



**О СТРУКТУРЕ ТЕХНОГЕННО ИЗМЕНЕННЫХ НЕДР
КАК НОВОГО ЛИТОСФЕРНОГО ОБЪЕКТА**

В. А. Еременко, Ю. П. Галченко, М. А. Косырева, А. Р. Умаров

*Горный институт НИТУ "МИСиС", E-mail: prof.erehenko@gmail.com,
Ленинский проспект 4, г. Москва 119991, Россия*

Рассматриваются структура и характер формирования техногенно измененных недр. Предложена количественная оценка устойчивости техногенно измененного массива горных пород, полученная как сумма установленных с использованием различных геофизических и геомеханических методов и характеризующих массив показателей, преобразованных в безразмерные величины путем отношения их измененных в процессе ведения горных работ значений к исходным.

Техногенно измененный массив, литосфера, нарушенность, вторичное поле напряжений, параметры техногенного изменения состояния массива GD и устойчивости RMS, напряжения, микродеформация

**ABOUT THE STRUCTURE OF TECHNOGENICALLY CHANGED SUBSOIL
AS A NEW LITHOSPHERIC OBJECT**

V. A. Eremenko, Yu. P. Galchenko, M. A. Kosyрева, and A. R. Umarov

*Mining Institute, National University of Science and Technology "MISIS",
E-mail: prof.erehenko@gmail.com, Leninsky pr. 4, Moscow 119991, Russia*

The authors discuss the structure and formation character of technogenically changed subsoil. A quantitative assessment of the stability of technogenically changed rock mass is proposed, obtained as the sum of the indicators determined using various geophysical and geomechanical methods and characterizing the array of indicators converted into dimensionless quantities by the ratio of their values changed during mining operations to the initial values.

Technogenically changed rock mass, lithosphere, disturbance, secondary stress field, parameters of technogenically changed state GD and rock mass stability RMS, stresses, microstrain

Для оценки состояния разрабатываемого массива используются такие категории как устойчивость или неустойчивость. Массив сложен из горных пород — многих в различных сочетаниях или одной с какими-то включениями, неоднородностями и т. п. Техногенно измененный массив — это состоящий из горных пород объект, который нарушен проходкой в нем, например, выработок или отработкой камер [1–4]. Техногенно измененный массив — объект геомеханический, а горная порода — геологический.

Горные породы характеризуются такими свойствами, как пределы прочности на сжатие и растяжение, модуль упругости, трещиноватость и многими другими. У массива предела прочности на сжатие нет, а у породы есть. В целом массив суммарно обладает всеми свойствами горных пород, из которых состоит. Возникает вопрос, как определить порядок количественной оценки состояния и свойств массива, а также его нарушенности. Как литосферный объект массив и его нарушенность должны описываться суммой следствий. Нарушенность — это не трещиноватость, а породы могут быть трещиноватыми. Нарушенность — это оценка этой трещиноватости в пределах массива.

Для количественной оценки состояния техногенно измененного массива горных пород предлагаются значения параметров, измеренных с помощью акустических, геофизических, деформационных и др. методов, превратить в безразмерные, используя отношения измеренных (измененных) значений к параметрам ненарушенного массива. Сумма безразмерных показателей будет являться характеристикой массива. Если в зоне влияния горных работ регистрируются изменения напряжений относительно исходного напряженного состояния, то при количественной оценке необходимо учитывать соотношение напряжений.

