

Гипотезы оптимизации параметров функционирования горнотехнических систем с применением методов прогнозной аналитики

В.Н. Захаров, М.В. Рыльникова, Д.А. Клебанов✉, Д.Н. Радченко

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

✉ Klebanov_d@ipkonran.ru

Резюме: В статье оценены возможные подходы к повышению эффективности сбора данных в целях управления горнотехническими системами, предложен вариант формирования гипотез оптимизации параметров их функционирования в динамично изменяющихся горно-геологических, горнотехнических и внешних условиях. Методология постановки и проверки гипотез о неявных взаимосвязях параметров горнотехнической и смежных с ней систем представляется инструментом эффективного целенаправленного сбора данных от цифровых источников их генерации, хранения для использования в целях прогнозной аналитики. Вторым подходом является создание систем искусственного интеллекта для работы с данными, нацеленных на выявление отклонений и корректировку параметров функционирования горнотехнической системы на базе ретроспективного анализа собранных массивов исторической информации, не имея заранее гипотез, сформулированных при управлении горнотехнической системой.

Помимо гипотез о закономерностях и взаимосвязи между параметрами горнотехнической системы в статье отмечена значимость прогнозирования и учета масштабов изменения параметров функционирования смежных систем. Под смежными понимаются такие системы, как окружающая среда и социум, которые взаимодействуют во времени и пространстве с горнотехническими системами. Причем функционирование последних в связи с колоссальными масштабами техногенного преобразования литосферы влечет неизбежное изменение состояния смежных систем. Только технологии больших данных могут позволить найти неявные закономерности изменения параметров каждой из смежных систем, включая выявление рациональных показателей функционирования горнотехнических систем. В статье сделан акцент на сборе данных по принципу всех фиксируемых изменений информации от цифровых источников. На основе данного принципа предлагается стандартизировать подход к сбору данных для управления горнотехническими системами.

Ключевые слова: горнотехническая система, оптимизация производства, большие данные, прогнозная аналитика, сбор данных, окружающая среда, бенефициары оптимизации

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда №22-17-00142.

Для цитирования: Захаров В.Н., Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Радченко Д.Н. Гипотезы оптимизации параметров функционирования горнотехнических систем с применением методов прогнозной аналитики. *Горная промышленность*. 2023;(5):38–42. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-38-42>

Hypotheses on optimization of mining systems operating parameters using predictive analytics

V.N. Zakharov, M.V. Rylnikova, D.A. Klebanov✉, D.N. Radchenko

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

✉ Klebanov_d@ipkonran.ru

Abstract: The article assesses possible approaches to enhancing the efficiency of data collection to manage mining systems and it proposes an option to formulate hypotheses on optimizing their operating parameters in dynamically changing mining and geological, mining engineering and external conditions. The method of formulating and verifying hypotheses on implicit relationships between the parameters of mining and related systems appears to be an efficient tool for targeted data collection from digital sources and their storage for use in predictive analytics. The second approach is creation of artificial intelligence systems to work with data that aim to identify deviations and adjust the operating parameters of the mining system based on retrospective analysis of the collected arrays of historical information, without having hypotheses formulated in advance when managing the mining system.

In addition to hypotheses on the regularities and relationships between the mining system parameters, the article emphasizes the importance of forecasting and accounting for the extent of changes in the parameters of the related systems. The related systems mean such systems as the environment and society, which interact with the mining systems in time and space. Moreover, the functioning of the latter, due to the global scale of man-caused transformation of the lithosphere, results in inevitable changes

in the state of the related systems. Only the big data technologies can make it possible to reveal implicit regularities in changes in the parameters of each adjacent system, including identification of rational indicators of the mining systems operation. The paper emphasizes the data collection based on the principle of capturing all changes of the information from the digital sources. Based on this principle, we propose to standardize the approach to data collection for mining systems management.

Keywords: mining system, optimization of production, Big Data, predictive analytics, data collection, environment, optimization beneficiaries

Acknowledgments: The research was financially supported by the Russian Science Foundation Grant No.22-17-00142.

For citation: Zakharov V.N., Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Radchenko D.N. Hypotheses on optimization of mining systems operating parameters using predictive analytics. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):38–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-38-42>

Введение

В современном мире управление горноперерабатывающим комплексом базируется на трех фундаментальных положениях: безопасное функционирование горнодобывающего и обогащительного комплексов, экономическая эффективность и экологически сбалансированная отработка месторождений.

