3	1,39	0,75/0,22	9,7	IV
5	№ 5	35 000	108	19,4	1,79	0,75/0,44	7,3	IV
6	№ 6	13 900	293,2	48,7	1,08	0,75/0,64	13,3	IV
7	№ 7	140 440	270,5	43,3	1,11	0,75/0,7	11,6	V
8	№ 8	94 174	248,4	41,3	1,12	0,75/0,51	12,1	V
	Итого	569 314	251,5	40,8	1,18	0,75/0,50	11,7	4,5

шедший период, не могут быть использованы для непосредственной оперативной корректировки геотехнологии.

В то же время они подтверждают влияние геомеханической и технологической составляющих на производительность оборудования (см. таблицу). В частности, как видно из данных таблицы, широкий разброс таких важных параметров и показателей, как производительность экскаватора, коэффициент использования оборудования, напрямую зависит от концентрации горных работ, которая выражается в среднем объеме массового взрыва. При этом весьма показателен факт, что геомеханическая составляющая — ее характеризует девятая колонка таблицы (средняя категория по взрываемости) — часто оказывает меньшее влияние на производительность экскаватора, чем технологическая составляющая. Например, самая низкая производительность — 108 м³/ч (экскаватор № 6) получена при отработке наиболее слабых пород IV категории по взрываемости. При этом гораздо более высокая производительность отмечалась экскаваторами при отработке пород большей категории по взрываемости (№ 3, № 7, № 8). Это подтверждает, что данная методология не позволяет разделять технологическую и геомеханическую составляющие коэффициентов наполнения ковша и вспомогательных операций. Низкий коэффициент использования горного оборудования имеет также геомеханическую составляющую.

Важным компонентом функционирования системы является механизм объективного контроля выполнения требований горного производства к качеству отбойки горной массы, т.е. мониторинг геомеханического обеспечения требований геотехнологий. На практике это должен быть аппаратно-программный комплекс, выполняющий объективный мониторинг всех показателей, опреде-

ляющих производительную работу грузочного оборудования.

Аналогичные выводы можно сделать по целому ряду месторождений, где в силу изменчивости структурных и прочностных свойств массивов горных пород, а также изменчивости технологических факторов имеет место значительный, не прогнозируемый существующими методиками разброс производительности оборудования.

Многие существующие методологии лишь подтверждают наличие неиспользуемых резервов, реализовать на практике которые можно при наличии средств объективного мониторинга и анализа эффективности геомеханического обеспечения.

В данной работе предлагаются апробированные решения по созданию методологии на основе продвижения аппаратно-программного комплекса мониторинга и анализа эффективности геомеханического обеспечения процессов горных работ.

Методы

Предлагается новый подход к построению системы объективного мониторинга эффективности геомеханического обеспечения процессов горных работ, который позволяет оперативно определять неиспользуемые резервы для совершенствования перспективного планирования и оперативного управления. Предлагаются апробированные решения в виде аппаратно-программного комплекса мониторинга и анализа эффективности геомеханического обеспечения процессов горных работ. Концептуально предлагаемый подход представлен на рис. 2.

На первом этапе выполняется районирование карьерного поля по категориям трещиноватости и взрываемости (модуль 1). Трещиноватые массивы горных пород выделяются для отработки гор-

