УДК 622.34:622.013 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-70-78

Цифровизация технологий недропользования

Хопунов Э. А.[1]
[1] г. Екатеринбург, Россия
e-mail: hopunov@gmail.com

Реферат

Введение. *Тренды цифровизации экономики показывают, что отраслям, занимающимся добычей и переработкой минерального сырья, рано или поздно придется столкнуться с проблемами внедрения новых технологий управления. Ожидаемые инновации имеют дело с большими объемами данных как в части характеристик исходного состояния объекта, так и при отслеживании изменений его параметров на всех стадиях превращения сырья в товарный продукт.*

Методы *анализа включают оценку факторов, определяющих цифровизацию отрасли, а также исследование готовности горно-технологического передела к внедрению новых технологий управления. Сложность в том, что добыча и переработка минерального сырья представлена суммой технологий. Разведка, описание месторождения, оценка запасов, технологии переработки, утилизация и хранение хвостов, отвалов, рекультивация и др. – все эти процессы относятся к разным отраслям наук и не всегда связаны в единый технологический цикл.*

Результаты. *В работе приведен подробный анализ структуры и источников информационных потоков, необходимых для формирования единой цифровой модели переработки минерального сырья. Показано, что информационный блок, отвечающий за «базы данных процессов переработки руд» оказывается наименее готовым к встраиванию в единую цифровую модель.*

Выводы. *Несмотря на множество проблем, связанных с применением цифровых технологий, нет принципиальных препятствий для создания имитационных моделей процессов переработки минерального сырья, включающих идентификацию месторождения, формирование горной массы и все стадии получения товарного продукта.*

Ключевые слова: *цифровизация; моделирование; дезинтеграция; селективное разрушение; раскрытие руд; переработка минерального сырья.*

Введение. Современные тренды многих отраслей экономики показывают, что перспективы эффективного использования минерально-сырьевой базы объективно связаны с цифровыми технологиями управления. Без должной подготовки подобные инновации могут создать массу проблем в части моделирования процессов переработки полезных ископаемых. Связано это с тем, что новые технологии имеют дело с большими объемами данных как в части характеристик исходного состояния объекта, так и при отслеживании изменений его параметров на всех стадиях превращения сырья в товарный продукт. В России горно-обогатительные комбинаты, как правило, включают горный и обогатительный переделы, поэтому естественно рассматривать оба процесса как взаимосвязанные. Анализируя состояние дел в горной промышленности, В. Ж. Аренс отмечает высокую вероятность «появления глобального кризиса минеральных ресурсов, угрожающего самому существованию человечества», указывает на необходимость «поиска принципиально новых решений, основанных на соединении добычи и переработки в единый процесс…» [1].

Целью работы является анализ новых подходов к процессам переработки минерального сырья, которые основываются на создании:

– объединенной модели, включающей параметры месторождения, технологий горных работ и переработки сырья;

– селективных буровзрывных технологий;

– эффективных технологий переработки минерального сырья.

Единая имитационная модель сочетается с функциями управления процессами извлечения минеральных ресурсов и включает:

– модель горно-добычных работ;

– модель процессов переработки минерального сырья;

– конъюнктурно-маркетинговую модель по типу бенчмаркинга с «привязкой» конечного товарного продукта к отраслям потребления;

– модель экономического обоснования механических или физико-химических геотехнологий для раскрытия и извлечения минералов.

Методы анализа включают оценку факторов, влияющих на цифровизацию отрасли, а также исследование готовности горно-технологического передела к внедрению новых технологий управления. Сложность анализа связана с тем, что добыча и переработка минерального сырья представлена суммой технологий. Разведка, описание месторождения, оценка запасов, технологии переработки (добыча, рудоподготовка и обогащение, получение товарного продукта), утилизация и хранение хвостов, отвалов, рекультивация и др. – все эти процессы относятся к разным отраслям наук и не всегда связаны в единый технологический цикл.