Комплексное решение этих задач обеспечивается применением «цифровых технологий», которые активно внедряются последние 15 лет в том числе в горнодобывающей промышленности, где функционирует большое количество информационных систем, среди которых системы горного планирования, геомеханического обеспечения горных работ, управления и мониторинга функционирования горнотранспортного комплекса [1], технического обслуживания и ремонтов, управления технологическими процессами, а также другие ИТ системы, которые осуществляют сбор и анализ цифровых данных для управления производством [2]. Производственные ИТ системы решают задачи мониторинга и контроля технологических процессов [3]. Интеграция между информационными системами разных уровней реализована лишь на единицах предприятий, тем самым анализ режимов работы предприятия на операционном уровне в течение смены и на уровне планирования производится операторами на основе часто не связанных между собой систем данных. Установление закономерностей техногенного изменения участка недр по мере освоения месторождения по-прежнему является сложной и нерешенной фундаментальной задачей.

Движение материально-сырьевых потоков полезных ископаемых от забоя не заканчивается на процессах добычи и управления качеством добываемого сырья. Важно при построении систем анализа данных о параметрах функционирования горнотехнических систем включать в единый контур процессы первичной переработки сырья, объемов образующихся товарных продуктов и отходов добычи и переработки, в полном объеме получаемых данных об изменяющемся состоянии участка недр с учетом формируемых в недрах и на поверхности техногенных образований, конфигурации горных выработок, объема и состояния выработанных пространств – то есть параметров технологических процессов и оборудования горнотехнических систем. Сбор информации о режимах, планах и результатах работы всего полного цикла комплексного освоения участка недр позволяет глубоко анализировать и оптимизировать параметры всех процессов взаимодействия горного оборудования и режимов технологий добычи и переработки минерального сырья. Исходя из условия получения этой информации в цифровом виде можно обеспечить расширение возможностей прогнозной аналитики не только в свете краткосрочных периодов планирова-

ния, но и приблизиться к определению предпочтительных сценариев долгосрочного планирования функционирования горнотехнической системы во взаимодействии со смежными системами – социумом и окружающей природной средой. Идея заключается не в простой экстраполяции результатов работы за смену на более длительный период, а в заблаговременном определении причин и трендов изменения параметров технологических процессов всего горнодобывающего комплекса с установлением значимых факторов, приводящих к изменению социально-экономических условий и уровня воздействия на окружающую природную среду и систем управления. В конечном счете, изменение подходов к прогнозной аналитике трансформируется в экономику производства, решая одну из наиболее сложных прикладных задач повышения эффективности функционирования горнодобывающего комплекса, а также оценку вариантов влияния процессов функционирования горнотехнической системы на экологию и риски безопасной отработки месторождений.

Данные задачи сейчас решаются аналитиками различных отделов горнодобывающих предприятий, надзорных органов, но все ограничивается анализом уже сложившихся и случившихся ситуаций. Прогнозная аналитика в горнодобывающей отрасли на основе программного поиска корреляций между показателями систем горного планирования, диспетчеризации, систем управления технологическими процессами обеспечивает нахождение зависимостей влияния персонала и иных факторов на их эффективность, позволяет точно оценивать затраты на всех этапах функционирования горнотехнической системы.

Вместе с тем в горно-обогащительном производстве есть ряд целевых задач, приоритеты которых определяются стратегическими целями, такими как повышение полноты извлечения ценных компонентов, расширение номенклатуры товарной продукции, прогнозирование и предупреждение техногенных катастроф, включая учет при этом состояния окружающей природной среды и изменения природно-климатических условий, а также анализ выполнения и отклонений от плана производства, прогнозирование затрат на электроэнергию и прочие задачи. Для решения таких задач требуется наработка методологической базы проектирования цифровых систем горных предприятий, позволяющих не только благодаря записи в режиме реального времени обнаруживать, исследовать и извлекать важную информацию из больших объемов данных: это помогает не только выявить перспективные тенденции и предвидеть потенциальные проблемы, но и заблаговременно оптимизировать параметры функционирования горнотехнических систем.