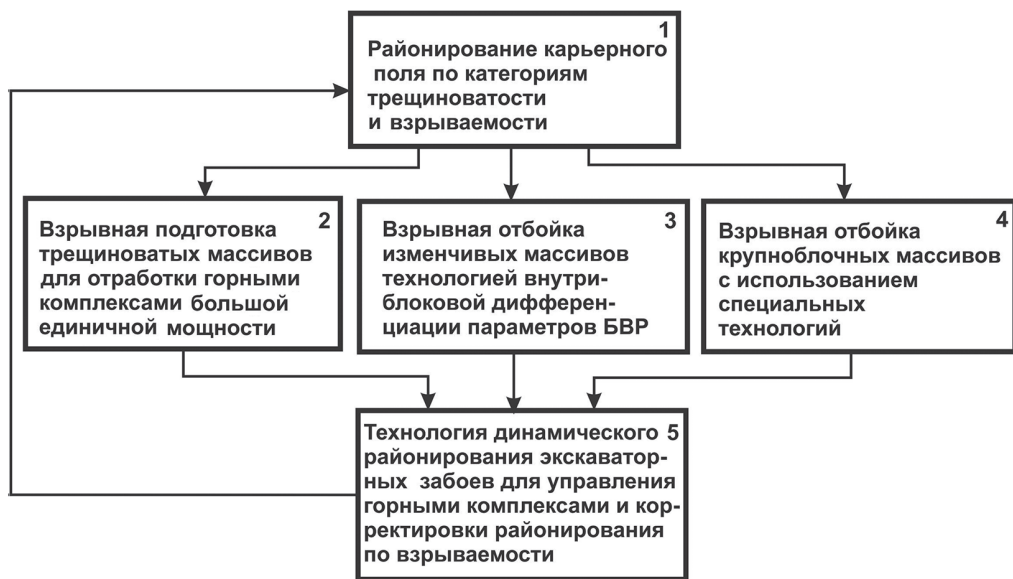


Рис. 2. Укрупненная технологическая схема районирования карьерного поля
 Fig. 2. Detailed technological scheme of the open-pit field zoning

ными комплексами большой единичной мощности (модуль 2). Использование экскаваторов большой емкости ковша

позволяет увеличить предельный размер негабаритных фракций. В то же время использование скважин большого диа-



Рис. 3. Система объективного мониторинга и управления геомеханическим обеспечением процессов горных работ
 Fig. 3. The system of objective monitoring and management of geomechanical support of mining processes

метра эффективно не для всех массивов горных пород. Наибольший эффект достигается при взрывном дроблении мелкоблочных массивов, когда при взрыве массив разваливается на естественные отдельные кондиционные для экскавации размера, при этом сохраняется компактная форма развала, обеспечивающая максимальную производительность погрузки горной массы в автосамосвалы. В то же время при ошибке районирования может возникать пропуск изменчивых массивов горных пород, когда участки монолитных массивов горных пород хаотически чередуются с зоной повышенной трещиноватости. В данном случае должен сработать механизм мониторинга эффективности геомеханического обеспечения процессов горных работ (модуль 5). Кроме корректировки районирования (модуль 1) система позволяет оперативно корректировать технологический процесс. Механизм корректировки технологического процесса раскрыт в алгоритме рис. 3. Аналогичный подход осуществляется при работе модулей 3 и 4 (см. рис. 2).

Механизм мониторинга и анализа эффективности геомеханического обеспечения процессов горных работ (см. рис. 2, модуль 5) в системе объективного мониторинга представлен блоками 8, 10 и 11 (см. рис. 3). В свою очередь блок анализа процесса работы экскаваторов (см. рис. 3, модуль 10) конструктивно состоит из двух частей: модуля технологического анализа процесса экскавации, который в корпусе крепится на магнитах к рукояти ковша экскаватора (рис. 4), и планшета, на котором реализован блок управления (размещается в кабине экскаватора).

Модуль технологического анализа процесса экскавации представляет собой инерционный блок измерения (IMU), который состоит из акселерометра MEMS, гироскопа, барометра и магнитометра.

Кроме того, модуль технологического анализа процесса экскавации оснащен модулем GPS и датчиком температуры. С помощью инерционного блока измеряется ориентация в пространстве ковша экскаватора, а также энергетические параметры черпания.

Использование модуля технологического анализа процесса экскавации решает важнейшую задачу определения соотношения технологической и геомеханической составляющих в параметрах, от которых зависит производительность экскаваторов. Существующие методики, по причине зависимости от субъективных факторов, задачу управления в режиме реального времени не решают. Так, при определении технической производительности экскаваторов общеизвестная, повсеместно применяемая методология использует коэффициенты, учитывающие влияние конкретных горно-геологических и технологических факторов.

$$Q_T = \frac{3600EK_{\exists}}{T_{\text{ц}}} K_{m.e} \text{ м}^3, \quad (1)$$



Рис. 4. Модуль технологического анализа процесса экскавации, закрепленный на конце рукояти ковша

Fig. 4. Excavation process analysis module attached to the end of the bucket arm

где $T_{ц}$, — паспортная продолжительность цикла, с; E — емкость ковша экскаватора, м³; K_3 — коэффициент экскавации; $K_{т.в.}$ — коэффициент, учитывающий время вспомогательных операций, обязательно сопровождающих основные операции выемки и перемещения пород.

