



К ПРОБЛЕМЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕЩИНОВАТОГО МАССИВА

А. И. Конури́н, С. А. Неверов, А. А. Неверов, С. А. Щукин

*Институт горного дела СО РАН, E-mail: nsa_nsk@mail.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Обоснованы требования для достижения близких к реальным условиям численных геомеханических оценок. Выявлены ограничения в моделировании, предопределяющие надежность и точность прогноза механического поведения массива пород и горнотехнических конструкций. Показано, что создание геомеханической модели для действующего или нового осваиваемого рудника позволит на качественно новом уровне решать вопросы оперативного выбора способа управления состоянием массива пород на стадии вскрытия, подготовки и очистной выемки минерального сырья, а также разработать комплекс научно-обоснованных рекомендаций и инженерно-технических мероприятий по решению вопросов безопасной отработки месторождения на разных этапах ведения горных работ с приемлемыми рисками для предприятия. При выполнении численного моделирования учету трещиноватости массива горных пород следует уделять особое внимание.

Массив, геолого-тектоническая структура, модель, напряженно-деформированное состояние, моделирование, порядок отработки, безопасность

PROBLEM OF NUMERICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE AND STABILITY OF FRACTURED ROCK MASS

A. I. Konurin, S. A. Neverov, A. A. Neverov, and S. A. Shchukin

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: nsa_nsk@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The requirements for achieving numerical geomechanical estimates close to real conditions are substantiated. Limitations in modeling which predetermine the reliability and accuracy of prediction of the rock mass mechanical behavior and mining structures are identified. It is shown that creation of a geomechanical model for an existing or newly developed mine allows to solve the problems of the operational choice of the method of rock mass state control at the opening, preparation and stoping stages at a qualitatively new level. This will also help to develop a set of scientifically justified recommendations and engineering activities for safe deposit mining at different phases of mining operations with acceptable risks for the enterprise. When performing numerical modeling, special attention should be paid to rock mass fracturing

Rock mass, geological and tectonic structure, model, stress-strain state, modeling, mining sequence, safety

В современных условиях при подземной разработке минерального сырья все чаще возникает задача геомеханической оценки параметров геотехнологий добычи, существующих и проектируемых горнотехнических ситуаций на месторождении при всем многообразии горно-геологических и техногенных факторов [1–13]. Особенно актуальна данная задача примени-

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-6827.2018.5).

тельно к обоснованию степени влияния горных выработок (камер, слоев, целиков, очистных пространств и др.), физико-механических и деформационно-прочностных свойств пород на характер изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) пород, а также устойчивость нарушенного массива.

Как правило, горнотехническая обстановка на месторождении вследствие непрерывного развития и ведения горных работ постоянно претерпевает как конструктивные, так и геолого-геомеханические изменения, которые находятся в тесной взаимосвязи между собой. Так, формирование техногенных участков в массиве пород оказывает влияние на деформационные процессы, характер распределения действующих напряжений в рудо-породном массиве, а также на физико-механические свойства горных пород, их блочность, трещиноватость, нарушенность и в целом устойчивость.

Численные геомеханические оценки, близкие к реальным условиям, могут быть достигнуты при соблюдении следующих требований.

1. Детальный анализ геолого-маркшейдерской информации. От качества предоставленной документации зависит объективность поставленных и решаемых задач по оценке НДС и устойчивости массива пород. Достаточно подробные геологические и маркшейдерские сведения позволяют разработать более адекватные и максимально приближенные к натурным условиям геомеханические модели горнотехнических конструкций. Геомеханические модели по совокупным признакам представляют собой физико-механические системы массива горных пород как его реакцию на природное и техногенное воздействие при взаимном влиянии геолого-структурных параметров (географического расположения, рельефа местности, морфологии, литологии, тектоники, блочности, трещиноватости, природного поля напряжений, физико-механических свойств, устойчивости пород) на технологические особенности очистной выемки.