Решение проблемы

Прогнозная аналитика на основе собираемых данных о состоянии массива горных пород и осваиваемого участка недр во взаимосвязи с характеристиками окружающей среды, технологических процессов и параметров работы оборудования, а также информационных систем перерабатывающего производства позволит находить и анализировать неявные зависимости отклонений от целевых показателей при изменении горизонтов планирования горных работ, объемов добычи и переработки минерального сырья [4]. При этом решение вопроса критериев оптимизации параметров процессов добычи и обогащения затруднено в связи с большим количеством возможных решений. Регистрируемые данные горнотехнической системы могут обладать высокой степенью неопределённости исходных данных с точки зрения решаемых задач. Собирая цифровые данные для решения каждой из вышеописанных задач, можно определить, как меняется участок недр по мере его освоения, сформировать требования к необходимому изменению параметров процессов добычи и переработки руд по мере подвигания фронта очистных работ в вертикальной и горизонтальной плоскостях, прогнозировать изменение состава и объема отходов, распределять ресурсы согласно вновь открывающимся новым условиям недропользования. Решение вышеописанных задач связано с матрицей ценности тех или иных задач оптимизации.

Очевидно, что для разных субъектов и систем цели и задачи различны. Для описания матрицы задач или гипотез оптимизации необходимо рассматривать классификацию цифровых источников данных горнотехнической системы по признаку объекта получения данных [5]. Причем в данной матрице источник цифровых данных рассматривается как субъект, прямо или косвенно заинтересованный в решении конкретной оптимизационной задачи.

В табл. 1 приведены только верхнеуровневые задачи или гипотезы оптимизации каждой из систем, в рамках которой есть свои субъекты и бенефициары оптимизации. Для каждой из горнотехнических систем степень декомпозиции данных задач может быть разной в зависимости от горнотехнических, горно-геологических и природно-климатических условий, а также условий функционирования системы управления горнотехнической системы и других представителей социума (например, государственных структур, местных сообществ).

Так как все вышеописанные системы взаимодействуют между собой, то и приоритизация гипотез оптимизации может быть найдена только заданием системы уравнений для каждой из систем (горнотехническая, социум, окружающая природная среды) и проставлением весовых коэффициентов для каждого из уравнений гипотез оптимизации. При определении системы уравнений гипотез оптимизации нужно определить совместность или несовместность систем. Под совместными подразумеваются системы, которые взаимодействуют во времени и пространстве [6]. Практически несовместность систем равнозначна невозможности их взаимодействия в одном интервале времени. Запишем систему уравнений гипотез оптимизации для совместных систем,

$$F_1(1...n) = M_1; F_2(1...m) = M_2; F_3(1...z) = M_3, \text{ где}$$

M_1 – система уравнений для оптимизации работы горнотехнической системы;

M_2 ; – система управления для оценки и минимизации уровня воздействия на окружающую природную среду;

M_3 – система уравнений для системы социума.

Для каждой из систем необходимо зафиксировать все гипотезы оптимизации, записанные в виде параметров целевой функции (например, значение коэффициента сквоз-

Таблица 1
Матрица гипотез оптимизации функционирования горнотехнической системы, системы обогащения и социума

Table 1
Matrix of hypotheses to optimize operation of the mining system, the processing system and the society

Решаемая задача оптимизации	Горнотехническая система	Смежные системы	
		Социум	Окружающая природная среда
Достижение полноты извлечения полезного ископаемого из недр при добыче и ценных компонентов в ходе переработки	X	-	-
Обеспечение экономической эффективности функционирования горнотехнической системы	X	X	-
Минимизация допустимого риска опасного события (минимальная частота свершения опасных событий) при отработке участка недр	X	X	-
Обеспечение неопределенно долгого функционирования горнотехнической системы	X	X	-
Эффективная утилизация технологического оборудования (КИО)	X		
Минимизация опасных ситуаций, оказывающих влияние на социум (психологическое воздействие, хронические заболевания и пр.)	-	X	-
Минимизация воздействия технологических процессов горнотехнической системы на окружающую среду	-	-	X
Поиск закономерности изменения свойств горных массивов	X	X	-
Минимизация аварий, инцидентов и техногенных катастроф	X	X	X
Рельефообразование, рекультивация территорий, восстановление ландшафта	X	X	X
Многофункциональное использование выработанных пространств	X	X	X

ного извлечения для горнотехнической системы, или уровень шума и балльность техногенных землетрясений для системы социума и т.д.):

- $F_1(1...n)$ – n гипотез оптимизации для горнотехнической системы;
- $F_2(1...m)$ – m гипотез оптимизации для оценки параметров изменения состояния окружающей среды;
- $F_3(1...z)$ – z гипотез для системы социума.