Сравнение безразмерных показателей в течение выбранного промежутка времени позволяет определить скорость изменения состояния массива в данный период. Безразмерные величины можно объединять в интегральный показатель. При этом количественные показатели необходимо классифицировать. Идея состоит в том, что сумма этих свойств будет свойством техногенно измененного массива — интегральный показатель свойств пород, слагающих техногенно измененный массив. Отклонение от исходного состояния нетронутого массива — это и есть параметр техногенного изменения состояния массива GD (ground deterioration). Устойчивость массива RMS (rock mass stability) можно определить:

$$RMS = 1 + GD, \quad (1)$$

$$GD = \sum_{i=1}^k n_i \quad (2)$$

$$n_i = \begin{cases} 0, & \text{если } n_i^n = n_i^0 \\ \frac{n_i^n}{n_i^0}, & \text{если } n_i^n \neq n_i^0, \end{cases} \quad (3)$$

где n_i — показатель техногенного изменения различных свойств массива; n_i^0 , n_i^n — показатель нетронутого и измененного массива соответственно; k — число показателей техногенного изменения различных свойств массива.

Если показатель n_i имеет негативное влияние на устойчивость массива, то в (2) он входит со знаком “–”, если положительное — “+”. Если $GD = 0$, то $RMS = 1$. Таким образом, показатель устойчивости нетронутого массива $RMS = 1$.

Следует отметить, что устойчивость техногенно измененного массива горных пород может быть $RMS < 1$, в том числе с отрицательным знаком, если замеренные величины выше исходных и имеют негативное влияние на устойчивость массива; $RMS > 1$ характеризуют устойчивость массива, $RMS < 1$ — его неустойчивость. Чем выше $|RMS|$ в обоих случаях, тем массив более устойчив или неустойчив соответственно.

Параметры техногенно измененных свойств массива могут включать все значения n_i , которые экспериментально исследуются и регистрируются, например, физико-механические и сейсмоакустические свойства горных пород, электросопротивление массива, качество породного массива (индекс Q , рейтинг RMR и др.), напряжения, деформации и многие известные другие параметры [5–14]. Устойчивость техногенно измененного массива RMS в условиях ведения горных работ на исследуемом участке изменяется со временем — как правило, снижается.

В качестве примера приведем расчет устойчивости массива RMS для условий ведения подземных горных работ на одном из разрабатываемых участков Таштагольского месторождения [9]. В исходном поле геомеханическим методом по дискованию керна регистрируется максимальное напряжение $n_1^0 = \sigma_1 = 25$ МПа, а в условиях ведения горных работ во вторичном поле — $n_1^n = \sigma_{\max} = 35$ МПа, следовательно $n_1 = -1.4$. По наблюдениям за развитием деформационных процессов методами глубинных и контурных реперов, а также оптической съемке стенок скважин в условиях ведения горных работ определены максимальные микродеформации во вторичном поле $n_2^n = \varepsilon_\mu = 850$; в исходном состоянии $n_2^0 = \varepsilon_\mu = 150$ (что подтверждается результатами

численного моделирования), $n_2 = -5.66$. Методом оценки степени удароопасности массива горных пород по регистрации естественного электромагнитного излучения прибором ANGEL-M на рассматриваемом участке в исходном поле определяется амплитуда импульсов $n_3^0 = A = 11$ мкВ; в условиях ведения горных работ $n_3^H = A = 40$ мкВ, $n_3 = -3.63$. На основе микросейсмических наблюдений с использованием прибора “Сапфир” регистрируется средняя активность массива $n_4^0 = N_{a1} = 2$ импульса за 15 с; в условиях ведения горных работ $n_4^H = N_{a1} = 12$ импульсов за 15 с, $n_4 = -6.00$. На основе оценки степени удароопасности массива горных пород электрометрическим методом в исходном поле электросопротивление массива $n_5^0 = \bar{\rho}_1 = 400$ Ом/м, а в условиях ведения горных работ $n_5^H = \bar{\rho}_2 = 300$ Ом/м, $n_5 = -0.75$.

Подставляем полученные значения в формулу (1) и получаем количественную оценку техногенно измененного массива горных пород по пяти показателям:

$$\text{RMS} = 1 + \text{GR} = 1 + \sum_{i=1}^5 n_i = 1 - 1.4 - 5.66 - 3.63 - 6 - 0.75 = -16.44,$$

так как $\text{RMS} < 1$, техногенно измененный массив неустойчив.