Результаты. Информационной базой цифровых моделей являются свойства сырья, их изменение, связь характеристик сырья с параметрами процессов переработки и т. п. Возникает необходимость создания и обработки больших массивов данных, характеризующих месторождение (строение, минеральный состав горных пород и т. п.), параметры буровзрывных работ, параметры технологических процессов переработки и т. п. Поскольку «управлять можно только числом», формализация факторов, определяющих основные технологические параметры, становится неизбежной составляющей цифровизации процессов добычи и переработки минерального сырья. Одной из задач формализации является устранение неопределенности трактовок и понятий при характеристике объекта анализа. Например, для управления процессами рудоподготовки необходимо формализовать факторы, определяющие связь качества раскрытия минералов со свойствами руд и параметрами нагружения при разрушении. Оценка достаточности информационной базы, наличие физических источников информации, отслеживающих меняющиеся свойства минерального сырья, анализ адекватности применяемых моделей физике (физической химии) действующих процессов – это вопросы, без ответа на которые невозможно определить готовность системы к созданию цифровых моделей. Основная сложность решения данной задачи состоит в масштабном факторе, охватывающем около шести порядков – от нескольких метров в исходном сырье до нескольких микрометров в конечном продукте. Поскольку базы данных для моделей переработки минерального сырья формируются на основе случайного множества меняющихся характеристик сырья, они представляют собой неоднородные форматы с постоянно обновляющимися данными. Большая вариация структурных и минералогических характеристик не позволяет использовать для их описания простые аналитические функции, поэтому в таких системах в основном применяют аппарат математической статистики, вероятностные модели и т. п. Наиболее приемлемыми для создания имитационных моделей процессов переработки минерального сырья являются цифровые платформы Big Data, которые дают возможность оперировать множеством данных с неоднород-

ными, неструктурированными или частично структурированными форматами. В общем случае технологии Big Data включают хранение больших объемов данных, их обработку и структуризацию, аналитику для выявления закономерностей (Data mining), позволяют широко использовать случайные и нечеткие множества в качестве исходных данных для построения моделей разного уровня, использовать машинное обучение (Machine learning), прогнозировать на основе обнаруженных связей (Data Science). В этом отношении цифровизацию рассматриваемого комплекса работ можно рассматривать не только как расширение области применения цифровых технологий, но и как новый виток развития процессов добычи и переработки минерального сырья.

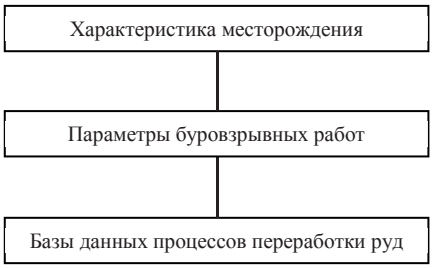

Рис. 1. Схема связи информационных потоков в процессах переработки минерального сырья
Fig. 1. Diagram of data flows coupling in mineral raw material processing procedures

Схема информационных потоков для формирования цифровой модели переработки минерального сырья приведена на рис. 1.

Блок «Характеристика месторождения» представляет случайное множество, содержащее совокупность данных, полученных в ходе разведки месторождения, оценки запасов, опробования и т. п. Существенным фактором является неоднородность практически всех свойств горных пород (структурных, физико-механических и др.), при этом величина их вариации зависит от размера объекта. Среди применяемых в геомеханике цифровых платформ наиболее готовыми к встраиванию в структуру переработки минерального сырья оказались геоинформационные системы Geostatistical Software Tool, Datamine, GEMCOM, Vulcan, Micromine, Surpac и др., содержащие геолого-геофизическую и геохимическую информацию. Созданные на их основе цифровые 3D геолого-технологические модели дают наглядное представление о структуре рудных тел, их расположении во вмещающих породах [2]. Благодаря формализации геоинформационные системы (ГИС) стали первичным звеном в построении моделей связи множества характеристик месторождения с параметрами процессов добычи и переработки минерального сырья, а также «сертификации минерального сырья по извлекаемой ценности (технологическим свойствам)» [3].

