

УДК 622.831; 622,2; 622.235

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ТРАДИЦИОННО ПРИМЕНЯЕМЫХ И ПРИРОДОПОДОБНЫХ СИСТЕМ  
ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
НА ИСХОДНОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ**

**В. А. Еременко<sup>1</sup>, Ю. П. Галченко<sup>2</sup>, М. А. Косырева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Горный институт НИТУ “МИСИС”,

E-mail: prof.eremenko@gmail.com; Ленинский проспект, 4, 119991, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова РАН,  
Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия

Исследован процесс формирования вторичного поля напряжений с применением традиционных и разрабатываемых природоподобных горнотехнических систем, включающих сотовые и каркасные горные конструкции. Для количественной оценки степени изменения исходного поля напряжений при ведении добычных работ вводится новый показатель — коэффициент влияния. По результатам экспериментальных исследований в шахтных условиях, физического и численного моделирования с учетом калибровки численных моделей построена диаграмма влияния на степень изменения исходного поля напряжений геометрических параметров очистных пространств при использовании традиционных и создаваемых природоподобных систем подземной разработки рудных месторождений. Установлено, что наибольшее влияние на объемы формируемых зон растягивающих деформаций имеют системы с обрушением руды и вмещающих пород. Наилучшие показатели коэффициента влияния получены для разрабатываемой каркасной системы.

*Техногенно измененные недра, природоподобные горнотехнические системы, исходное и вторичное поле напряжений, система подземной разработки, каркасные и сотовые горные конструкции, микродеформации, скальный массив, коэффициент влияния, критерий прочности Хука–Брауна, категории устойчивости массива*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200310

Материальной и энергетической основой современной технократической цивилизации является вещество, извлекаемое из литосферы Земли в процессе формирования и развития минерально-сырьевого комплекса. С геофизической точки зрения разработку любого месторождения можно представить как поступательное формирование в сплошном массиве системы неоднородностей с нулевой или переменной плотностью. С геомеханических позиций это означает, что в результате техногенного изменения части вещества литосферы в исходном поле напряжений формируется зона вторичных напряжений, внешняя граница которой определяет пространственное положение нового литосферного объекта — техногенно измененных недр. При решении проблем безопасности

горных работ оптимальный масштаб этого объекта определяется в каждом конкретном случае способностью нарушаемых геофизических структур локализовать область вторичного поля напряжений с последующим включением ее в эволюционное развитие литосферы.

Обеспечение геомеханической безопасности при разработке твердых полезных ископаемых связано с фундаментальной научной проблемой геомеханики — раскрытием механизмов влияния техногенных нагрузок на процессы, протекающие в динамических структурах литосферы. Разработка новых перспективных горных технологий добычи минерального сырья, применение которых обеспечивает постоянное воспроизводство устойчивых динамических структур и не создаст предпосылок для возникновения катастрофических явлений, требует создания методов качественной и количественной оценки степени изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) горных пород в пределах вторичного поля напряжений относительно исходного состояния массива.

В условиях ведения подземных горных работ с применением систем разработки различного класса (с открытым очистным пространством, с креплением и закладкой выработанного пространства, с магазинированием руды, с обрушением руды и вмещающих пород [1–4]), вариативности физико-механических свойств горных пород и НДС массива, наличия тектонических разломов и флюидонесущих горизонтов формирование вторичного поля напряжений при подземной разработке рудных месторождений является динамически неустойчивым процессом [5–15]. Поэтому на начальном этапе исследований выбран метод виртуального эксперимента на основе численных моделей горнотехнических и геологических систем с последующим сравнением результатов с результатами физического моделирования ключевых элементов систем либо с количественными показателями натуральных наблюдений и экспериментов.

Для численных расчетов и анализа использовался программный комплекс Map3D [16], встроенный САПР для построения сложных трехмерных моделей, анализа и визуализации результатов расчетов, в том числе с учетом различных критериев нарушенности массива горных пород и руд.

Для оценки НДС массива в поле вторичных напряжений в предположении упругого поведения массива служил критерий прочности Хука–Брауна, являющийся функцией главных напряжений и прочностных свойств массива горных пород [17–21]. При проведении исследований рассмотрены и рассчитаны многочисленные варианты горно-геологических и горнотехнических условий разработки рудных месторождений Норильска, Якутии, Западной Сибири, Урала, Бурятии, Западной Австралии и др. с применением систем разработки различного класса. Рассмотрим вариант горно-геологических условий разработки одного из рудных месторождений, отрабатываемого на глубине 720–1050 м. Исходное напряженное состояние массива для рассматриваемого случая является литостатическим:  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \approx 12.3$  МПа ( $H = 720$  м).