2. Фактические данные о параметрах исходного природного напряженного состояния массива пород месторождения [3, 14–18]. Имеющиеся сведения о закономерностях распределения и величинах действующих напряжений в массиве пород даже для крупного эксплуатируемого рудника на сегодняшний день носят нередко отрывочный характер, а для всего месторождения при этом делается экстраполяционное обобщение. Обычно по типу напряженного состояния, характерного для определенного диапазона геомеханических факторов, осуществляется прогноз механического поведения массива пород за пределами известного интервала. Причиной относительно малой представительности и низкой достоверности информации о напряженном состоянии нетронутого массива является высокая трудоемкость производственных экспериментов и отсутствие практических данных о физико-механических свойствах пород, лишь изредка получаемых в натуральных условиях. Наиболее ценные сведения представляет инструментальный мониторинг компонент смещений и деформаций массива в элементах систем разработок, особенно соизмеримых с параметрами очистных пространств.

3. Научно обоснованный выбор механической модели поведения массива пород под нагрузкой, устанавливающей взаимосвязь деформаций и напряжений. В соответствии со структурно-механическими особенностями массива горных пород в практике математического моделирования широко применяется упругая, упругопластическая и вязкоупругая (реологическая) механические модели. Для их расчета используются законы механики сплошной среды.

Для правильно подобранной механической модели геосреды, как правило, требуется большое количество экспериментальных величин, характеризующих механические свойства массива горных пород. При этом основная роль отводится изучению полной диаграммы деформирования горных пород, характеризующей их деформационные свойства. По зависимостям “напряжение σ – деформация ϵ ” можно судить о характере и склонности пород к хрупкому или пластическому деформированию, о деформационном поведении пород под нагрузкой, а следовательно, о механической модели массива пород. Так, общеизвестно, что склонность пород

к хрупкому разрушению устанавливается по соотношению прочностных характеристик на сжатие и растяжение, модуля упругости E и модуля спада M , а также упругой деформации к полной. Склонными к хрупкому разрушению считаются породы, у которых модуль спада равен или превышает модуль упругости (запредельная ветвь полной диаграммы деформирования круче, чем упругая, т. е. $M/E \geq 1$), упругая деформация составляет более 0.7 от полной, а предел прочности на сжатие более чем в 8–10 раз превышает предел прочности на растяжение. Горные породы относятся преимущественно к скальным высокомодульным геологическим материалам, разрушение которых происходит хрупко без заметной пластической деформации. При превышении предела упругости предполагается, что порода разрушается практически мгновенно, подобно микровзрыву. Однако за счет смежного взаимодействия с другими элементами пород массив может сохранять свое положение, но при этом перестает обладать несущей способностью.

Как показывает практика, отсутствие в исходной информации условий механического поведения массива горных пород под нагрузкой, т. е. полной диаграммы деформирования, обуславливает, как правило, принятия ситуации, при которой возможно получение наибольших напряжений посредством выбора линейно-деформируемой зависимости по закону Гука (для каждой породы или слоя используется упругая модель квазиизотропной геологической среды). Даже для одной разновидности пород абсолютные значения деформационных и прочностных свойств имеют широту разбросанности в диапазоне от 30–50 до 300 % и более, в особенности с изменением глубины выемки (рис. 1–3). Вследствие этого, применение абсолютно любой механической модели поведения массива, обладающего сложными горно-геологическими условиями, затруднено из-за отсутствия информации о натуральных свойствах пород. В некоторых случаях надо понимать, что сложности могут возникнуть даже в условиях применения научно обоснованной модели упругого поведения массива пород, для которой требуется минимальное количество входных физических данных.

