Стадийность изучения инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых с целью обеспечения безопасного проведения горных работ

Звонарев Е. А.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: evgen-zvonarev@mail.ru

Реферат

Введение. Развитие инженерно-геологических процессов, формирующихся в результате технологических работ на месторождении, зачастую протекает в геометрической прогрессии. Специфичность данной проблемы заключается в сложности и многофакторности процессов, возникающих при взаимодействии массива горных пород с горными выработками, поэтому получение инженерно-геологической информации должно вестись последовательно, начиная от стадии поисково-оценочных работ и продолжая на стадиях строительства и эксплуатации выработок.

Целью работы является рассмотрение методических основ формирования баз данных инженерно-геологической информации об объектах горных работ на различных стадиях их жизненного цикла.

Методика проведения исследований. Описаны виды работ по получению и интерпретации инженерно-геологической информации, необходимой для детализации моделей инженерно-геологических условий на каждой из стадий. Важным фактором формирования достоверной и функционирующей геомеханической модели месторождений полезных ископаемых обозначено соблюдение последовательности изыскательских работ и постепенный переход от инженерно-геологических условий региона, провинции, тектонической структуры к инженерно-геологическим условиям конкретного месторождения или рудопроявления.

Результаты работ. На примере месторождения хрома, расположенного на Полярном Урале в пределах массива Рай-Из, обозначены все этапы детализации модели инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых с учетом выделенных компонентов и факторов, их обуславливающих, описаны возможные проблемы и приведены результаты поэтапной прогнозной оценки устойчивости горных выработок.

Выводы. В работе приводится пример детализации инженерно-геологических данных результатами гамма-каротажа и кавернометрии на стадиях построения прогнозной модели устойчивости бортов карьера. Полученная в ходе многолетнего сбора и обработки данных модель месторождения Центральное доказала свою эффективность при проведении горных работ.

Ключевые слова: инженерно-геологические условия; модель инженерно-геологических условий; месторождения полезных ископаемых; массив грунтов; физико-механические свойства; горная выработка.

Введение. В настоящее время поиски и разведка месторождений сосредоточены в складчатых зонах северной и восточной части Евразийского континента, что приводит к освоению месторождений с заведомо непростыми инженерно-геологическими условиями (ИГУ).

Как открытая, так и подземная разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается извлечением значительных масс горных пород, что в свою очередь приводит к кардинальным изменениям естественных полей напряжений и деформаций [1, 2]. Результаты подобных изменений в геологической среде проявляются в виде активизации и развития инженерно-геологических процессов, деформации бортов карьеров, а также стенок и кровли подземных горных выработок, что значительно ухудшает технико-экономические показатели разработки месторождения [3, 4]. Развитие инженерно-геологических процессов, формирующихся в результате технологических работ на месторождении, зачастую протекает в геометрической прогрессии. Специфичность данной проблемы заключается в сложности и многофакторности процессов, возникающих при взаимодействии массива горных пород с горными выработками, поэтому получение инженерно-геологической информации должно вестись последовательно, начиная от стадии поисково-оценочных работ и продолжая на стадиях строительства и эксплуатации выработок [5].

Методика проведения исследования. Методы и методология изучения ИГУ месторождений полезных ископаемых определяются сложностью природных условий, стадией изучения и намечаемым способом разработки полезных ископаемых [6–8]. При этом «содержание, объем, точность и достоверная вероятность данных об инженерно-геологических условиях, получаемых на любом этапе хозяйственной деятельности, должны быть оптимальными» [9]. Оптимальность и самодостаточность получаемой инженерно-геологической информации достигается тогда, когда эти процессы синхронизированы с геологоразведочными работами на всех этапах поисков и разведки месторождения, а также строительства и эксплуатации горных выработок.

Выбор принципиальных методических приемов и способов, совокупность которых позволит спроектировать рациональный комплекс полевых, лабораторных и камеральных исследований ИГУ конкретного месторождения, определяется необходимостью достижения следующих главных целей:

- изучение ИГУ на основе специальных полевых геолого-геофизических исследований;
- оценка прогнозных параметров формирования ИГУ и процессов, приводящих к деформациям и нарушению устойчивости горнорудных сооружений;
- повышение надежности исходной геологической информации, являющейся основой для изучения ИГУ МПИ и выработки однозначных решений и рекомендаций по снижению рисков развития аварийных ситуаций на объекте.