Современные инструментальные методы определения вещественного состава и структуры минерального сырья, развитие концепции «квалиметрии недр» [4] создали предпосылки для цифровизации практически всех параметров, характеризующих как месторождение в целом, так и его отдельные компоненты, включая минеральные составляющие. Основу составляют: ядерно-физические, рентгенорадиометрические методы, методы определения структуры на плоскости (TEM-микроскопия, SEM-микроскопия, STM-растровая туннельная микроскопия, AFM-атомно-силовая микроскопия), в объеме (3D рентгеновская компьютерная томография), программные пакеты PerGeos, НаноСкан-4D, CTan Demo и InVesalius. Указанные методы совместно с платформами ГИС позволяют измерить практически все характеристики структуры и состава горных пород в диапазоне от масштабов оконтуривания месторождения до параметров кристаллической решетки минералов.

Блок «Параметры буровзрывных работ» идентифицирует связь между характеристиками горных пород месторождения и параметрами отбойки, производящей горную массу. Необходимо отметить, что этот блок содержит практически

всю информацию для встраивания в объединенную модель. Решению задач оптимизации БВР и снижению расхода взрывчатых веществ (ВВ) способствуют программные продукты (например, TCAD+ и iSURE), которыми оснащаются современные буровые установки. Так, программно-технический комплекс Blast Maker позволяет использовать в качестве исходной информации данные, переданные непосредственно с бурового станка, для оптимизации ведения буровзрывных работ в режиме реального времени и в режиме накопления данных. Таким образом, появляется возможность картирования месторождения не только в ходе разведочного, но и в ходе эксплуатационного бурения, осуществлять своего рода динамический мониторинг свойств горных пород по показателю буримости. Повышенное внимание к взрывной отбойке обусловлено тем, что взрыв оказывает наибольшее воздействие на добываемое сырье, при этом «взрывное разрушение по энергетическим затратам с экономической точки зрения не считается безупречным и оптимальным» [5]. Хорошей предпосылкой для оптимизации буровзрывных работ является то, что физика взрыва изучена достаточно полно, чтобы понимать природу избыточного появления крупных или пылевидных фракций, оценивать связь между параметрами взрыва, характеристиками взрывчатых веществ, свойствами горных пород и результатами взрывного воздействия. Повышение КПД взрыва принято искать в оптимизации расхода ВВ за счет повышения эффективности передачи энергии взрыва разрушаемому массиву, учитывая вариации прочностных свойств горных пород. Наиболее интенсивная фаза разрушения при взрывной отбойке приходится на первый этап формирования ударной волны, создающей сверхизбыточное давление на стенки зарядной камеры. Снижение затрат энергии на измельчение в ближней зоне взрыва и перераспределение энергии на весь объем разрушения позволяет повысить эффективность взрывного воздействия [6]. Современные геотехнологии обладают достаточными средствами для регулирования взрывного воздействия: изменение конструкции заряда, применение комбинированных зарядов с изменяющимися энергетическими свойствами по длине скважины, вариация массы заряда, варьирование сетки скважин, изменение интервала замедления, порядка инициирования контурных зарядов и др. Практика изменения сетки взрывания и параметров взрыва в зависимости от структурных и прочностных свойств пород подтверждает эффективность подобных решений для оптимизации расхода ВВ и обеспечения качества горной массы [7, 8]. Критерием качества подготовки горных пород к выемке является соответствие горной массы требованиям заданного гранулометрического и вещественного состава. Зависимость параметров взрываемости горных пород от их текстурно-структурных характеристик открывает возможности для селективной отбойки, позволяющей получить горную массу не с хаотичным распределением структур и случайным набором минеральных компонентов, а в виде фрагментов, разрушенных избирательно по текстурной неоднородности. Задача селективного разрушения при взрывной отбойке заключается в формировании текстурных элементов, пригодных для первичной предконцентрации горной массы по соответствующим признакам в технологические потоки. Таким образом, уже на начальном этапе рудоподготовки из взорванного массива можно выделять фрагменты (текстурно-структурные блоки) по избирательно сконцентрированным разделительным признакам. Многочисленными исследованиями показано, что для подобных структур наиболее эффективными оказываются рентгенорадиометрические методы предконцентрации [9, 10]. Объективность информации, генерируемой устройствами для рентгенофлуоресцентной сепарации, делает их адаптивными к применению технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности разделения.