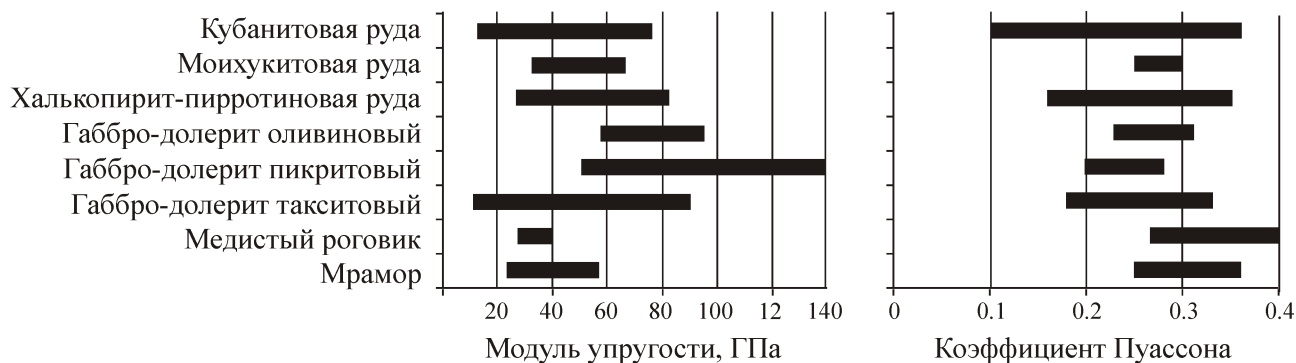


Рис. 1. Деформационные характеристики горных пород Талнахского рудного узла

Особенно следует отметить степень нарушенности массива горных пород, которая неодинаково влияет на геомеханические процессы, происходящие вокруг горных выработок. Это обусловлено трещиноватостью массива, которая приводит к существенному снижению как прочностных, так и упругих свойств горных пород [8, 13–14].

В практических расчетах переход от свойств образца к характеристикам нарушенного массива осуществляется с помощью коэффициента структурного ослабления. Его величина отражает степень изменения свойств в массиве, в основном, прочностных, по сравнению с образцом. При этом различие свойств пород в образце и массиве может достигать первые разы и доходить до одного и более порядка.

В большинстве случаев вследствие недостаточной информационной базы о упругих свойствах нарушенных горных пород при выполнении численного моделирования используют существующие аналитические и эмпирические подходы [14, 19–20].

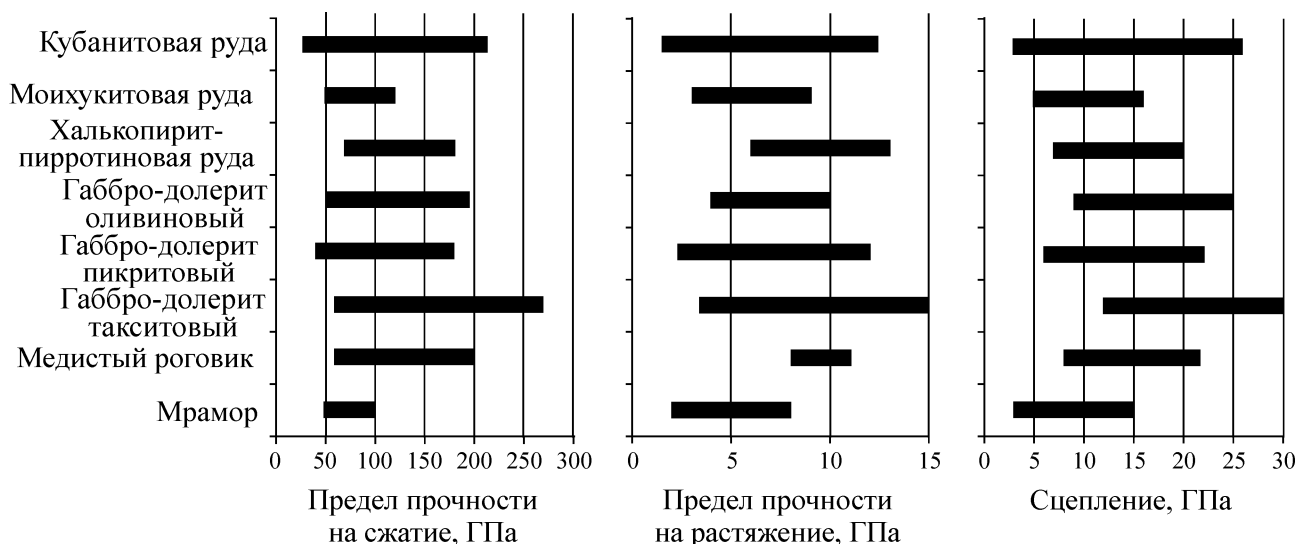


Рис. 2. Прочностные свойства горных пород Талнахского рудного узла

В целом, учитывая реальную действительность, трещиноватый скальный массив не может рассматриваться как сплошная среда, так как напряжения и перемещения в нем не являются непрерывными функциями координат. Возникающие сложности невозможно преодолеть путем моделирования бесчисленного множества разрезов – трещин. В настоящее время используется другой подход, при котором фактическая трещиноватая геологическая среда заменяется эквивалентным по деформируемости сплошным массивом, т. е. массивом, модуль (или модули) упругости которого подбираются таким образом, чтобы НДС реального и эквивалентного массивов были близки по качественной и количественной характеристике. В связи с этим задача учета влияния трещиноватости на деформируемость скальных массивов сводится к определению параметров эквивалентного по деформируемости сплошного массива.