Свойства горных пород и закладки приведены ниже.

Свойства горных пород вмещающего массива

Предел прочности на сжатие	80 МПа
GSI (геологический индекс прочности)	80
Структурный индекс $m_i$	10
Модуль деформации (Юнга)	30 ГПа
Сцепление	6.72 МПа
Угол внутреннего трения	37.081°
Постоянная Хука–Брауна $mb$	3.858
Постоянная Хука–Брауна $s$	0.069
Постоянная Хука–Брауна $a$	0.501
Удельный вес пород	0.025 МН/м <sup>3</sup>

Свойства пастовой закладки, состоящей из сгущенных хвостов с добавлением цемента	
Предел прочности на сжатие	0.5 МПа
Модуль деформации (Юнга)	50 МПа
Сцепление	0.112 МПа
Угол внутреннего трения	42°
Коэффициент Пуассона	0.3
Свойства твердеющей закладки, в состав которой входит песок, хвосты обогащения и цементный раствор	
Предел прочности на сжатие	8 МПа
Модуль деформации (Юнга)	2800 МПа
Сцепление	1.7809 МПа
Угол внутреннего трения	42°
Коэффициент Пуассона	0.3

Для моделирования процессов формирования и развития вторичного поля напряжений рассмотрены наиболее распространенные классы систем подземной разработки рудных месторождений [1–4], а также два принципиально новых технологических решения (каркасная и сотовая технологии [21–23]), обоснование которых выполнено в соответствии с программой фундаментальных исследований в рамках проекта РНФ № 19-17-00034.

Общая методология исследований строилась 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. 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 должны быть совмещены во времени. В этой связи очистная выемка неизбежно включает в себя процессы, обеспечивающие поддержание динамического равновесия всей геотехнической системы, и безопасность горных работ. Это означает, что при использовании традиционных систем разработки различного класса, основанных на экстенсивных методах преодоления горного давления и избавления от отходов производства, платой за локальную геомеханическую безопасность добычных работ является образование 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 (каркасная горная конструкция № 8 [22–24]), который вмещает будущий участок освоения недр, открывает реальную возможность преодоления обозначенного выше локального противоречия. 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 и эффективность горных работ.

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.

Согласно анализу и изучению горно-геологических и горнотехнических условий освоения рудных месторождений, определены необходимые параметры начальных моделей систем разработки различного класса. В качестве параметров построения модели приняты: высота, ширина и мощность выработанного и очистного пространства рассматриваемых систем разработки. Во вмещающем горнотехническую систему массиве формируется вторичное поле напряжений, структура которого зависит от размеров конструктивных элементов систем разработки, физико-механических свойств горных пород, исходного поля напряжений, качества породного и рудного массивов и иных факторов. При анализе рассматривалась внешняя граница горнотехнической системы, включающая конструктивные элементы, состоящие из выработок, камер, целиков различного назначения, выработанного пространства и др.

В качестве показателя, характеризующего состояние вторичного поля напряжений, принята микродеформация  $\varepsilon_\mu = \varepsilon \cdot 10^6$ , где  $\varepsilon$  — относительная деформация растяжения массива [25–27]:  $\varepsilon = \Delta L / L$ ,  $\Delta L$  — изменение исходного размера деформируемого объекта, м;  $L$  — исходный размер деформируемого объекта, м. Свойства вмещающего массива горных пород оценивались по показателям категории устойчивости от I до IV по принятой в РФ классификации, а также по индексу  $Q$  и рейтингу RMR [28].

При проведении лабораторных исследований установлено, что первые трещины в скальных породах обнаруживаются при уровне микродеформаций растяжения  $\varepsilon_\mu = 200$ , что является критическим значением объемного трещинообразования [25, 26]. В шахтных условиях при значениях  $\varepsilon_\mu \approx 350$  в скальных массивах отмечаются первые трещины растяжения, а с увеличением  $\varepsilon_\mu$  до 500–800 и более массив начинает интенсивно деформироваться, образуются своды и зоны возможного обрушения пород. Поэтому в качестве численного критерия, определяющего внешнюю границу вторичного поля напряжений, принято значение  $\varepsilon_\mu^k = 350$ , соответствующее микродеформации, при которой наблюдаются первые трещины в массиве горных породах.

Для оценки достоверности результатов моделирования использованы данные экспериментальных исследований и натурных наблюдений, выполненных с применением различных методов контроля НДС массива горных пород (рис. 1) на рудниках Таймырский, Октябрьский, Комсомольский, Маяк, Интернациональный, Таштагольский, Шерегешский, Казский, Зум-Холбинский, Ирокинда, Соль-Илецкий, КМАруда, Северный, Golden Grove и на шахте Скалистая.