После формулирования для каждой из систем всех ограничений и функций, когда будут однозначно определены все целевые параметры, можно начинать выстраивать систему сбора данных для поиска корреляций и неявных зависимостей между системами. Для определения необходимого объема информации нужно для каждой из функций определить минимально возможный детектируемый цифровой сигнал или источник данных.

Для примера, для целевой функции увеличения коэффициента использования оборудования (КИО) нужно детектировать все простой и автоматически получать достоверную картину о режимах работы, автоматически классифицируя все простой и полезное время, дополняя эту информацию показателями, которые могут влиять на загрузку и коэффициент использования (например, для карьерных самосвалов скорость и время движения гружеными к общему календарному времени являются показателями, характеризующими эффективность использования техники. На скорость могут влиять состояние технологических дорог, техническая готовность самосвала, а время его движения груженым также связано с эффективностью погрузочных работ, качества взрыва и подготовки забоя и прочих факторов).

После определения каждой из систем уравнений можно переходить к приоритизации гипотез оптимизации для всех совместных систем. Приоритизация гипотез оптимизации может строиться на весовых коэффициентах, расставляя которые необходимо, начиная с момента проектирования горнотехнической системы и корректируя их в процессе эксплуатации месторождений. В связи с тем что ряд оптимизационных задач могут быть неявными, для сбора цифровых данных предлагается использовать метод ELT [7], подразумевающий запись всех регистрируемых цифровых данных от совместных источников данных. Такой подход позволяет выявлять зависимости, ретроспективно анализируя собранные массивы исторической информации возможно, не имея заранее заданных гипотез, которые сформулированы при управлении горнотехнической системой. Например, сбой в показателях сквозного извлечения при добыче и переработке твердых полезных ископаемых может говорить о разных первопричинах. Отсутствие первичной гипотезы оптимизации не должно повлечь некорректный сбор данных. Так как горнотехническая система, социум и окружающая природная среда являются смежными и совместными системами, сбор первичной информации о сезонном, либо стихийном изменении природно-климатических условий, изменении гидрографического режима подземных вод, температурных характеристик горных массивов по мере годового понижения, процессов буро-взрывных работ, технологических процессов обогатительного передела могут выявить неявную зависимость, которая не учтена в проектных решениях или при первичной постановке гипотез. Причины возникновения проблем на стадии переработки могут быть связаны с нарушением параметров

буровзрывных работ, изменением влажности температуры, влажности руды или с другой причиной. Только технологии больших данных могут позволить найти неявные закономерности изменения параметров каждой из смежных систем, включая наиболее рациональные показатели функционирования горнотехнических систем.

Одна из задач отработки месторождений твердых полезных ископаемых – обеспечение экономической эффективности функционирования горнотехнической системы. Данная задача обеспечивается последовательностью смежных процессов, которые должны быть эффективны. Например, процессы бурения и отстающие по времени с точки зрения переработки единицы горного массива процессы обогащения. Но при решении данной задачи никак не учитываются цели и задачи влияния на окружающую среду. Нужно ли включать переменные и данные, которые влияют на данную систему, вопрос, который должен решаться при проектировании сбора данных от горнотехнической системы и смежных систем.

Выводы

Для эффективного управления и оптимизации работы горнотехнической системы необходимо собирать информацию от цифровых источников данных горнотехнической системы и смежных с ней систем, на основе которых формируются гипотезы оптимизации.

Чтобы сформировать гипотезу оптимизации, нужно выявить бенефициара оптимизации для смежных и совместных систем, будь то социум, опосредованно – окружающая природная среда, или конкретный субъект (отрабатываемые массивы, технологические среды, технологическое оборудование). После формулирования гипотезы и решаемой задачи на базе собранных данных от всех цифровых источников, выявляются неявные зависимости с помощью математических методов, таких как регрессия, кластеризация, нейронные сети.