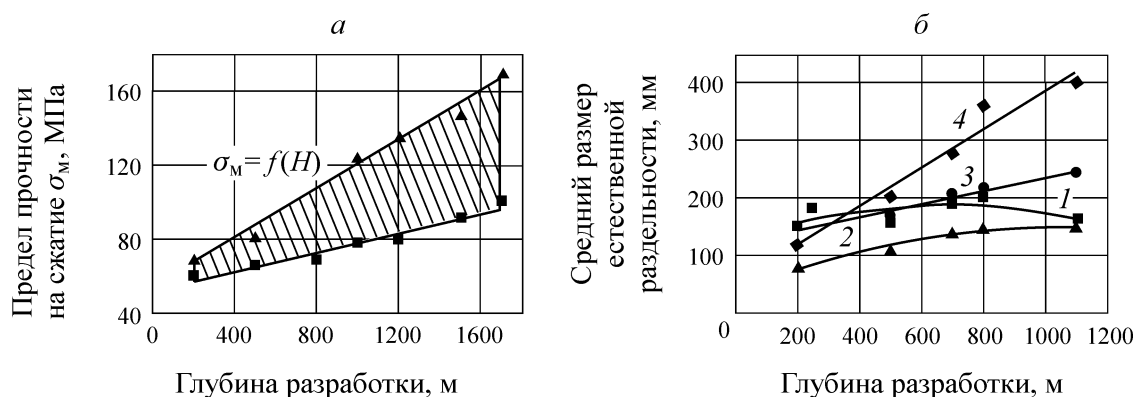


Рис. 3. Изменение с глубиной разработки прочности рудного массива (а) и среднего размера естественной отдельности руд и пород (б) Талнахского рудного узла: 1 — осадочные породы; 2 — метаморфизованные породы; 3 — интрузивные породы; 4 — сплошные сульфидные руды

С учетом изложенного в практике геомеханического моделирования широкое применение находят идеализированные модели, в которых отражают лишь главные для данной задачи свойства массива и механизм проявления горного давления. Для реализации более точной модели резко возрастает количество геологических данных, значения которых нередко остаются неизвестными. Низкая достоверность их величин приводит к тому, что усилия по более точному описанию механического поведения массива пород часто не соответствуют получаемым результатам. Вследствие этого описание механического поведения массива пород более сложными моделями представляет в настоящее время только научный интерес.

4. Определение геометрических параметров области решения и граничных условий.

В основе большинства геомеханических решений, как правило, лежит обоснование конкретной горнотехнической ситуации без привязки выработок и очистных пространств ранее отработанных участков месторождения, что относит их к частным случаям. Следует добавить, что подобное решение также применяется при прогнозных оценках новых геотехнологий, для первоначальной реализации которых необходимы хотя бы предварительные результаты. Несомненно, учет всего комплекса горных выработок, оказывающих влияние на анализируемый район, обеспечит получение более корректных результатов, соответствующих шахтным условиям. Однако в рамках всего месторождения, принимая во внимание его пространственные и временные параметры (размеры залежей до 5–10 км, срок эксплуатации рудника более 30 лет), требуется разработка сложной геомеханической модели.

Выявленные ограничения в моделировании и неопределенность исходной геолого-маркшейдерской информации предопределяют надежность и точность прогноза механического поведения массива пород и в некоторых случаях делают оправданным приближенный анализ НДС горнотехнических конструкций. Поэтому конкретная геомеханическая проблема решается набором необходимых экспериментальных данных и теоретических решений.

ВЫВОДЫ

Создание геомеханической модели для действующего или осваиваемого рудника позволит на качественно новом уровне решать вопросы оперативного выбора способа управления состоянием массива пород на стадии вскрытия, подготовки и очистной выемки минерального сырья, а также разработать комплекс научно-обоснованных рекомендаций и инженерно-технических мероприятий по решению вопросов безопасной отработки месторождения на разных этапах ведения горных работ с приемлемыми рисками для предприятия.