Второе направление оптимизации параметров взрыва касается снижения энергозатрат на последующее дробление и измельчение руд за счет избирательного разупрочнения горных пород на уровне минеральных компонентов. Перемещение объемного разупрочняющего воздействия на стадию взрывного разрушения для оптимизации энергозатрат актуально еще и потому, что КПД взрывного разрушения значительно превышает КПД дробильно-измельчительных устройств, несмотря на несколько более высокую стоимость «химической энергии» по сравнению с электроэнергией. Снижение энергозатрат на последующее разрушение руд при увеличении расхода взрывчатых веществ (ВВ) доказано экспериментально [11]. Установлено, что взрывное разупрочнение в большей степени влияет на снижение энергоемкости дробления, чем на снижение энергоемкости измельчения. Отследить и однозначно подтвердить значимость влияния расхода ВВ на более энергоемкие процессы измельчения достаточно сложно из-за существенного изменения гранулометрического состава и увеличения содержания мелких классов в продуктах взрывной отбойки.

Производство буровзрывных работ сопровождается появлением буровых шламов, позволяющих осуществлять «сертификацию минерального сырья по извлекаемой ценности». Шламы шарошечного бурения по своим гранулометрическим и структурным характеристикам близки к продуктам питания второй стадии измельчения, на которой предполагается реализация раскрытия руды. Совокупность характеристик буровых шламов: структура, гранулометрический состав, энергия и усилие разрушения различных фракций, раскрытие и обогатимость – представляет информационный ресурс, эффективность которого показана исследованиями на различных типах руд. Выявлена непосредственная связь между физико-механическими свойствами минералов, структурными характеристиками руд, особенностями разрушения и технологическими показателями буровых шламов, определяющими измельчение и обогащение [12]. Новая информация позволяет использовать полученные данные для технологического картирования, разработки планов буримости, прогнозирования объемов переработки и качества обогащения руд соответствующих участков.

Блок «Базы данных процессов переработки руд» включает информационную область параметров, необходимых для формирования моделей процессов рудоподготовки и обогащения. Практика показывает, что этот блок оказывается наименее готовым к встраиванию в единую цифровую модель, несмотря на активное распространение пакетов типа USIM PAC и JKSimMet. Основная проблема создания моделей переработки руд связана с процессами раскрытия, определяющими эффективность всех последующих этапов обогащения. Достаточно отметить неконтролируемые изменения множества параметров на разных стадиях переработки, например, в процессах раскрытия руд только размер объекта меняется на 4–5 порядков. Уязвимость известных моделей обусловлена применением без достаточного экспериментального обоснования ряда теоретических посылок в виде гипотез: Риттингера, Кика, Бонда, Гриффитса и других, которые справедливы лишь в узких рамках принятых ограничений. Именно поэтому «классические модели» разрушения оказываются неадекватными в случае изменения хотя бы одного из параметров нагружения: жесткий, мягкий; динамичный, квазистатический; одиночный, множественный; с выводом и без вывода продуктов разрушения и т. п., поскольку результаты разрушения (гранулометрический состав, состояние продуктов разрушения и т. п.) будут совсем иными. Объяснение очевидно: руда относится к типу объектов, характеризующемуся статистическим распределением с высоким уровнем вариации параметров структуры, прочности и энергии разрушения. Например, параметры распределения указанных

величин непредсказуемо изменяются уже в течение первых оборотов мельницы и продолжают непрерывно меняться вплоть до выхода материала из нее. По мере сокращения размеров разрушаемых фрагментов меняются не только прочностные характеристики, но и параметры распределения, например дисперсия. Таким образом, практика раскрытия руд сводится к банальному сокращению крупности, превращающему руду в продукт размером в сотни (десятки) микрометров с избыточными затратами энергии. В этом отношении физически неверно отождествлять измельчение и раскрытие в силу принципиального отличия целей и методов их достижения. Цель измельчения – максимальный выход заданных классов крупности, достигаемый многократным сокращением размера исходного продукта при неизбежном увеличении вновь образованной поверхности. Основная энергия, потребляемая при измельчении, расходуется в процессе трансформации работы внешних нагружающих устройств в упругую энергию и энергию образования новой поверхности. Цель селективного разрушения – раскрыть извлекаемые минералы в естественной крупности и при минимальной вновь образованной поверхности. Указанные обстоятельства заставляют рассматривать технологии сокращения крупности и стадии раскрытия минералов как разные процессы рудоподготовки. Селективное разрушение не предполагает фрагментацию руды до размера извлекаемого минерала. Теоретические затраты энергии на раскрытие можно сопоставлять с фактическими только при селективном разрушении, когда вновь образованная поверхность мало отличается от поверхности срастания минералов. Поэтому потребление энергии при измельчении в несколько десятков кВт · ч/т нельзя признать физически обоснованным при раскрытии руд. Учитывая, что при измельчении вновь образованная поверхность гораздо больше поверхности срастания, сокращение объема материала при селективном разрушении позволяет в разы снизить энергопотребление на раскрытие.