Согласно [5, 6], исходное состояние массива горных пород литосферы представляется в виде структурированной идеальной сплошной среды, у которой возникающие в результате внешних воздействий деформации полностью обратимы, а структурные неоднородности размером  $l$  равномерно распределены по всему объему. При такой модели избыточное напряжение над упругим  $\Delta\sigma_1$  можно найти из уравнения [5, 6]

$$gqV_p^2\eta - \frac{\Delta\sigma_1}{l}\omega = \frac{d\sigma_1}{dt},$$

где  $\eta$  — изменение деформаций в массиве на изучаемой границе, ед.;  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>;  $q$  — удельный вес пород, т/м<sup>3</sup>;  $\omega$  — показатель относительной релаксации напряжений в массиве, ед.;  $V_p^2$  — объем структурной неоднородности, м<sup>3</sup>.

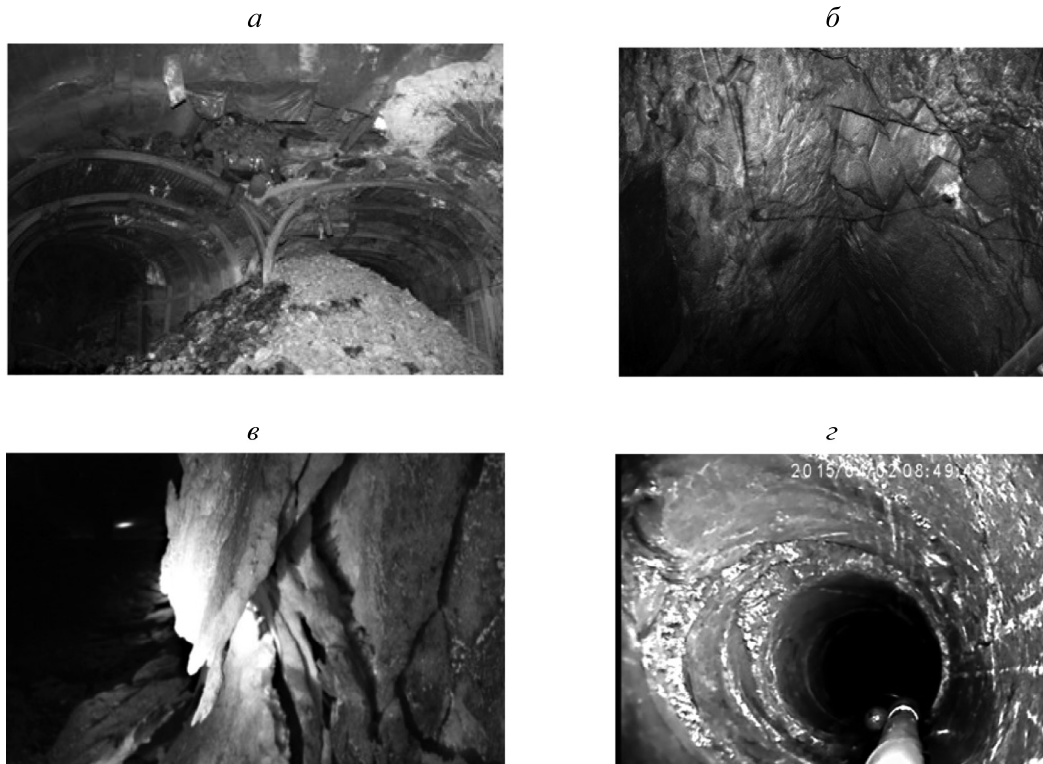


Рис. 1. Нарушения контуров выработанных пространств: *а* — разрушение пород кровли сопряжения ортов Абаканского рудника на глубину до 3.2 м от обнажения в условиях применения системы разработки этажного принудительного обрушения; *б* — место выхода закола по системам трещин на глубину 1.5 м от обнажения в подготовительной выработке Зум-Холбинского рудника в условиях применения системы разработки с магазинированием руды; *в* — отжим массива каменной соли на контуре камеры № 9 Соль-Илецкого рудника глубиной 0.5 м от обнажения с характерным образованием разрывных трещин в условиях применения камерной системы разработки без закладки; *г* — зона нарушенности пород (местоположение динамического проявления — толчка энергией  $10^2$  Дж на Таштагольском руднике), выявленная в горизонтальной скважине № 1 с диаметром 59 мм на расстоянии 5.5 м от ее устья в условиях применения системы разработки этажного принудительного обрушения