Общеизвестная формула (1) для возможности выделения конкретных горно-технических условий может представляться как (2), с использованием понижающих коэффициентов: K_n — коэффициент влияния экскавируемой породы; K_3 — коэффициент влияния параметров забоя (коэффициент забоя). При этом вместо паспортной величины продолжительности времени цикла используется значение минимальной продолжительности цикла в конкретных горно-технических условиях.

$$Q_T = \frac{3600EK_n K_3}{T_{ц.п}} \text{ м}^3. \quad (2)$$

Удельный вес данных коэффициентов в результирующей величине, влияющей на производительность экскаватора, может варьировать в широких пределах. В частности, горно-геологические и технологические факторы по-разному влияют на производительность оборудования в зависимости от его типоразмера. Сравнительный анализ эффективности работы погрузочного горного оборудования в разных горно-геологических и технологических условиях представляет большую проблему, так как на практике данные коэффициенты определяются путем проведения трудоемких исследований, результаты которых во многом зависят от субъективных факторов. Наибольшие сложности и вопросы достоверности вызывают хронометражные наблюдения. Сложности проявляются даже в самом простом случае, когда только регистрируется ритмичность отгрузки горной массы. В ходе хронометражных наблюдений сложно оценить влияние меняющихся горно-геологических фак-

торов на параметры операций технологического цикла отработки забойного блока, кроме того, технологическая ритмичность погрузки горной массы в автосамосвалы, как отмечалось ранее, меняется циклично даже в условиях, хорошо подготовленных в процессе взрывной отбойки забоев. По мере выемки горной массы уменьшается высота развала, которая в пределах радиуса черпания становится уже недостаточной для наполнения ковша экскаватора. Растет удельный вес неполных циклов, которые необходимы для наполнения ковша. Это сопровождается снижением ритмичности погрузки горной массы в автосамосвалы. Машинист экскаватора для снижения продолжительных простоев автотранспорта пытается чередовать циклы, не заканчивающиеся погрузкой с операциями полного цикла экскавации. Без использования оперативных методов получения достоверной информации о характеристике экскаваторного забоя, одними хронометражными наблюдениями сложно характеризовать технологическую цикличность ритмичности отгрузки горной массы. В результате получают усредненные значения показателей, относящиеся к периоду исследований. Поэтому в реальных условиях хронометражные наблюдения не могут использоваться на постоянной основе для мониторинга процессов горных работ, когда в режиме реального времени постоянно меняются горно-геологические факторы, влияющие на параметры операций технологического цикла отработки забойных блоков. На практике имеют место большие пределы изменения ритмичности отгрузки горной массы. В последнее время приобретает актуальность продвижение автоматизации, роботизации и цифровой трансформации открытых горных работ [8–11]. Эффективность использования этих актуальных направлений зависит от достоверности исполь-

зуемой информации. От достоверности исходных данных зависит и эффективность систем комплексной оценки горных технологий [12]. Использование имитационного моделирования для обоснования отдельных параметров проблемы не решает.

Результаты и обсуждение

Для получения объективной информации предлагается использовать аппаратно-программные комплексы мониторинга технологических операций обработки забойного блока и оперативных методов получения достоверной информации о характеристике экскаваторного забоя. Узловые решения предлагаемого подхода апробировались в ходе промышленных экспериментов [13, 14]. Так как значительная часть технологического цикла представлена вспомогательными операциями, которые имеют непостоянную продолжительность, и их соотношение постоянно меняется, общий удельный вес вспомогательных операций определяется коэффициентом. Продол-

жительность наиболее благоприятных условий экскавации зависит от объема забойного блока, высоты забоя. Эти параметры определяются технологией и параметрами взрывной отбойки. В частности, они зависят от схемы инициирования скважинных зарядов и интервалов замедления. По мере отгрузки горной массы и уменьшения высоты забоя появляется целесообразность повторного черпания (перечерпания) и растет влияние технологических факторов, значение которых определяется величиной коэффициента $K_{Т.В}$.

После отработки забойного блока требуется зачистка подошвы уступа экскаватором, бульдозером для переезда экскаватора на новое место стояния. Время непосредственного переезда экскаватора на новое место стояния обычно составляет от 15 до 40 с. Более значительного времени требуют подготовительные операции, связанные с зачисткой подошвы забоя. На практике сложно по существующим методологиям делать полный анализ факторов с разделением на вспо-