При проведении экспериментальных исследований и накоплении статистических данных о свойствах и характеристиках массивов количественные параметры RMS будут классифицированы и их значения разделены на классы и категории устойчивости.

Следует отметить, что все горные работы и в целом разработка месторождений твердых полезных ископаемых ведется внутри участка литосферы с техногенно измененными свойствами массива. Традиционно, выбор системы разработки месторождений твердых полезных ископаемых или технологии осуществляется на основе экспериментально установленных свойств массива, например, устойчивости рудного и вмещающего массива и т. п. При разработке месторождений или их участков возникает вторичное поле напряжений на участке техногенно измененных недр. При этом не определены даже простые, на первый взгляд, вопросы — где начинается и заканчивается участок техногенно измененных недр и какими законами описывается.

Необходимо понятие “техногенно измененные недра” и “вторичное поле напряжений” наполнить содержанием. Например, “техногенно измененный массив горных пород” — где его начало и конец? Начало — это выработка. Часть литосферы, участок техногенно измененных недр — это и есть массив. В этом объеме есть участок полного разрушения, где ведутся горные работы. Есть также участок с измененными свойствами массива, геофизический экотон. На его внешней границе заканчиваются техногенно измененные недра и начинается исходное состояние литосферы, и на этой же границе заканчивается техногенно измененный массив. Соответственно, техногенно измененный массив — это та часть литосферы, свойства которой изменены в результате ведения горных работ. Он может иметь разную форму, размеры, свойства и пр. И всегда у него есть граница, где $\text{RMS} = 1$ т. е. часть литосферы с измененными свойствами переходят в исходное состояние литосферы. Внутри участка техногенно измененных недр находится зона полного разрушения (зона горных работ), где используется, например, крепь или искусственные целики. Это зона, где свойства литосферы обнуляются. В ней нет свойств литосферы или массива, есть только свойства горных пород. Далее за этой зоной начинается зона перехода свойств, т. е. разрушением порождается изменение геомеханического состояния массива и появляется зона, где возникают измененные свойства массива в отличие от его исходного состояния, соответственно до границы участка техногенно измененных недр или горного массива. Зона перехода свойств — это техногенно измененный массив. Например, в условиях применения систем с обрушением руды, зона перехода свойств значительна по размерам и ее граница формируется за пределами зоны обрушения руды и вмещающих пород.

Для предотвращения негативного влияния в процессе разработки месторождений или их участков необходимо придать зоне обнуления свойств такие параметры, чтобы за ее пределами в массиве не формировалось вторичное поле напряжений и отсутствовала или была минимальной его нарушенность.

Все действия при разработке месторождений твердых полезных ископаемых связаны с технологией, а результаты этих действий — это геомеханика. Соответственно возникают требования к технологиям и параметрам системы разработки. Все известные классификации систем разработки — это классификации действий по обнулению свойств литосферы. Система разработки обеспечивает разрушение участка литосферу и превращает его в рудную массу. Первая цель этих действий и применяемых систем — это безопасность, вторая — экономичность. На современном этапе развития горного дела появилась третья цель — экологичность [15]. Система действий изначально дифференцирована и хорошо описана, а вот зона перехода свойств хороших описаний до сих пор не имеет. Развитие зоны перехода свойств — это отдельная наука, которую в первую очередь необходимо развивать теоретически. Традиционно в классификациях систем разработки внешняя граница зоны перехода свойств определяется тремя типами поддержания очистного пространства, естественным, искусственным, а также обрушенными рудами и вмещающими породами. Соответственно, имеется три зоны перехода свойств. Если открытое очистное пространство, то зона перехода свойств изменяется по одним законам, если используется для поддержания закладка или обрушенные руды и породы — по другим.

Единственный способ эффективно управлять зоной перехода свойств — выбирать или менять технологию, обеспечивая при этом безопасность, устойчивость, экономичность и экологичность. Необходимые свойства техногенно измененных недр можно получить только изменяя технологию. Мониторинг при этом является вспомогательной целью. Началом отсчета выбирается технология с нулевым результатом, а так как нулевого никогда не бывает, проводится мониторинг и регистрируются изменения исходного состояния массива, выявляются опасные участки систем.