По мере развития процесса деформирования рост напряжений замедляется и для неоднородности каждого размера устанавливается свое напряжение:

$$\Delta\sigma_1 = gqV_p^2\eta\frac{l}{\omega}.$$

В такой постановке подземную разработку месторождения можно представить как образование в литосфере неоднородностей с нулевой плотностью и переменным объемом. Для каждой из этих неоднородностей концентрируется свое собственное избыточное напряжение и формируются зоны растягивающих деформаций, а интегральное единство этих показателей для всех образующихся при добыче руды неоднородностей отражает техногенное изменение НДС массива горных пород и может быть обозначено как вторичное поле напряжений. Характер формирования зон растягивающих деформаций для некоторых случаев отработки блоков и камер показан на рис. 2. В таблице приведены условия применения систем подземной разработки рудных месторождений — традиционных (системы 1–6 по классификации акад. М. И. Агошкова) и перспективных природоподобных систем (7, 8).

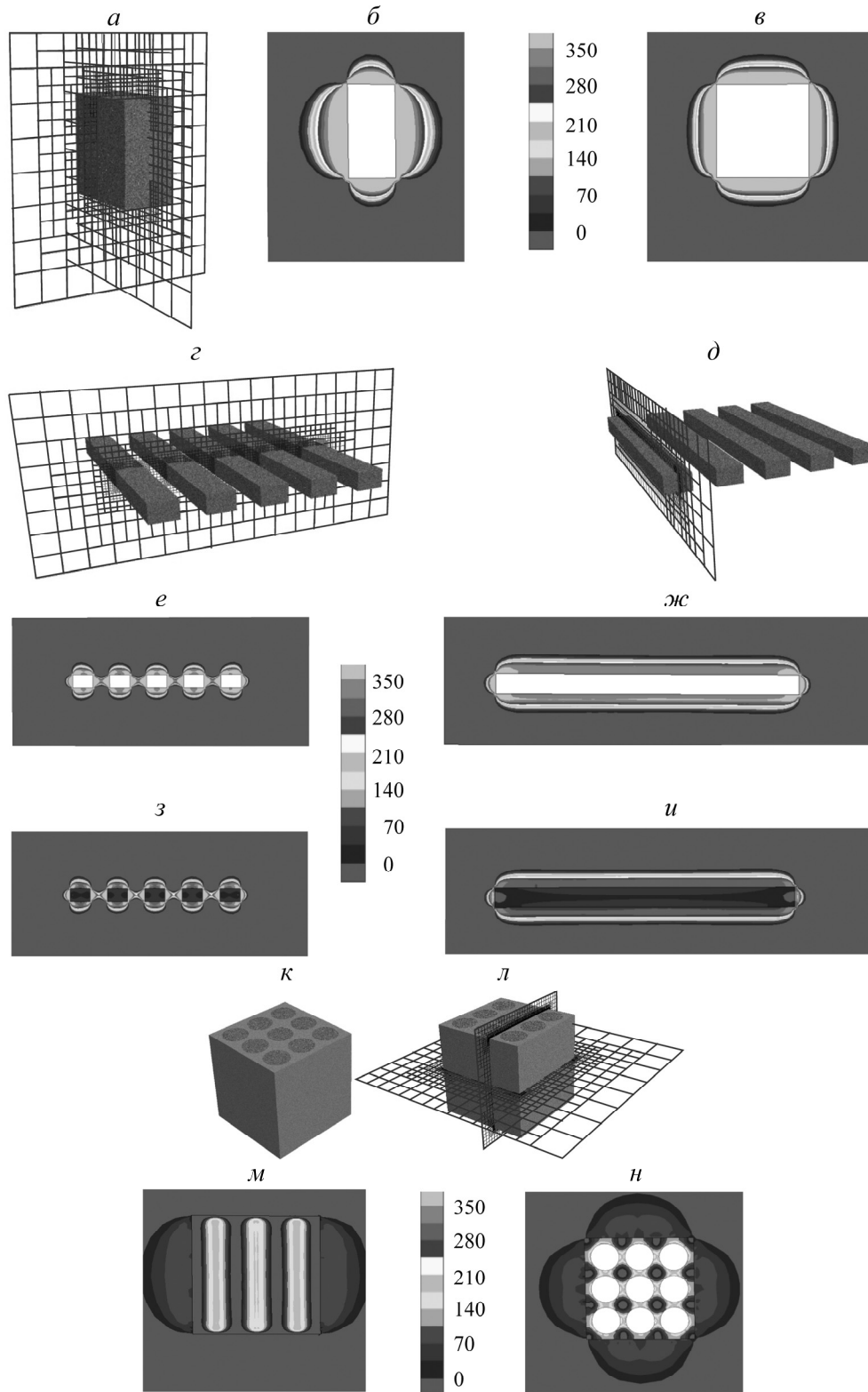


Рис. 2. Зоны растягивающих деформаций при отработке участков месторождений системами этажного принудительного обрушения (а–в), камерной системой разработки с оставлением целиков без закладки выработанного пространства (г–ж), камерной системой с пастовой закладкой (з, и); сотовой горнотехнической системой с пастовой закладкой камер и закладкой породами или отходами горного производства (к–н); 0–350 — микродеформации  $\varepsilon_{\mu}$