При оценке НДС массива пород величина технологических и экономических рисков может меняться в широких пределах, а уровень их значимости для рудника (шахты) будет определяться масштабами производства и его финансовой деятельностью. При этом очевидными и открытыми остаются вопросы обеспечения безопасных условий труда, которым на любом горном предприятии необходимо уделять первостепенное значение в независимости от достижения технологических и экономических показателей, характеризующих эффективность эксплуатации месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Kozyrev A. A., Panin V. I., Ivanov S. N., et al.** Control of rock pressure in tectonically strained massifs, Part 2, Apatity, 1996, 162 pp. (in Russian) [**Козырев А. А., Панин В. И., Иванов С. Н. и др.** Управление горным давлением в тектонически напряженных массивах. Ч. 2. — Апатиты, 1996. — 162 с.]
2. **Benyavsky Z.** Management of ground stress, Moscow, Mir, 1990, 254 pp. (in Russian) [**Бенявский З.** Управление горным давлением — М.: Мир, 1990. — 254 с.]
3. **Kurleniya M. V., Seryakov V. M., and Eremenko A. A.** Technogenic geomechanical stress fields, Novosibirsk, Nauka, 2005, 264 pp. (in Russian) [**Курления М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.** Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.]
4. **Freidin A. M., Neverov A. A., Neverov S. A., and Filippov P. A.** Modern methods of developing ore deposits with a collapse at great depths, Monograph, Resp. ed. A. P. Tapsiev; Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Publishing House of the SB RAS, 2008, 151 pp. (in Russian) [**Фрейдин А. М., Неверов А. А., Неверов С. А., Филиппов П. А.** Современные способы разработки рудных залежей с обрушением на больших глубинах. Монография / отв. ред. А. П. Тапси́ев, ИГД СО РАН. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — 2008. — 151 с.]