Основные этапы изучения и постановка задач приведены на рис. 1.

Учитывая сложность и разнообразие ИГУ месторождений, выбор методов их изучения осуществляется на основе особенностей рассматриваемых групп месторождений и стадийности производства работ. На каждом этапе изучения формируется некая модель ИГУ, являющаяся основой для принятия управленческих решений. При переходе от одной стадии геологического изучения к другой модель становится все более надежной и информативной.

Результаты работы. Проектирование шахт и карьеров является ответственной задачей и более сложной, чем проектирование любых других сооружений [10–12]. Поэтому изучение ИГУ месторождений имеет свои особенности, главными из которых являются:

- значительные объемы горного массива, в котором проектируются выработки;
- минеральный и петрографический состав массива. Горные породы, с одной стороны, являются «строительным материалом», слагающим борта, стенки и кровлю проектируемых горных выработок и обладающим непостоянными, в отличие от распространенных строительных материалов, свойствами. С другой

стороны, горные породы вмещают полезное ископаемое, являются объектом горных работ и частично подлежат выемке из природного массива [13];

– технологические схемы отработки запасов месторождения. Горные выработки существенно изменяют ИГУ, и зона этого влияния распространяется на площади, превышающие размеры месторождений;

– горно-геологических процессы, возникающие в результате изменения ИГУ.

Рис. 1. Структурная модель этапов построения ИГУ моделей на различных стадиях геологоразведочных работ
Fig. 1. Structural model of the construction stages of EGC models at various stages of exploration

Рассмотрим этапность изучения ИГУ МПИ и формирование моделей на примере хромитовых месторождений Полярного Урала. Представителем данной группы является месторождение Центральное, расположенное в пределах ультрабазитового массива Рай-Из, являющегося фрагментом древней океанической коры, выведенным на поверхность в результате тектонических движений. Месторождение локализовано в дунитовом апофизе и отходящей от него зоне сколовопластических деформаций. Рудные тела характеризуются линзо- и пластообразной формой, сложены сплошными и вкрапленными рудами. Вмещающими породами для рудных тел выступают перидотиты, представленные преимущественно слабосерпентинизированными дунитами и гарцбургитами [14].

Массив имеет маломощный элювиально-делювиальный чехол, представленный щебнем, глыбами дунитов и суглинками. Мощность отложений непостоянна и колеблется от 0–0,2 м до 5–15 м. Класс скальных пород представлен дунитами, гарцбургитами и хромитовыми рудами. По физико-механическим свойствам все породы, слагающие месторождение, относятся к прочным и среднепрочным, при этом наименее прочными являются хромитовые руды (временное сопротивление одноосному сжатию в сухом состоянии от 40,3 до 74,1 МПа). Особое значение в формировании инженерно-геологических условий, а в частности – физико-механических свойств пород, имели процессы прогрессивного метаморфизма. Дан-

Рис. 2. Результат тестирования обобщенного параметра P:

а – данные ГГК- и КМ-геофизических исследований; б – классы пород по степени трещиноватости (слева) и результат интерпретации параметра P (справа)

Fig. 2. The test result of the generalized parameter P:

а – data from the GKG- and KM-geophysical surveys; б – rock classes according to the degree of fracture (left) and the interpretation result of the parameter P (right)

ный процесс характеризовался длительным и локальным прогревом пород массива, что отразилось на формировании «хлоритовой рубашки» в хромитах; слабой антигоритизации дунитов; редкой по массиву хлоритизации; развитию трещинно-блоковой тектоники, трассируемой серпентинитовыми зеркалами скольжения, областями милонитизации, катаклаза, оталькования.

Таким образом, на этапе прогрессивного метаморфизма массив претерпел локальные изменения, значительно ухудшившие его свойства.

Отработка запасов хромитового месторождения Центральное началась в 2004 г. с началом строительства карьера. Все этапы, предшествующие началу разработки МПИ, а также стадия отработки запасов, сопровождалась инженерно-геологическими изысканиями, результаты которых накапливались в базе данных геоинформационных систем, послужившей основой для создания моделей ИГУ.

Формирование модели ИГУ месторождения Центральное состоит из трех основных этапов: I – поисково-оценочная стадия; II – разведочная стадия; III – строительство и эксплуатация карьера.