Условия применения систем подземной разработки рудных месторождений различного класса

Система разработки	Класс	Мощность рудного тела, м	Угол падения залежи, град	Свойства		Глубина разработки, м	Сохранность поверхности
				руды	породы		
1. Этажное принудительное обрушение	Система разработки с обрушением руды и вмещающих пород	10–15 > 15	> 50 0–90	I, II	I, II	До 700	Не сохраняется
2. Подэтажное обрушение	Система разработки с обрушением руды и вмещающих пород	3–7 > 7	> 50 0–90	I, II, III	I, II, III	До 700	Не сохраняется
3. Камерная с оставлением целиков без закладки камер (каменная соль)	С естественным поддержанием очистного пространства	2–15 > 15	> 50 0–90	I	I	До 600	Сохраняется
4. Камерная с последующей закладкой камер	С искусственным поддержанием очистного пространства	2–15 > 15	> 50 0–90	I	I	Не огр.	Сохраняется
5. Горизонтальные слои с закладкой	С искусственным поддержанием очистного пространства	1.2–6 > 15	> 50 0–90	I, II, III	I, II, III	Не огр.	Сохраняется
6. Камерно-столбовая	С естественным поддержанием очистного пространства	1.5–18	0–30	I	I	До 600	Не сохраняется
7. Сотовая горно-техническая система с закладкой и без закладки камер (отношение пустот к каркасу 75/25 %)	С естественным и искусственным поддержанием очистного пространства	> 15 > 30 (проводятся исследования)	0–15 > 50 (проводятся исследования)	I	I, II	Проводятся исследования до 1000	Сохраняется
8. Каркасная горнотехническая система с закладкой камер	С искусственным поддержанием очистного пространства	> 10 (проводятся исследования)	0–90 (проводятся исследования)	I, II, III	I, II, III	Не огр.	Сохраняется

Примечание. I — устойчивые, II — среднеустойчивые, III — неустойчивые

Из рис. 2 видно, что главную роль в формировании конфигурации и размеров зон растягивающих деформаций, а также в распределении значений микродеформаций  $\varepsilon_\mu$  в массиве играют форма и линейные размеры техногенных неоднородностей очистных выработок. В этой связи для количественной оценки изменения исходного поля напряжений в процессе ведения добычных работ предложен новый показатель — коэффициент влияния  $E_M$ , который определяется через соотношение геометрических параметров взаимодействующих элементов:

$$E_M = \frac{S_{\text{ср}}}{S_{\varepsilon\mu}} K_K, \quad (1)$$

где  $S_{\text{ср}}$  — площадь внешнего контура горной конструкции (конструктивных элементов) рассматриваемой системы разработки,  $\text{м}^2$ ;  $S_{\varepsilon\mu}$  — площадь внешнего контура сформированной в скальном массиве зоны растягивающих деформаций со значениями  $\varepsilon_\mu = \varepsilon_\mu^k$  на ее границе;  $K_K$  — коэффициент калибровки.

Анализ изменения исходного поля напряжений можно проводить не только по оценке площадей контуров объемных структур, но и по параметрам конструктивных элементов в сечении системы разработки (плоский случай). Тогда расчетная формула будет выглядеть следующим образом:

$$E_{\text{мр}} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\varepsilon\mu}} K_K, \quad (2)$$

здесь  $E_{\text{мр}}$  — локальный коэффициент влияния;  $P_{\text{ср}}$  — внешний граничный периметр горной конструкции в сечении системы разработки,  $\text{м}$ ;  $P_{\varepsilon\mu}$  — периметр сформированной в скальном массиве зоны растягивающих деформаций со значениями  $\varepsilon_\mu = \varepsilon_\mu^k$  на ее границе.

Следует отметить, что локальный коэффициент влияния  $E_{\text{мр}}$  может быть как больше, так и меньше коэффициента влияния  $E_M$ , поскольку зона растягивающих деформаций в различных сечениях (разрезах) системы распределяется неравнозначно.