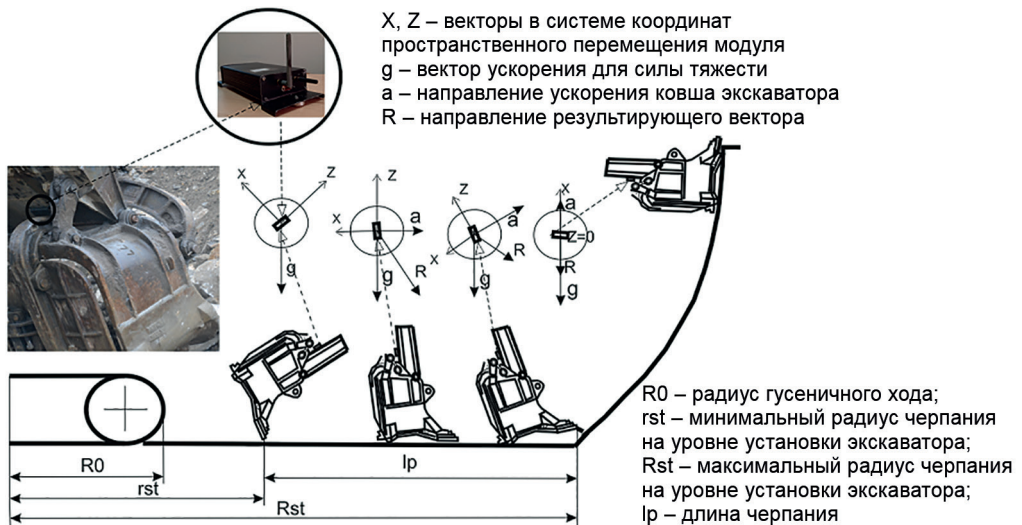


Рис. 5. Схема перемещения в процессе черпания и наполнения ковша модуля технологического анализа процесса экскавации

Fig. 5. Scheme of movement in the process of digging and filling the bucket of the module for technological analysis of the excavation process

могательные операции. Поэтому все определяется величиной коэффициента $K_{т.в}$.

Для создания реального механизма управления предлагается мониторинг процесса экскавации в режиме реального времени. С помощью модуля технологического анализа процесса экскавации (рис. 4) решается узловая задача установления соотношения между технологической и геомеханической составляющими параметров, от которых зависит производительность экскаваторов. На рис. 5 представлена схема перемещения модуля технологического анализа процесса экскавации, характеризующая изменение положения модуля относительно осей X и Z в процессе черпания по подошве и наполнения ковша.

С помощью акселерометра, находящегося внутри измерительного модуля, фиксируются проекции силы гравитации на три оси: X , Y , Z . Таким образом, перемещение модуля в вертикальной плоскости фиксируется акселерометром. Началу процесса черпания предшествует смена направления движения на про-

тивоположное, которое включает подтягивание ковша под себя и кратковременную остановку. Движение по подошве уступа происходит с ускорением и наращиванием массы горной породы в ковше. Наращивание горной массы в ковше увеличивает инерционность и устойчивость движения. Это, безусловно, отражается на показаниях акселерометра, для которого характерно распределение ускорения относительно силы тяжести. Для контроля кругового, горизонтального перемещения ковша экскаватора используется гироскоп. В результате работы модуля технологического анализа процесса экскавации становятся доступными в режиме реального времени кинематическая и динамическая характеристики вертикального и горизонтального перемещений ковша для технологического анализа процесса экскавации во время операций черпания; наполнения ковша; поворота к автосамосвалу; разгрузки; повороту в забой (рис. 6–8). На этих рисунках 1, 2, 3 – параметры, характеризующие вертикальное пере-