Большинство моделей раскрытия в той или иной степени базируется на структурно-геометрических представлениях о руде, случайном разрушении и расплывчатом определении самого параметра раскрытия (King R. P.,Wigley F., Gaudin A. M.). Наиболее «слабым звеном» известных моделей является несоответствие параметров, характеризующих раскрытие минералов, физике процесса разрушения. Как правило, игнорируются очевидные факты: результат разрушения на каждой стадии (от взрывной отбойки до раскрытия минералов) определяется разными свойствами минерального сырья; результат разрушения зависит от текстурно-структурной иерархии руд, от изменения технологических характеристик сырья, дисперсии параметров, их изменения в процессах переработки и др. Таким образом, в моделях переработки минерального сырья изначально закладывается неверный информационный ресурс. Даже если барабанную мельницу «обвесить» десятком моделей, построенных с использованием искусственного интеллекта, качество раскрытия не улучшится, поскольку данный агрегат физически не способен выполнять функцию дезинтеграции. Условия раскрытия минералов сложно определить априори, поскольку существующие теории разрушения многокомпонентных материалов не позволяют рассчитать деформации в минеральных комплексах и на границе их срастания в величинах, пригодных для практического применения. В связи с этим основой для выбора оборудования и технологий рудоподготовки могут служить эмпирические модели, описывающие связь структурных параметров, характеристик руд и раскрываемых минералов с параметрами нагружения и показателями раскрытия. Без физического моделирования процессов раскрытия невозможно построить базис модели дезинтеграции – основной операции рудоподготовки, определяющей процессы переработки и все сопутствующие проблемы, связанные с избыточной поверхностью продуктов разруше-

ния: обезвоживание, сушку и организацию хвостохранилищ. Необходимо отметить, что некоторые проблемы обусловлены отсутствием формализации в части однозначности трактовок, определений, применяемой терминологии, например, часто измельчение и дезинтеграция рассматриваются как синонимы. Несмотря на множество определений понятия дезинтеграции (в зависимости от области применения), в каждом случае рационально идти от сути анализируемого явления. В связи с этим руду следует рассматривать как многокомпонентный агрегат, структурно представленный интегрированными зернами минералов различного размера в монокристаллическом или в поликристаллическом виде. В большинстве своем интеграция минеральных комплексов происходит по границам срастания, имеющим качественное минералогическое описание, устоявшуюся классификацию и возможность количественного определения их параметров. Дезинтеграция (антоним понятия интеграции) соответствует решению обратной задачи: освобождению (раскрытию) составляющих структурных элементов при разрушении руд. При этом понятие дезинтеграции требует однозначного указания структурного уровня (размера), до которого осуществляется распад объекта на составляющие. Например, для раскрытия руд структурный уровень дезинтеграции определяется фракционным составом раскрываемых минералов. Дезинтеграция ***как результат*** представляет собой физическое отделение (освобождение, англ. – liberation) минералов друг от друга в их исходном структурном состоянии. Частным случаем дезинтеграции при однозначном определении предмета селективности (граница срастания, разные минеральные комплексы или их агрегаты и т. п.) можно считать «селективное разрушение» [12]. Дезинтеграция ***как процесс*** представляет собой совокупность актов физического отделения по границам срастания структур, интегрированных в агрегат (минералов, минеральных комплексов). Сам процесс может протекать непрерывно или дискретно в результате внутренних напряжений между разделяемыми структурными элементами, при этом напряжения могут быть созданы внешними или внутренними воздействиями. Создание физической модели дезинтеграции возможно лишь при наличии экспериментально измеренных величин, характеризующих свойства объекта в целом и его составляющих, а также параметров, характеризующих воздействия, создающие напряжения среди структур дезинтеграции. Принимая во внимание сложные взаимоотношения раскрываемых минералов, большую их вариацию по размеру и физико-механическим свойствам, практическую дезинтеграцию логично представить в виде дискретной трансформации разрушаемого материала в структурные элементы разделения и структурные элементы раскрытия. В такой схеме, когда каждая стадия разрушения определяется «своим набором свойств» раскрываемых минералов, процесс дезинтеграции можно сделать управляемым, выбирая соответствующие режимы деформирования: жесткий или мягкий, локальный или объемный, однократный или циклический и т. п. Возможность управления режимами деформирования в зависимости от свойств разрушаемого материала продемонстрирована на некоторых устройствах, приведенных в работе [12].