В расчетные формулы (1), (2) введен коэффициент  $K_K$ , необходимый для калибровки численных моделей и значений микродеформаций  $\varepsilon_\mu$ , полученных на основе численного и физического моделирования. Модели калибруются с учетом экспериментальных исследований, проведенных в натуральных условиях на рудниках с применением различных методов контроля НДС массива горных пород (керновое бурение, реперные станции, исследование скважин с помощью технического эндоскопа, сканера Televiewer или вращающейся моторизированной камеры с двойным обзором и др.). Если площади внешнего контура сформированной в массиве зоны растягивающих деформаций со значениями  $\varepsilon_\mu > \varepsilon_\mu^k$  ( $S_{\varepsilon\mu}$ ) и внешнего контура горной конструкции  $S_{\text{ср}}$  определены в шахтных условиях, то  $K_K = 1$ . Если  $S_{\varepsilon\mu}$  и  $S_{\text{ср}}$  рассчитываются по результатам моделирования, то  $K_K = 0.2-0.9$  при завышенных прочностных характеристиках скального массива и  $K_K = 1.1-1.8$  при заниженных.

Техногенно измененный участок недр – это часть литосферы, в пределах которой исходное поле напряжений изменяется в результате добычи полезного ископаемого. Объем рассматриваемого участка в скальных массивах определяется границей зоны растягивающих деформаций со значениями  $\varepsilon_\mu = \varepsilon_\mu^k$ . На размеры формирующихся зон существенное влияние оказывают глубина горных работ, качество породного массива и способ отбойки горных пород (в том числе буровзрывной). Исследование влияния геометрических параметров очистных работ на изменение исходного поля напряжений с помощью коэффициента влияния выполнялось для различных категорий устойчивости и нарушенности массива при ведении горных работ на глубинах 300–1500 м.



Для условий нисходящей отработки крутопадающих рудных тел железорудных месторождений Западной Сибири установлены закономерности формирования зон концентрации напряжений и динамических явлений в массиве в районе обрабатываемого этажа в зависимости от мощности рудного тела и свойств горных пород в условиях применения систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород [7, 29, 30]. При увеличении высоты выработанного пространства зона максимальных напряжений смещается к его днищу с ростом бокового отпора и коэффициента концентрации горизонтальных напряжений, изменяющегося при различных соотношениях протяженности и высоты обрабатываемого массива. С развитием фронта ведения очистных работ в центральной части рудных участков происходит последовательное движение зон концентрации динамических явлений от центра к флангам участка с увеличением суммарной сейсмической энергии толчков в этих зонах. Результаты экспериментальных исследований и численных расчетов микродеформаций позволяют утверждать, что в массивах с гравитационно-тектоническим исходным полем напряжений впереди фронта ведения очистных работ или выработки формируется зона растягивающих деформаций. При микродеформациях  $\varepsilon_{\mu} > \varepsilon_{\mu}^k$  массив начинает интенсивно разрушаться. В зонах растягивающих деформаций при разработке удароопасных участков регистрируется большое количество толчков и происходят горные удары.

На основе проведенных экспериментальных исследований в шахтных условиях, численного и физического моделирования, калибровки разработанных численных моделей построена диаграмма влияния на степень изменения исходного поля напряжений (рис. 3) геометрических параметров очистных выработок существующих и разрабатываемых природоподобных систем подземной разработки рудных месторождений [1–4, 22–24]. Для каждой системы разработки построена интерполяционная функция коэффициента влияния, отражающая преимущественное отнесение массива к определенным категориям устойчивости.

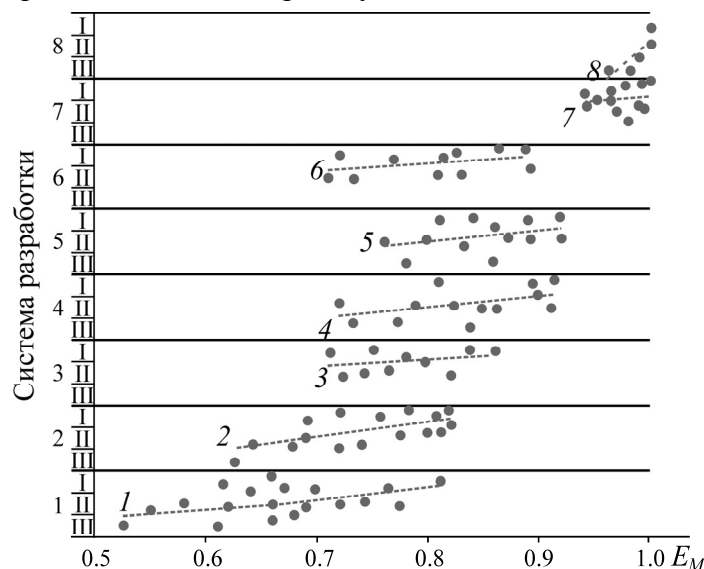


Рис. 3. Диаграмма влияния геометрических параметров очистных выработок на степень изменения исходного поля напряжений: 1–8 — системы подземной разработки рудных месторождений (таблица); I–III — категории устойчивости массива: I — устойчивые, II — среднеустойчивые, III — неустойчивые