На первом этапе получения инженерно-геологической информации должна решаться за-

дача оценки ИГУ по данным геологоразведочных, геофизических работ, а также инженерно-геологической съемки. Значительным недостатком данной стадии применительно к месторождению Центральное оказалось изучение объекта только по естественным и искусственным обнажениям, редким геологоразведочным скважинам, приуроченным к зонам возможного расположения рудных тел, что не всегда является важным с точки зрения ИГУ. Поэтому приоритетной задачей на данном этапе стало выделение главных компонентов ИГУ. Так, для Центрального месторождения были выделены следующие компоненты ИГУ: петрографические разности, инженерно-геологические процессы, зоны ослабления (тектонические нарушения, зеркала скольжения, зоны интенсивной трещиноватости и др.)

В базу данных были занесены следующие параметры, характеризующие основные компоненты ИГУ:

- плотность горных пород и руд;
- временное сопротивление одноосному сжатию и растяжению в сухом и водонасыщенном состояниях;
- коэффициент размягчаемости;
- прочностные свойства пород (удельное сцепление и угол внутреннего трения);
- классы трещиноватости, оцененные по совмещению методов кавернометрии (КМ) и гамма-каротажа (ГГК). На этапе интерпретации по пиковым значениям КМ и ГГК устанавливаются зоны повышенной трещиноватости, что позволяет завершить инженерно-геологическую документацию керна геофизическим методом. Пример результата совмещенной оценки с инженерно-геологической интерпретацией приведен на рис. 2;
- температура пород массива;
- пораженность территории различными видами геологических процессов.

Рис. 3. Пример построения модели показателя качества пород (RQD)
 Fig. 3. An example of constructing a model of a rock quality indicator (RQD)

Полученные результаты закладываются в основу построения оценочной модели с применением методов балльной оценки (рис. 3).

Таким образом, полученная на данной стадии модель содержит, как правило, качественный анализ и используется для укрупненной проработки технологических решений, этап характеризует преимущественно региональные инженерно-геологические условия.

На втором этапе полученная инженерно-геологическая информация должна отвечать требованиям технико-экономического обоснования постоянных конди-

ций и подсчета запасов, а значит, в некотором роде определять промышленную ценность месторождений. Второй этап характеризуется полным изучением установленных ранее компонентов ИГУ, которые в свою очередь дают представление об условиях вскрытия месторождения. Для целей изучения используются не только геологоразведочные скважины, но и проходятся специализированные инженерно-геологические, термометрические, размещаемые в местах наиболее важных с точки зрения инженерной геологии. В этом случае границы изучения объекта зависят от глубины отработки и площади формирования призмы возможного обрушения или мульды сдвижения, а набор параметров, характеризующих компоненты, расширяется.

Рис. 4. Постоянно действующая модель ИГУ месторождения
Центральное

Fig. 4. Permanent model of the ISU of the Central deposit

Так, для рассматриваемого месторождения при изучении физико-механических свойств добавились динамические характеристики, модули деформаций, коэффициент Пуассона. Степень трещиноватости определялась модулями кусковатости, трещиноватости, RQD, углами наклона трещин к оси керна, минеральным составом заполнителя. Проведена оценка температур многолетнемерзлых пород и установлены их мощности, определено наличие таликовых зон. На основании комплексной оценки выделенных ИГ параметров выполнен прогноз устойчивости бортов карьеров и построены интегральные графические модели ИГУ по различным параметрам: показатели прочности породы, степень трещиноватости, зоны дробления, зоны ослабления.

Второй этап отражает информацию конкретного месторождения, основываясь на элементах природно-технической системы и условиях ее функционирования. Результаты анализа инженерно-геологической информации имеют как качественный, так и количественный характер и используются для выработки комплекса рекомендаций по проектированию [15].

Третий этап формирования модели ИГУ МПИ относится к стадии строительства и эксплуатации горной выработки. На месторождении Центральное отработка запасов велась карьером, поэтому дальнейшее изучение ИГУ было нацелено на изучение изменений прочностных свойств пород, степени трещиноватости, соответствия конструктивных параметров бортов и уступов карьера, предложенных на втором этапе.

Методами получения инженерно-геологической информации являются: замеры элементов залегания трещин на выбранных площадках, маркшейдерские наблюдения, лабораторные исследования и замеры температуры горных пород. Данные заносятся в базу, анализируются, и с помощью параметрических классификаций З. Беньявски или Н. С. Булычева строится графическая модель, позволяющая установить наиболее сложные участки, в пределах которых необходима выработка организационно-технических мероприятий по обеспечению безопасности горных работ (рис. 4).