Приоритизация гипотез оптимизации строится на весовых коэффициентах, расставляя которые необходимо, начиная с момента проектирования горнотехнической системы и корректируя их в процессе эксплуатации месторождений.

В связи с тем что ряд оптимизационных задач могут быть неявными, то для сбора цифровых данных целесообразно использовать метод ELT (Extract Load Transform), подразумевающий запись всех регистрируемых цифровых данных от совместных источников. Такой подход позволяет выявлять зависимости, ретроспективно анализируя собранные массивы исторической информации, не имея заранее гипотез, которые сформулированы при управлении горнотехнической системой.

По мере функционирования горнотехнической системы с применением методов прогнозной аналитики по указанным направлениям на горном предприятии формируется своеобразный банк данных, содержащий сведения о результатах проверки гипотез оптимизации параметров функционирования горнотехнической системы, их истинности, уровне воздействия на смежные системы. Это позволит корректировать применяемые алгоритмы обработки больших данных и повысить эффективность планирования и управления производством, а также взаимодействие с заинтересованными сторонами.

Список литературы

1. Temkin I., Klebanov D., Deryabin S., Konov I. Predictive analytics in mining. Dispatch system is the core element of creating intelligent digital mine. In: Sukhomlin V., Zubareva E. (eds) *Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*. Vol. 1201. Springer, Cham; 2020, pp. 365–374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_28
2. Рыльникова М.В., Клебанов Д.А., Makeev М.А., Кадочников М.В. Применение искусственного интеллекта и перспективы развития аналитических систем больших данных в горной промышленности. *Горная промышленность*. 2022;(3):89–92. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92>
3. Трубецкой К.Н., Кулешов А.А., Клебанов А.Ф., Владимиров Д.Я. *Современные системы управления горнотранспортными комплексами*. СПб.: Наука; 2007. 306 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/16307?>
4. Темкин И.О., Клебанов Д.А., Дерябин С.А., Конов И.С. Построение интеллектуальной геоинформационной системы горного предприятия с использованием методов прогнозной аналитики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(3):114–125. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125>
5. 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):55–60. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>
6. Клебанов Ф.С. *Адеология – общая теория безопасности*. М.: Корина-офсет; 2011. 136 с.
7. Mullins C.S. Extract, Load, Transform (ELT). Available at: <https://www.techtarget.com/searchdatamanagement/definition/Extract-Load-Transform-ELT>

References

1. Temkin I., Klebanov D., Deryabin S., Konov I. Predictive analytics in mining. Dispatch system is the core element of creating intelligent digital mine. In: Sukhomlin V., Zubareva E. (eds) *Modern Information Technology and IT Education. SITITO 2018. Communications in Computer and Information Science*. Vol. 1201. Springer, Cham; 2020, pp. 365–374. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_28
2. Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Makeev M.A., Kadochnikov M.V. Application of artificial intelligence and the future of big data analytics in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):89–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-89-92>
3. Trubetskoy K.N., Kuleshov A.A., Klebanov A.F., Vladimirov D.Ya. *Contemporary management systems for mining and transport complexes*. St. Petersburg: Nauka; 2007. 306 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/16307?>
4. Temkin I.O., Klebanov D.A., Deryabin S.A., Konov I.S. Construction of intelligent geoinformation system for a mine using forecasting analytics techniques. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(3):114–125. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-3-0-114-125>
5. 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):55–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.10>
6. Klebanov F.S. *Adeology: a general theory of safety*. Moscow: Korina-ofset; 2011. 136 p. (In Russ.)
7. Mullins C.S. Extract, Load, Transform (ELT). Available at: <https://www.techtarget.com/searchdatamanagement/definition/Extract-Load-Transform-ELT>

Информация об авторах

Захаров Валерий Николаевич – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9309-2391>

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

Радченко Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий Лабораторией теоретических основ проектирования горнотехнических систем, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Information about the authors

Valerii N. Zakharov – Corresponding Member of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9309-2391>

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

Dmitry N. Radchenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Theoretical Fundamentals for Mining Systems Design, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Article info

Received: 29.07.2023

Revised: 23.08.2023

Accepted: 28.08.2023

Информация о статье

Поступила в редакцию: 29.07.2023

Поступила после рецензирования: 23.08.2023

Принята к публикации: 28.08.2023