Выводы. Появление в последние годы новых методов построения моделей различных процессов, в том числе и с использованием искусственного интеллекта, не исключает физического моделирования. Очевидно, что от нейросетевой модели, обученной на базе «гипотетических» данных, вряд ли следует ожидать результата, отличного от «гипотетического». В сложных и многофакторных процессах адекватной основой моделей могут стать данные, полученные только при физическом моделировании. Решение этих задач потребует разработки и создания новых методов и экспериментальных установок для измерения комплекса

физических характеристик, отслеживания реакции на воздействия, вызывающие разрушение и раскрытие руд. Последнее означает, что некогда популярная в ряде горных вузов специализация «Физика горных пород и процессов» вновь может стать актуальной и востребованной, будучи усиленной в части научного направления, связанного с модернизацией и инновацией процессов переработки минерального сырья.

Несмотря на множество проблем, связанных с применением цифровых технологий, нет принципиальных препятствий для создания имитационных моделей процессов переработки минерального сырья, включающих идентификацию месторождения, формирование горной массы буровзрывными технологиями и все стадии получения товарного продукта. Достаточно правильно расставить приоритеты и решить ряд определяющих задач.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аренс В. Ж. О горном деле в свете глобальных проблем человечества // ГИАБ. 2019. № 3. С. 221–231.
2. Петин А. Н., Васильев П. В. Геоинформатика в рациональном недропользовании. Белгород: БелГУ, 2011. 268 с.
3. Башлыкова Т. В. Сертификация минерального сырья по технологическим свойствам в решении системных задач повышения качества жизни // Качество и жизнь. 2017. № 1. С. 17–26.
4. Ломоносов Г. Г. Горная квалиметрия. М.: МГГУ, 2007. 201 с.
5. Додис Я. М., Нифадьев В. И. Разрушение горных пород при бурении и взрывании. Бишкек: КРСУ, 2006. 374 с.
6. Куринной В. П. Теоретические основы взрывного разрушения горных пород: монография. Днепр: Экономика, 2018. 279 с.
7. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б., Лысак Ю. А. Управление дроблением железных руд взрывом – путь повышения эффективности обогатительного передела // ГИАБ. 2019. № 4. С. 41–52.
8. Zharikov S., Kutuev V. About order of comprehensive solving the seismic and pre-splitting issues for drill-and-blastin open-pits // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham, 2019. P. 437–445
9. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A., Elizarov D. B. Technological aspects of ore preconcentration with X-ray fluorescence separation // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2019. No. 7. P. 101–112.
10. Lixia Lia, Genzhuang Lib, Huaizhe Lic, Guoqing Lib, Ding Zhangc, Bern Klein. Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting // Minerals Engineering. 2018. Vol. 121. P. 129–136.
11. Викторов С. Д., Зильбершмидт М. Г. Возможности селективной дезинтеграции сырья в процессах горной технологии // Развитие методов ведения взрывных работ на карьерах с учетом улучшения экологических условий. М.: ИПКОН, 1991. С. 5–12.
12. Хопунов Э. А. Основы дезинтеграции руд и техногенных материалов. М.: Русайнс, 2016. 474 с.