Точки на диаграмме (рис. 3) показывают результаты экспериментальных измерений границ зон растягивающих деформаций или численных расчетов для условий разработки участков месторождений системами различного класса, в том числе проектируемых. Условия применения систем разработки в массивах определялись на основе качественной оценки категорий устойчивости массива I–III и количественной оценки по системе Бартона (индексу  $Q = 40–1000$  соответствует I категория устойчивости;  $Q = 4–40$  — II категория;  $Q = 0.1–4.0$  — III категория). Категория IV ( $Q = 0.001–0.1$ ) не рассматривалась, так как данные условия в работе не оценивались. Значения коэффициента влияния, представленные на рис. 3 для систем разработки 1–6, получены по результатам численного моделирования и по данным экспериментальных исследований, проводимых в шахтных условиях в течение 20 лет. Для новых систем разработки 7 и 8 коэффициенты влияния  $E_M$  определялись по результатам численного и физического моделирования, а также по оценке устойчивости некоторых элементов конструкции, встречающихся в традиционных системах (например, восстающих выработок). В настоящее время для освоения двух месторождений в Российской Федерации при проектировании используются параметры системы разработки 7. Рассматривается два конструктивных варианта системы разработки 7: отработка камер снизу вверх с применением механизированных комплексов Robbins или Rhino; отработка камер сверху вниз с применением механизированного устройства, расширяющего пилотную скважину (разработка ИГД СО РАН) и перепуском через нее полезного ископаемого.

Одна из основных особенностей строения массивов горных пород в литосфере — наличие динамических структур. Техногенные воздействия и деформационные процессы приводят к активизации динамических структур определенных размеров. Кардинальное решение проблемы устойчивости массивов горных пород при техногенном изменении состояния литосферы может быть обеспечено за счет воспроизведения естественных динамических структур [5]. Предлагаемый коэффициент влияния, как мера оценки общей устойчивости горнотехнической системы разработки месторождения, должен стремиться к 1; в этом случае обеспечивается безопасность и экологичность горных работ, оказывается минимальное воздействие на разрабатываемые участки литосферы Земли.

Следует отметить, что  $E_M$  не может быть больше 1, так как во вмещающую горнотехническую систему массиве всегда формируются зоны растягивающих деформаций. Установлено, что в условиях применения систем с этажно-принудительным обрушением руды и поэтажным обрушением  $E_M$  изменяется в пределах 0.53–0.81 и 0.62–0.82 соответственно для рассматриваемых категорий устойчивости массива I–III согласно классификации, используемой в РФ (рис. 3). Для камерных систем без закладки в пределах 0.71–0.86, с закладкой камер 0.72–0.92 (категории устойчивости массива I–III). Для системы отработки горизонтальными слоями с пастовой закладкой границы изменения  $E_M$  0.76–0.91 (категории устойчивости массива I и II). Для камерно-столбовых систем — 0.72–0.89 (категории устойчивости массива I и II). В условиях применения разрабатываемых природоподобных горных конструкций — сотовой и каркасной, коэффициент влияния изменяется от 0.94 до 1.0 и от 0.96 до 1.0 соответственно (категории устойчивости массива I–III).

## ВЫВОДЫ

Предложен новый показатель — коэффициент влияния  $E_M$ , отражающий степень изменения исходного поля напряжений при ведении горных работ. Его введение позволило установить, что наибольшее влияние на объемы формируемых зон растягивающих деформаций имеют системы с обрушением руды и вмещающих пород. Системы разработки с закладкой выработанного про-

странства оказывают меньшее влияние на состояние вмещающего массива по сравнению с аналогичными или схожими системами без закладки. Наилучшие показатели  $E_M = 1$  получены для разрабатываемой природоподобной каркасной системы, которую рекомендуется внедрять в сложных горно-геологических условиях разработки мощных и средней мощности месторождений. Для сотовой горной конструкции, проектирующейся в настоящее время для условий отработки месторождений каменной соли и полигалитов, также установлены положительные характеристики устойчивости системы и влияния ее на вмещающий массив.