На рис. 4 представлен результат накопления, детализации и дополнения инженерно-геологической информации, собранной на всех стадиях отработки запасов месторождения Центральное. Графическая модель, обновляемая по результатам горного мониторинга, позволяет выполнять прогноз устойчивости бортов карьера с учетом сложившейся горно-геологической обстановки. Так, например, в ходе отработки некоторые участки, отнесенные ранее к третьему классу устойчивости, были переведены в четвертый класс по причине увеличения крутизны бортов, что привело к формированию на таких участках осыпей и обвалов. Применение модели остается актуальным и при выработке комплекса мероприятий по консервации открытой горной выработки, так как данный этап также связан с изменением ИГУ объекта.

Выводы. Таким образом, максимальная эффективность прогноза изменения ИГУ при функционировании природно-технической системы МПИ может быть достигнута только путем соблюдения стадийности изучения, последовательным формированием базы данных и созданием графических моделей ИГУ МПИ. Такой подход в состоянии учесть спектр возможных изменений ИГУ. Поэтому по мере проявления этих изменений при переходе от одной стадии отработки запасов МПИ к другой происходит смена методов прогноза с последовательным повышением детальности инженерно-геологической информации и сохранением возможности оптимального управления. Полученная модель третьего этапа носит количественный характер и рекомендуется для участков или горизонтов, отличающихся различной степенью устойчивости и особенностями развития процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беньявски З. Управление горным давлением: пер. с англ. М. Э. Слонима / под ред. Е. И. Шемякина. М.: Мир, 1990. 253 с.
2. Savintsev I. Experience in the application of geophysical research methods in engineering and environmental surveys for quarrying. Engineering and Mining Geophysics 2018 – 14th Conference and Exhibition, Extended Abstracts. 2018. DOI: 10.3997/2214-4609.201800544
3. Zvonarev E. A. et al. Discreteness of the geological environment as an indicator of the development of engineering-geological processes. In: Engineering and Mining Geophysics 2019. 15th Conference and Exhibition. 2019. April. DOI: 10.3997/2214-4609.201901737
4. Zvonarev E. A., & Abaturova I. V. Features of engineering-geological conditions, determining developments of chromite deposit “Saranovskoe”. In: Engineering and Mining Geophysics 2018. European Association of Geoscientists & Engineers. 2018. No. 1. P. 1–8.
5. Abaturova I. V. et al. The influence of components of engineering-geological conditions on mineral mining in permafrost zone. Gornyi Zhurnal. 2015. No. 9. P. 22–27.
6. Bell F. G. Engineering geology and geotechnics. London: Elsevier, 2013. 504 p.
7. Бабушкин В. А., Пересушко Д. И. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий при разведке и освоении месторождений твердых полезных ископаемых. М.: Недра, 1969. 408 с.

8. Waltham T. Foundations of engineering geology. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2014. 104 p.
9. Бондарик Г. К., Ярғ Л. А. Инженерно-геологические изыскания. М: КДУ, 2008. 424 с.
10. Pisetski V. B. et al. Solving the problems of obtaining geological information with using geophysical methods of research during engineering-geological surveys. 23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.201701984
11. Abaturova I. V. et al. Engineering-geological conditions for construction of highways in the cryolithozone // 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2018.
12. Kozlov V. et al. Assessment of the impact of talik zones on the development of mineral deposits // Engineering and Mining Geophysics 2019. 15th Conference and Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers. 2019. No. 1. P. 1–6.
13. Сепреев Е. М. Теоретические основы инженерной геологии. Геологические основы. М.: Недра, 1985. 332 с.
14. Пучков В. Н. Строение, эволюция и минерагения гипербазитового массива Рай-Из. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. 229 с.
15. Пендин В. В. Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии. М.: КДУ, 2009. 350 с.

Поступила в редакцию 17 января 2020 года

Сведения об авторах:

Звонарев Евгений Алексеевич – старший преподаватель кафедры геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях Уральского государственного горного университета.
E-mail: evgen-zvonarev@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-61-69

Step-by-step investigation of engineering and geological conditions of mineral deposits for safe mining

Evgenii A. Zvonarev¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. Engineering and geological processes as a result of process operation at deposits often develop at an exponential rate. This problem is specific due to complex and multifactorial nature of the processes which arise when rock mass interacts with mine workings. For this reason engineering and geological information should be obtained step by step beginning with the stage of prospecting and evaluation and proceeding at the stages of construction and operation of mine workings.