Общая методология исследований строится на том, что при техногенном разрушении литосферы, вызванном добычей полезных ископаемых, обеспечение геомеханической безопасности связано с решением фундаментальной проблемы по преодолению влияния антропогенного разрушения литосферы на процессы, протекающие в ее динамических структурах [1]. Анализ геотехнологий, применяемых при подземной разработке рудных месторождений (формирование зоны техногенного разрушения недр), позволил выделить одну общую для всех случаев особенность развития геотехнологических и геомеханических процессов — добыча полезного ископаемого в зоне техногенного разрушения литосферы и ее защита от последствий геомеханического возмущения прилегающих участков литосферы всегда совмещены во времени. В этой связи очистная выемка неизбежно включает в себя процессы, обеспечивающие поддержание динамического равновесия всей геотехнической системы и безопасности горных работ. Это означает, что при использовании традиционных систем разработки различного класса, основанных на экстенсивных методах преодоления горного давления и избавления от отходов производства, неизбежной платой за локальную геомеханическую безопасность добычных работ становится появление очагов опасных напряжений в налегающих массивах и повышение потерь балансовых запасов в целиках различного размера и назначения. Кроме того, при наличии во вмещающих породах флюидонесущих коллекторов (с водой, нефтью, рассолами или газами), горные работы всегда оказываются незащищенными от их проявлений со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Опережающее формирование каркасного контура, который вмещает будущий участок освоения недр, позволяет преодолеть указанное локальное противоречие. При формировании и развитии зоны техногенного разрушения участка литосферы процессы добычи полезного

ископаемого и защиты от последствий геомеханических возмущений литосферы разделяются во времени, что обеспечивает безопасность, эффективность и экологичность горных работ. При этом необходимо создать следующие условия: на стадии подготовки участка литосферы к разработке и сооружения каркаса, включающей проходку, поддержание горных выработок и закладочные работы $1 > RMS > 0$ на стадии отработки участка литосферы с применением каркасной горной конструкции $RMS \geq 1$. Это положение составляет содержание геомеханической идеи построения природоподобных горных геотехнологий, которая заключается в опережающем выделении зоны техногенного разрушения литосферы из общего поля вторичных изменений геомеханического состояния массива за счет разделения во времени процессов добычи полезного ископаемого и процессов преодоления последствий геомеханического возмущения прилегающих участков литосферы [16].

ВЫВОДЫ

На основе теоретических и экспериментальных исследований определена структура техногенно измененного массива как объекта, который нарушен при ведении горных работ, и условия развития его в качестве нового литосферного объекта. Предложен подход к определению границ техногенно измененных недр, как зоны обнуления свойств литосферы, измененных в результате ведения горных работ, имеющей такие параметры, чтобы за ее пределами в массиве не формировалось вторичное поле напряжений и отсутствовала его нарушенность. Предложен новый показатель устойчивости техногенно измененного массива RMS , количественно отражающий степень изменения его состояния в процессе ведения горных работ в условиях применения систем разработки различного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Trubetskoy K. N. and Galchenko Yu. P.** Nature-like geotechnologies for integrated subsoil use: problems and prospects, Moscow, Nauchtekhlitizdat, 2020. (in Russian) [**Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П.** Природоподобная геотехнология комплексного освоения недр: проблемы и перспективы. — М.: ООО “Научтехлитиздат”, 2020. — 368 с.]
2. **Stacey T. R.** A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1981, vol. 18, pp. 469–474.
3. **Galchenko Yu. P., Eremenko V. A., Kosyreva M. A., and Vysotin N. G.** Features of secondary stress field formation under anthropogenic change in subsoil during underground mineral mining, *Eurasian Mining*, 2020, no. 1, pp. 9–13.
4. **Eremenko V. A., Galchenko Yu. P., and Kosyreva, M. A.** Effect of mining geometry on natural stress field in underground ore mining with conventional and nature-like technologies, *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 416–425. [**Еременко В. А., Галченко Ю. П., Косырева М. А.** Оценка влияния геометрических параметров традиционно применяемых и природоподобных систем подземной разработки рудных месторождений на исходное поле напряжений // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 98–109.]
5. **Sidorov D. and Ponomarenko T.** Reduction of the ore losses emerging within the deep mining of bauxite deposits at the mines of Sevuralboksitruda, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sci.*, 302. 012051. 10.1088/1755-1315/302/1/012051
6. **Baryshnikov V. D., Baryshnikov D. V., Gakhova L. N, and Kachalsky V. G.** Practical experience of geomechanical monitoring in underground mineral mining, *Journal of Mining Science*, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 855–864. [**Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н., Качальский В. Г.** Опыт применения геомеханического мониторинга при подземной разработке месторождений полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 61–73.]