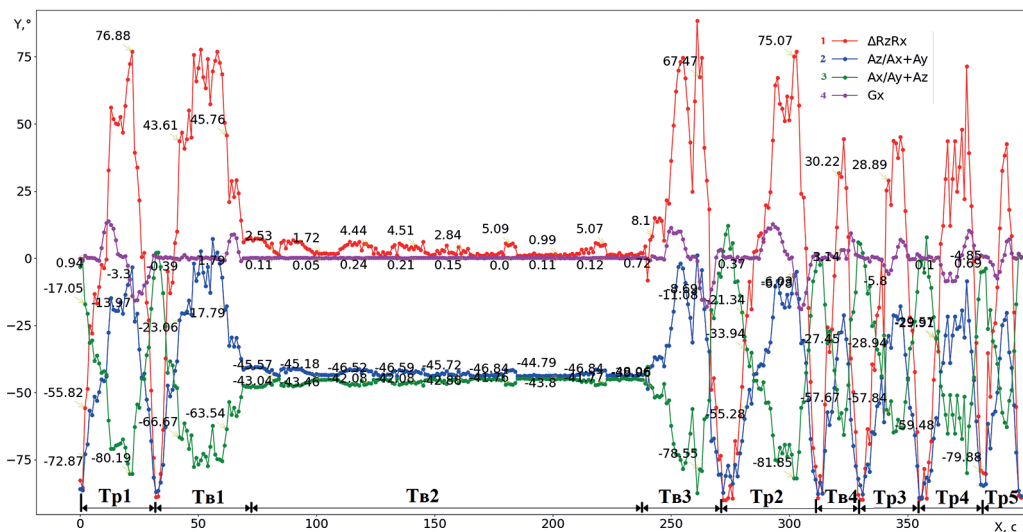


Рис. 6. Диаграммы, характеризующие вертикальное перемещение ковша по отношению к осям X , Y , Z , и диаграмма перемещения ковша в горизонтальной плоскости

Fig. 6. Diagrams characterizing vertical movement of the bucket in relation to the axes X , Y , Z a diagram of the movement of the bucket in horizontal plane

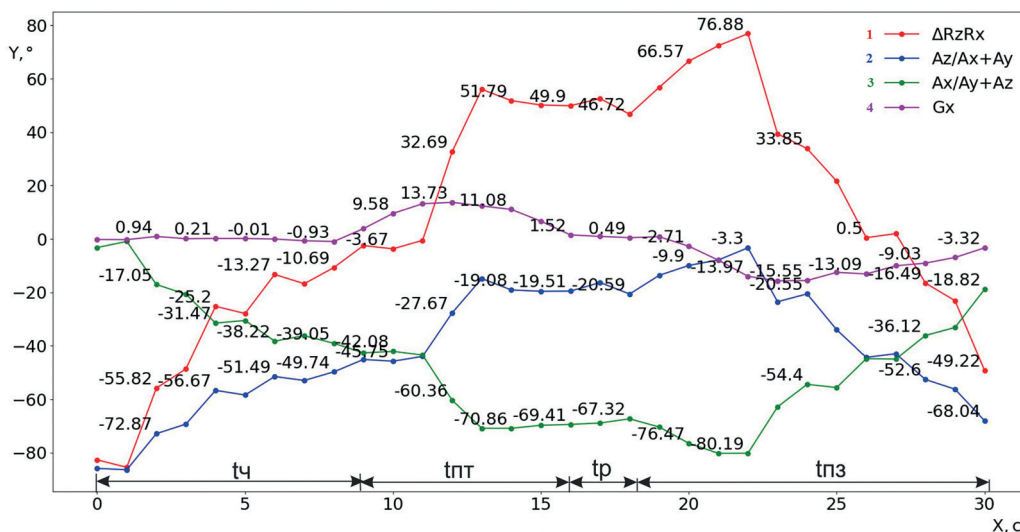


Рис. 7. Характеристика вертикального и горизонтального перемещений модуля технологического анализа процесса экскавации во время черпания; наполнения ковша; поворота к автосамосвалу; разгрузки; повороту в забой

Fig. 7. Characteristics of vertical and horizontal movements of the module of technological analysis of the excavation process during: digging; bucket filling; turning to the dump truck; unloading; turning to the bottom hole

мещение; 4 — параметр, характеризующий горизонтальное перемещение. Кроме того, становятся доступными дан-

ные, на основе которых возможен факторный анализ вспомогательных операций. В частности, на рис. 6 в виде