5. **Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A., and Konurina M. I.** Geomechanical parametricization of rock massif for selection and substantiation of technology of underground works, 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (Sgem 2018), Exploration and mining mineral processing, vol. II, Sofia, Bulgaria: Stef92 Technology Ltd., pp. 451–458.
6. **Konurin A. I., Schukin S. A., Neverov S. A., and Neverov A. A.** Sub-level caving under the protection of the ore-rock “cushion” during the transition from open work to underground excavation, *Fundamental and Applied Mining Science*, vol. 5, no. 2, 2018, pp. 67–74 (in Russian) [**Конурин А. И., Шукин С. А., Неверов С. А., Неверов А. А.** Подэтажное обрушение под защитой рудо-породной “подушки” при переходе от открытых работ к подземной выемке // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* — 2018. — № 2. — С. 67–74.]
7. **Yeremenko V. A., Barnov N. G., Kondratenko A. S., and Timonin V. V.** Method of development of steep low-density vein deposits, *Mining Journal*, 2016, no. 12, pp. 45–50 (in Russian) [**Еременко В. А., Барнов Н. Г., Кондратенко А. С., Тимонин В. В.** Способ разработки крутопадающих маломощных жильных месторождений // *Горн. журнал.* — 2016. — № 12. — С. 45–50.]
8. **Neverov A. A., Konurin A. I., Neverov S. A., Medvedeva N. P., Khmelinin A. P.** Geomechanical analysis of extraction of subcardial reserves at the Makmal mine, 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (Sgem 2018), Exploration and mining mineral processing, vol. II, Sofia, Bulgaria: Stef92 Technology Ltd., pp. 427–434.
9. **Freidin, A. M., Neverov, S. A., Neverov, A. A., and Konurin, A. I.** Validation of choice and determination of geotechnology parameters with regard to stress-strain state of rocks, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 134(1), 012019.
10. **Konurin A. I., Neverov S. A., Neverov A. A., and Konurina M. I.** Three-dimensional geomechanical parameterization of the field as the basis for the choice of mining technology, *Earth Sciences. Current state: Materials of the 5th All-Russian Youth Scientific and Practical School-Conference*, Novosibirsk, CPI NSU, 2018, pp. 41–43. (in Russian) [**Конурин А. И., Неверов С. А., Неверов А. А., Конурина М. И.** Трехмерная геомеханическая параметризация месторождения как основа выбора технологии горных работ // *Науки о Земле. Современное состояние: материалы V Всерос. молодежной науч.-практ. школы-конф.* — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. — С. 41–43.]
11. **Baryshnikov V. D. and Gakhova L. N.** Geomechanical substantiation of placement of rifled and clearing workings during the ascending system of mining of sub-career reserves of the Aikhal mine, *Journal of Mining Science*, 2008, no 2, pp. 47–55 (in Russian) [**Барышников В. Д., Гахова Л. Н.** Геомеханическое обоснование размещения нарезных и очистных выработок при восходящей системе отработки подкарьерных запасов рудника “Айхал”. // *ФТПРПИ.* — 2008. — № 2. — С. 47–55.]
12. **Freidin A. M., Neverov A. A., and Neverov S. A.** Geomechanical assessment of the combined system of development of powerful flat ore deposits with backfill and collapse, *Journal of Mining Science*, 2016, no. 5, pp. 114–124 (in Russian) [**Фрейдin А. М., Неверов А. А., Неверов С. А.** Геомеханическая оценка комбинированной системы разработки мощных пологих рудных залежей с закладкой и обрушением // *ФТПРПИ.* — 2016. — № 5. — С. 114–124.]
13. **Shaposhnik Yu. N., Neverov A. A., Neverov S. A., and Nikolsky A. M.** Evaluation of the impact of accumulated voids on the safety of the completion of the Artemyevskoye field, *Journal of Mining Science*, 2017, no. 3, pp. 108–118 (in Russian) [**Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Никольский А. М.** Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения // *ФТПРПИ.* — 2017. — № 3. — С. 108–118.]
14. **Zoteev O. V.** *Geomechanics, Textbook for students of universities*, USMU, Institute of Mining Ural Branch Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 2003, 255 pp. (in Russian) [**Зотеев О. В.** *Геомеханика: учеб. пособие для студентов вузов, УГТУ, ИГД УрО РАН.* — Екатеринбург, 2003. — 255 с.]
15. **Markov G. A.** *Tectonic tensions and rock pressure in the mines of the Khibiny Massiv*, Leningrad, Nedra, 1977, 213 pp. (in Russian) [**Марков Г. А.** *Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива.* — Л.: Недра, 1977. — 213 с.]

16. **Kropotkin P. N.** The results of measurements of the stress state of rocks in Scandinavia, in Western Europe, in Iceland, Africa and North America, Moscow, Nauka, 1973, 188 pp. (in Russian) [**Кропоткин П. Н.** Результаты измерений напряженного состояния горных пород в Скандинавии, в Западной Европе, в Исландии, Африке и Северной Америке. — М.: Наука, 1973. — 188 с.]
17. **Zubkov A. V., Zoteev O. V., Smirnov O. Yu., et al.** Patterns of formation of the stress-strain state of the crust of the Urals in time. Lithosphere, 2010, no. 1. pp. 84–93 (in Russian) [**Зубков А. В., Зотеев О. В., Смирнов О. Ю. и др.** Закономерности формирования напряженно-деформированного состояния земной коры Урала во времени. Литосфера. — 2010. — № 1. — С. 84–93.]
18. **Neverov S. A.** Typification of ore deposits with increasing depth by the type of stress state, Part 2, Tectonotypes of ore deposits and models of the geological environment, Journal of Mining Science, 2012, no. 3, pp. 25–34 (in Russian) [**Неверов С. А.** Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Ч. 2: Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 25–34.]
19. **Ratz M. V. and Chernyshev S. N.** Fracture and properties of fractured rocks, Nedra, 1970, 164 pp. (in Russian) [**Рац М. В., Чернышев С. Н.** Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. — Недра, 1970. — 164 с.]
20. **Iudin M. M.** On the fracturing of the rock mass, Mining Information Analytical Bulletin, Moscow, MGGU, 2007, pp. 278–283 (in Russian) [**Иудин М. М.** О трещиноватости массива горных пород // ГИАБ. — М.: Изд-во МГГУ. — 2007. — С. 278–283.]