7. **Aptukov V. N and Volegov S. V.** Modeling concentration of residual stresses and damages in salt rock cores, *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 331–338. [**Аптуков В. Н., Волегов С. В.** Моделирование процесса формирования остаточных напряжений и поврежденности в образцах соляных пород, полученных из керна // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 3–11.]
8. **Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kagan M. M., and Panasenko I. G.** Methodology of integrated stability monitoring in mines, *Gornyi Zhurnal*, 2020, No. 1, pp. 53–57. [**Рыбин В. В., Константинов К. Н., Каган М. М., Панасенко И. Г.** Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 53–57.]
9. **Eremenko A. A., Konurin A. I., Stirts V. A., and Prob V. V.** Identification of higher rock pressure zones in rockbursthazardous iron ore deposits, *Mining Journal*, 2020, no. 1, pp. 78–81. [**Еременко А. А., Конурин А. И., Штирц В. А., Приб В. В.** Выявление зон повышенного горного давления на удароопасном железорудном месторождении // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 78–81.]
10. **Hoek E. and Brown E. T.** *Underground Excavations in Rock*. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
11. **Fairhurst C. and Cook N. G. W.** The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighbourhood of a surface, *Proc. 1st Congr. of the Int. Soc. for Rock Mech.*, Lisbon, Sept. 25–Oct. 1, 1966, vol. 1, pp. 687–692.
12. **Yu L., Ignatov Y., Ivannikov A., Khotchenkov E., and Krasnoshtanov D.** Common features in the manifestation of natural and induced geodynamic events in the eastern regions of Russia and China. 2019. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 324(1), 012004. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/324/1/012004>.
13. **Kong L., Ostadhassan M., Li C., and Tamimi N.** Rock physics and geomechanics of 3D printed rocks. *ARMA 51st U.S. Rock Mech., Geomech. Symp.*, San Francisco, California, USA, 2017, pp. 1–8.
14. **Gell E. M., Walley S. M., and Braithwaite C. H.** Review of the validity of the use of artificial specimens for characterizing the mechanical properties of rocks., *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, no. 3, pp. 1–13.
15. **Myaskov A. V.** Methods and techniques of ecological and economic justification of natural eco-system preservation in mining regions, *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2011, no. 1, pp. 399–401. [**Мясков А. В.** Методологические основы эколого-экономического обоснования сохранения естественных экосистем в горнопромышленных регионах // ГИАБ. — 2011. — № 1. — С. 399–401.]
16. **Trubetskoy K. N., Myaskov A. V., Galchenko Yu. P., and Eremenko V. A.** Creation and justification of convergent technologies for underground mining of thick solid mineral deposits, *Mining Journal*, 2019, no. 5, pp. 6–13. [**Трубецкой К. Н., Мясков А. В., Галченко Ю. П., Еременко В. А.** Обоснование и создание конвергентных горных технологий подземной разработки мощных месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. — 2019. — № 5. — С. 6–13.]