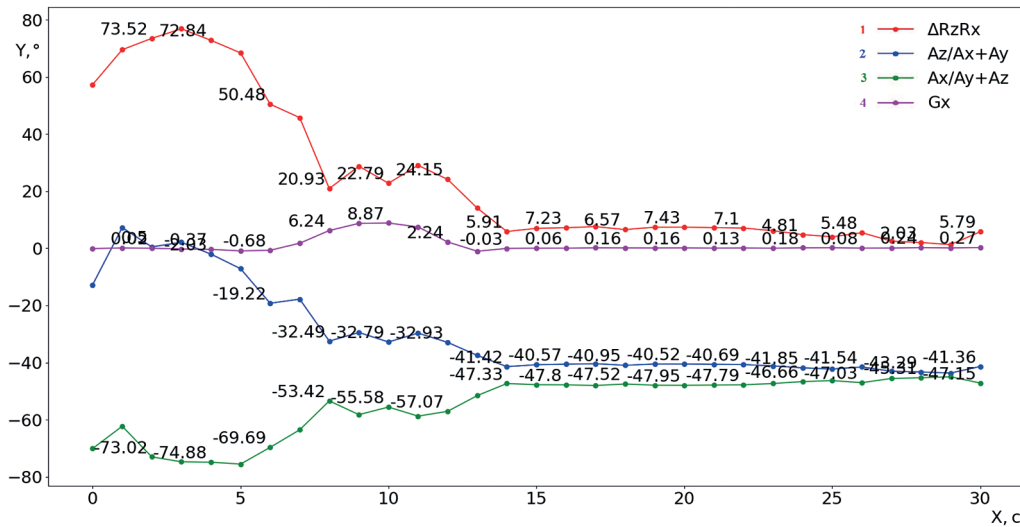


Рис. 8. Характеристика вертикального и горизонтального перемещения модуля во время мониторинга операций поворота к месту ожидаемой остановки автосамосвала и ожидания автосамосвала для разгрузки ковша

Fig. 8. Characteristics of the vertical and horizontal movement of the module during the monitoring operations of turning to the place of the expected stop of the dump truck and waiting for the dump truck to unload the bucket

диаграмм представлен анализ 6 мин рабочего времени экскаватора ЭКГ-4.6.

По диаграммам вертикального перемещения ковша по отношению к осям X, Y, Z и диаграмме перемещения ковша в горизонтальной плоскости выделены интервалы времени, характеризующие продолжительность работы, связанной непосредственно с погрузкой автосамосвалов ($T_{р1} - T_{р5}$), и вспомогательных операций ($T_{в1} - T_{в4}$). Учитывая, что мониторинг с помощью модуля технологического анализа процесса экскавации ведется постоянно, становится возможным получать реальные данные о работе экскаватора в режиме реального времени.

При этом формула (2) приобретает следующий вид:

$$Q_T = \frac{3600nEK_n \sum T_{ai}}{\sum T_{pi} (\sum T_{pi} + \sum T_{ai})} \text{ м}^3 \quad (3)$$

где $\sum T_{vi}$ и $\sum T_{pi}$ — соответственно сумма времени вспомогательных и основных операций; n — количество в выборке циклов экскавации, связанных с погрузкой.

Представленный метод может успешно использоваться для установления соотношения между технологической и геомеханической составляющими параметров, от которых зависит производительность экскаваторов.

На рис. 7 представлена детализация участка $T_{р1}$ диаграммы рис. 6, описывающая операции цикла: черпание и наполнение ковша (t_v), поворот к транспортному средству ($t_{пт}$), разгрузку (t_p), поворот в забой ($t_{пз}$).

Анализ диаграмм детализации полных, неполных циклов и вспомогательных операций позволит решать узловую задачу установления соотношения между технологической и геомеханической составляющими параметров, от которых зависит производительность экскаваторов.

Выводы

Предлагаемые решения прошли апробацию в ходе промышленных экспериментов 2019–2022 гг. на карьерах строительных материалов Кабардино-Балкарской Республики и Ростовской области. В ходе данных экспериментов подтверждено, что на основе модуля технологического анализа процесса экскавации может строиться система объективного мониторинга и управления.