Research aim is to consider methodological basis to form the databases of geological engineering information about mining facilities at various stages of their life cycle.

Research methodology. The types of operations have been described on acquisition and interpretation of engineering-geological information required to detail models of the engineering-geological conditions at every stage. An important factor in creating a reliable and functioning geomechanical model of mineral deposits is survey operations follow-up and gradual transition from regional and provincial engineering-geological conditions and tectonic structure to engineering-geological conditions of a specific deposits or occurrence.

Research results. By the example of chrome field located in the Polar Urals within the Rai-Iz massif, all detail stages of mineral deposits engineering-geological conditions model have been established taking into account the conditioning selected components and factors; possible problems have been described and the results of step-by-step predictive estimates of mine workings stability have been presented.

Summary. The research present an example of engineering-geological data detailing by the results of the gamma ray log and caliper logging at the stages of pit slope stability forecast model construction. Obtained in the course of long-term data collecting and processing, the model of Tsentralnoe field has proved its efficiency in the course of mining.

Key words: engineering-geological conditions; model of engineering-geological conditions; mineral deposits; rock mass; physical and mechanical properties; mine working.

REFERENCES

1. Beniavski Z. *Rock pressure management*. Translation from English by M. E. Slomyn. E. I. Shemiakin (ed.). Moscow: Mir Publishing; 1990. (In Russ.)
2. Savitsev I. Experience in the application of geophysical research methods in engineering and environmental surveys for quarrying. In: *Engineering and Mining Geophysics 2018. 14th Conference and Exhibition, Extended Abstracts*. 2018. DOI: 10.3997/2214-4609.201800544
3. Zvonarev E. A. et al. Discreteness of the geological environment as an indicator of the development of engineering-geological processes. In: *Engineering and Mining Geophysics 2019. 15th Conference and Exhibition*. 2019. April. DOI: 10.3997/2214-4609.201901737

4. Zvonarev E. A., Abaturova I. V. Features of engineering-geological conditions, determining developments of chromite deposit "Saranovskoe". In: *Engineering and Mining Geophysics 2018. European Association of Geoscientists and Engineers*. 2018; 1: 1–8.
5. Abaturova I. V. et al. The influence of components of engineering-geological conditions on mineral mining in permafrost zone. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2015; 9: 22–27.
6. Bell F. G. *Engineering geology and geotechnics*. London: Elsevier, 2013. 504 p.
7. Babushkin V. A., Peresunko D. I. *Studying hydrogeological and engineering-geological conditions when exploring and operating solid minerals deposits*. Moscow: Nedra Publishing; 1969. (In Russ.)
8. Waltham T. *Foundations of engineering geology*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2014. 104 p.
9. Bondarik G. K., Iarg L. A. *Soil surveying*. Moscow: KDU Publishing; 2008. (In Russ.)
10. Pisetski V. B. et al. Solving the problems of obtaining geological information with using geophysical methods of research during engineering-geological surveys. In: *23rd European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.201701984
11. Abaturova I. V. et al. Engineering-geological conditions for construction of highways in the cryolithozone. In: *24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. 2018.
12. Kozlov V. et al. Assessment of the impact of talik zones on the development of mineral deposits. In: *Engineering and Mining Geophysics 2019. 15th Conference and Exhibition. European Association of Geoscientists and Engineers*. 2019. No. 1. P. 1–6.
13. Sergeev E. M. *Theoretical fundamentals of engineering geology. Geological fundamentals*. Moscow: Nedra Publishing; 1985. (In Russ.)
14. Puchkov V. N. *Structure, evolution and minerageny of a hyperbasic mass of Rai-Iz*. Sverdlovsk: UB AS USSR Publishing; 1990. (In Russ.)
15. Pendin V. V. *Complex quantitative analysis of information in engineering geology*. Moscow: KDU Publishing; 2009. (In Russ.)

Received 17 January 2020

Information about authors:

Evgenii A. Zvonarev – senior lecturer, Department of Geology and Protection in Emergency Situations, Ural State Mining University. E-mail: evgen-zvonarev@mail.ru

Для цитирования: Звонарев Е. А. Стадийность изучения инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых с целью обеспечения безопасного проведения горных работ // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 3. С. 61–69. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-61-69

For citation: Zvonarev E. A. Step-by-step investigation of engineering and geological conditions of mineral deposits for safe mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 3: 61–69 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-61-69