В работе принимали участие сотрудники научно-исследовательского центра “Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии” Горного института НИТУ “МИСиС” Н. Г. Высотин, А. М. Янбеков, Ч. В. Хажылай, А. Р. Умаров, В. И. Лейзер.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агошков М. И.** Конструирование и расчеты систем и технологии разработки рудных месторождений. — М.: Наука, 1965. — 220 с.
2. **Новая технология** и системы подземной разработки рудных месторождений: к 60-летию со дня рождения чл.-корр. АН СССР М. И. Агошкова. — М.: Наука, 1965. — 235 с.
3. **Именитов В. Р.** Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений: учеб. пособие. — М.: Недра, 1984. — 504 с.
4. **Зубов В. П.** Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых // Горн. журн. — 2018. — № 6 — С. 77–83.
5. **Родионов В. Н.** Очерк геомеханика. — М.: Науч. мир, 1996. — 126 с.
6. **Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М.** Основы геомеханики. — М.: Недра, 1986. — 286 с.
7. **Курленя М. В., Серяков В. М., Еременко А. А.** Техногенные геомеханические поля напряжений. — Новосибирск: Наука, 2005. — 264 с.
8. **Борщ-Компонец В. И.** Практическая геомеханика горных пород. — М.: Горн. книга, 2013. — 322 с.
9. **Kurlenya M. V., Mirenkov V. E., and Krasnovsky A. A.** Stress state of rocks surrounding excavations under variable Young's modulus, J. of Min. Sci., 2015, Vol. 51, No. 5. — С. 937–943.
10. **Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В.** Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений // Горн. журн. — 2020. — № 1. — С. 49–52.
11. **Sidorov Dmitry and Ponomarenko T.** (2019). Reduction of the Ore Losses Emerging within the Deep Mining of Bauxite Deposits at the Mines of OJSC “Sevuralboksitruda”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Sci. 302. 012051. 10.1088/1755-1315/302/1/012051.
12. **Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В., Ларичкин Ф. Д., Воробьев А. Г.** Экономическое обоснование инновационных решений по снижению потерь сырья в алюминиевой отрасли России // Горн. журн. — 2018. — № 6. — С. 65–68.
13. **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.
14. **Рыбин В. В., Константинов К. Н., Каган М. М., Панасенко И. Г.** Принципы организации комплексной системы мониторинга устойчивости объектов горнодобывающего предприятия // Горн. журн. — 2020. — № 1. — С. 53–57.

15. **Протосеня А. Г., Вербило П. Э.** Оценка прочности блочного массива методом численного моделирования // Изв. вузов. Горн. журн. — 2016. — № 4 — С. 47–54.
16. **Map3D.** Available at: <http://www.vap3d.com/>
17. **Hoek E. and Brown E. T.** Underground excavations in rock, London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
18. **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, in Proc. 1st Congr. of the Int. Soc. for Rock Mech., Lisbon, Sept. 25 — Oct. 1, 1966, Vol. 1. — P. 687–692.
19. **Jiang Q., Feng X., Song L., Gong Y., Zheg H., and Cui J.** Modeling rockspecimens through 3D printing: Tentative experiments and prospects, Acta Mech. Sinica, 2015, Vol. 32(1). — P. 524–535.
20. **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. — P. 1–8.
21. **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 Mech. and Rock Eng., 2019, No. 3. — P. 1–13.
22. **Trubetskiy K. N. and Galchenko J. P.** Nature like mining technologies: Prospect of resolving global contradictions when developing mineral resources of the lithosphere, Herald of the Russian Academy of Sci., 2019, Vol. 87, No. 4. — P. 378–384.
23. **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 // Горн. журн. — 2019. — № 5. — С. 6–13.
24. **Галченко Ю. П., Еременко В. А., Косырева М. А., Высотин Н. Г.** Исследование особенностей формирования вторичного поля напряжений при техногенном изменении недр в процессе подземной разработки месторождений, Eurasian Min. — 2020. — No. 1. — С. 3–7.
25. **Stacey T. R.** A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock, Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci., 1981, Vol. 18. — P. 469–474.
26. **Ndlovu X. and Stacey T.R.** Observations and analyses of roof guttering in a coal mine, J. of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2007, Vol. 107. — P. 477–491.
27. **Лушников В. Н., Сэнди М. П., Еременко В. А., Коваленко А. А., Иванов И. А.** Методика определения зоны распространения повреждения породного массива вокруг горных выработок и камер с помощью численного моделирования // Горн. журн. — 2013. — № 12. — С. 11–16.
28. **Barton N.** Application of Q-System and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses, Workshop on Norwegian Method of Tunneling, New Delhi, 1993. — P. 66–84.
29. **Еременко В. А.** Обоснование параметров геотехнологии освоения удароопасных железорудных месторождений Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — 2011. — 333 с.
30. **Еременко А. А., Конурич А. И., Штирц В. А., Приб В. В.** Выявление зон повышенного горного давления на удароопасном железорудном месторождении // Горн. журн. — 2020. — № 1. — С. 78–81.

*Поступила в редакцию 28/IV 2020*

*После доработки 10/V 2020*

*Принята к публикации 29/V 2020*