С учетом геомеханической составляющей обеспечения процессов горных работ становится возможным выделение удельного веса геомеханической и технологических составляющих в комплексе основных и вспомогательных операций. Это важно для объективной корректировки районирования карьерного поля по категориям взрываемости, а также для оперативного управления процессами горных работ, в том числе для снижения ущерба от ошибки районирования. Кроме того, необходимо отметить, что решение проблемы повышения достоверности исходных данных геомеханического обеспечения геотехнологии позволит повысить эффективность других перспективных исследований и оптимизации производства, использующих моделирование [15–18], большие данные [19], геомеханический мониторинг [20–23], машинное обучение искусственного интеллекта [24]. Необходимо отметить, что все перечисленные методы использовались в настоящих исследованиях. Например, задача выделения удельного веса геомеханической и технологических составляющих в составе основных операций решалась с использованием критериев четкой логики, работающих в режиме реального времени. За рамками материала статьи осталась детализация вспомогательных операций, которая выполнялась в процессе постобработки на основе машинного обучения нейронных сетей искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л., Анистратов К. Ю. Карьерные экскаваторы ПАО «Уралмашзавод» – настоящее и будущее российской горнодобывающей промышленности // Уголь. – 2016. – № 8. – С. 77 – 81.
2. Анистратов К. Ю. Технично-экономическое обоснование эффективности применения карьерных экскаваторов ЭКГ-18 с реечным напором ПАО «Уралмашзавод» на угольных разрезах // Горная промышленность. – 2016. – № 5 (129). – С. 18 – 23.
3. Анистратов К. Ю. Экономико-математическая модель комплексной механизации горных работ на карьерах // Горная промышленность. – 2015. – № 3 (121). – С. 54 – 55.
4. Журавлев А. Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 583 – 601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.
5. Hakulov V. A., Ignatov V. N., Hakulov V. V. Open pit mining robotization / Proceedings of 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. 2017, pp. 1 – 5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076149.
6. Дерябин С. А., Рзазаде Ульви Азар оглы, Кондратьев Е. И., Темкин И. О. Метамодел ь архитектуры системы автономного управления транспортно-технологическими процессами в карьере // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 117 – 129. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_117.
7. Хакулов В. А. Технология поэтапного совершенствования буровзрывных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 2. – С. 64 – 65.
8. Кузнецов И. С., Зиновьев В. В., Николаев П. И., Стародубов А. Н. Компьютерная система имитационного моделирования для оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-1. – С. 304 – 316. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_304.
9. Клебанов А. Ф. Автоматизация и роботизация открытых горных работ: опыт цифровой трансформации // Горная промышленность. – 2020. – № 1. – С. 8 – 11.
10. Махараткин П. Н., Абдулаев Э. К., Вишняков Г. Ю., Ботян Е. Ю., Пушкарев А. Е. Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обоснования их рациональной скорости с помощью имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 237 – 250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.
11. Хазин М. Л. Роботизированные карьерные самосвалы // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – № 3(59). – С. 123 – 130. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-123-130.
12. Секисов Г. В., Чебан А. Ю., Соколов А. А., Якимов А. А. Система основных категорий комплексной оценки горных технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 4. – С. 187 – 198. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-187-198. **МИАБ**
Литературу с п. 13 по п. 24 смотри в REFERENCES.

REFERENCES

1. Kuznetsov A. L., Anistratov K. Yu. PJSC «Uralmashzavod» quarry excavators the present and the future of the Russian mining industry. *Ugol'*. 2016, no. 8, pp. 77 – 81. [In Russ].
2. Anistratov K. Yu. Feasibility study of the effectiveness of EKG-18 open-pit excavators with rack-and-pinion pressure of PJSC «Uralmashzavod» in coal mines. *Russian Mining Industry Journal*. 2016, no. 5 (129), pp. 18 – 23. [In Russ].
3. Anistratov K. Y. Economic and mathematical model of integrated mechanization of mining operations in open pits. *Russian Mining Industry Journal*. 2015, no. 3 (121), pp. 54 – 55. [In Russ].
4. Zhuravlev A. G. Problems of optimizing the parameters of transport systems of open pits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 583 – 601. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.

5. Hakulov V. A., Ignatov V. N., Hakulov V. V. Open pit mining robotization. *Proceedings of 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*. 2017, pp. 1 – 5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076149.

6. Deryabin S. A., Rzazade Ulvi Azar ogly, Kondratev E. I., Temkin I. O. Metamodel of autonomous control architecture for transport process flows in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 117 – 129. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_117.

7. Khakulov V. A. Technology of step-by-step improvement of drilling and blasting operations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007, no. 2, pp. 64 – 65. [In Russ].

8. Kuznetsov I. S., Sinov'ev V. V., Nikolaev P. I., Starodubov A. N. Simulation modeling computer-based system for optimizing the parameters of open-pit excavator-dump truck complexes. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-1, pp. 304 – 316. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_304.

9. Klebanov A. F. Automation and robotization of surface mining: Experience of digital transformation. *Russian Mining Industry Journal*. 2020, no. 1, pp. 8 – 11. [In Russ].

10. Maharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Yu., Pushkarev A. E. Increase of effectiveness of operation of dump trucks on the basis of justification of their rational speed with simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 237 – 250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.

11. Khazin M. L. Robotized dump trucks. *News of the Ural State Mining University*. 2020, no. 3(59), pp. 123 – 130. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2020-3-123-130.

12. Sekisov G. V., Cheban A. Yu., Sobolev A. A., Yakimov A. A. Grading system for integrated assessment of mining technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 4, pp. 187 – 198. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-187-198.