Поступила в редакцию 18 ноября 2020 года

Сведения об авторах:

Хопунов Эдуард Афанасьевич – доктор технических наук. E-mail: hopunov@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-70-78

Digitization of subsoil use technologies

Eduard A. Khopunov[1]
[1] Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Economy digitalization trends show that industries involved in mineral extraction and processing will sooner or later have to face the challenges of introducing new management technologies. Expected innovations deal with large amounts of data both in terms of object initial state characteristics and in tracking changes in its parameters at all stages of raw material transformation into a marketable product.*

Research methodology *includes assessing factors determining industry digitalization, as well as studying production area readiness for new management technologies introduction. The difficulty is that mineral raw material extraction and processing is represented by a set of technologies. Exploration, deposit*

description, reserves assessment, processing technologies, utilization and storage of tailings, dumps, reclamation, etc. – all these processes belong to different branches of science and are not always linked into a single technological cycle.
Results. *The paper provides a detailed analysis of the structure and sources of information flows required to form a unified digital model of mineral processing. It is shown that the data unit responsible for the "ore processing procedures databases" is the least ready to be embedded in a single digital model.*
Conclusions. *Despite the many problems associated with the use of digital technologies, there are no fundamental obstacles to mineral raw material processing simulation models creation, including deposit identification, rock mass formation and all stages of obtaining a commercial product.*

Key words: *digitalization; modeling; disintegration; selective destruction; ore liberation; mineral raw material processing.*

REFERENCES

1. Arens V. Zh. On mining in light of the global problems of mankind. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 3: 221–231. (In Russ.)
2. Petin A. N., Vasiliev P. V. *Geoinformatics in sustainable subsoil use.* Belgorod: BSU Publishing; 2011. (In Russ.)
3. Bashlykova T. V. Certification of mineral raw materials on technological properties in the solution of system problems of improving the quality of life. *Kachestvo i zhizn = Quality and Life*. 2017; 1: 17–26. (In Russ.)
4. Lomonosov G. G. *Mining qualimetry*. Moscow: MSMU Publishing; 2007. (In Russ.)
5. Dodis Ia. M., Nifadiev V. I. *Rock disintegration during drilling and blasting*. Bishkek: KRSU Publishing; 2006. (In Russ.)
6. Kurinnoi V. P. *Theoretical fundamentals of rock cutting by blasting*. Dnepr: Ekonomika Publishing; 2018. (In Russ.)
7. Leshchinskii A. V., Shevkun E. B., Lysak Iu. A. Control of iron ore fragmentation by blasting-way of improvement of processing efficiency. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 4: 41–52. (In Russ.)
8. Zharikov S., Kutuev V. About order of comprehensive solving the seismic and pre-splitting issues for drill-and-blastin open-pits. *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, Cham, 2019. P. 437–445.
9. Tsypin E. F., Ovchinnikova T. Iu., Efremova T. A., Elizarov D. B. Technological aspects of ore preconcentration with X-ray fluorescence separation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 7: 101–112.
10. Lixia Lia, Genzhuang Lib, Huaizhe Lic, Guoqing Lib, Ding Zhangc, Bern Klein. Bench-scale insight into the amenability of case barren copper ores towards XRF-based bulk sorting. *Minerals Engineering*. 2018; 121: 129–136.
11. Viktorov S. D., Zilbershmidt M. G. Raw material selective disintegration capabilities in the processes of mining technology. In: *Developing blasting methods in quarries with regard to ecology improvement*. Moscow: IPKON Publishing; 1991. P. 5–12. (In Russ.)
12. Khopunov E. A. *The fundamentals of ore and technogenic materials disintegration*. Moscow: Rusains Publishing; 2016. (In Russ.)

Received 18 November 2020

Information about authors:

Eduard A. Khopunov – DSc (Engineering). E-mail: hopunov@gmail.com

Для цитирования: Хопунов Э. А. Цифровизация технологий недропользования // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 2. С. 70–78. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-70-78
For citation: Khopunov E. A. Digitization of subsoil use technologies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 2: 70–78 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-70-78