13. Khakulov V. A., Shapovalov V. A., Ignatov V. N., Ignatov M. V., Karpova Z. V., Khatukhova D. V. Digital transformation of mining and technological mapping of rock masses operational data. *Proceedings of 2022 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»*. 2022, pp. 90 – 93. DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976510.

14. Khakulov V. A., Shapovalov V. A., Ignatov V. N., Ignatov M. V., Karpova Z. V., Yahev V. V. Digital transformation of operational data of intelligent hardware and software systems for automation and robotization of mining operations. *Proceedings of 2022 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»*. 2022, pp. 94 – 99. DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976795.

15. Abbaspour H., Drebenstedt C., Badroddin M., Maghaminik A. Optimized design of drilling and blasting operations in open pit mines under technical and economic uncertainties by system dynamic modeling. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 6, pp. 839 – 848. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.06.009.

16. Demirel N., Taghizadeh A., Khouri S., Tyuleneva E. Optimization of the excavator-and-dump truck complex at open pit mines – the case study. *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 41, no. 5, article 01006. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101006.

17. Kuznetsov D., Kosolapov A. Dynamic of performance of open-pit dump trucks in ore mining in severe climatic environment. *Transportation Research Procedia*. 2022, vol. 63, pp. 1042 – 1048. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.06.104.

18. Mai N. L., Topalt E., Ertent O. A new open-pit mine planning optimization method using block aggregation and integer programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018, vol. 118, no. 7, pp. 705 – 714. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n7a4.

19. Martínez P. L., Dintén R., Drake J. M., Zorrilla M. A big data-centric architecture meta-model for Industry 4.0. *Future Generation Computer Systems*. 2021, vol. 125, pp. 263 – 284. DOI: 10.1016/j.future.2021.06.020.

20. Kozyrev A. A., Fedotova I. V., Kasparian E. V. Integrated complex geomechanical monitoring system of hard rock mines. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 2016*. 2016, vol. 2, pp. 497 – 504.

21. Ammirati L., Mondillo N., Rodas R. A., Sellers C., Di Martire D. Monitoring land surface deformation associated with gold artisanal mining in the Zaruma City (Ecuador). *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, no. 13, article 2135.

22. Babets D., Sdvyzhkova O., Shashenko O., Kravchenko K., Cabana E. C. Implementation of probabilistic approach to rock mass strength estimation while excavating through fault zones. *Mining of Mineral Deposits*. 2019, vol. 13, no. 4, pp. 72–83.

23. Potapov V. P., Oparin V. N., Mikov L. S., Popov S. E. Information Technologies in Problems of Nonlinear Geomechanics. Part II: New Methods, Metadata Models, Geodata Bases and Base Layers of Electronic Charts for a Typical Geoportal of Mining Regions in Siberia. *Journal of Mining Science*. 2022, vol. 58, no. 4, pp. 635–651.

24. Phoon K. K., Zhang W. Future of machine learning in geotechnics. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2022, pp. 1–16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хакулов Виктор Алексеевич¹ — д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой, e-mail: vkh21@yandex.ru,

Шаповалов Виталий Александрович¹ — д-р физ.-мат. наук,
профессор, e-mail: vet555_83@mail.ru,

Игнатов Виктор Николаевич — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: VNIgnatov@yandex.ru,

Южно-Российский государственный политехнический
университет имени М.И. Платова,

Игнатов Михаил Викторович¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Ign_m@mail.ru,

Карпова Жанна Викторовна¹ — канд. техн. наук,
студентка магистратуры,
e-mail: z.karpovaspb@gmail.com,

¹ Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова,

Для контактов: Хакулов В.А., e-mail: vkh21@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Khakulov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: vkh21@yandex.ru,

V.A. Shapovalov¹, Dr. Sci. (Phys. Mathem.),
e-mail: vet555_83@mail.ru,

V.N. Ignatov, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: VNIgnatov@yandex.ru,

M.I. Platov South-Russian State Polytechnic University,
346428, Novocherkassk, Russia,

M.V. Ignatov¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: Ign_m@mail.ru,

Zh.V. Karpova¹, Cand. Sci. (Eng.),
Master's Student, e-mail: z.karpovaspb@gmail.com,

¹ H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,
360004, Nalchik, Russia.

Corresponding author: V.A. Khakulov, e-mail: vkh21@yandex.ru.

Получена редакцией 11.04.2023; получена после рецензии 02.05.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 11.04.2023; received after the review 02.05.2023; accepted for printing 10.08.2023.