

УДК 622.833.5

Балек Александр Евгеньевич

доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
лаборатории геомеханики
подземных сооружений,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: balek@igduran.ru

**ЯВЛЕНИЕ САМООРГАНИЗАЦИИ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ
МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД И ЕГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ РЕШЕНИИ
ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ***

DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.090

Balek Alexander E.

Doctor of technical sciences,
leading researcher,
the Institute of Mining UB RAS,
620075, Yekaterinburg,
58, Mamin-Sibiryak st.
e-mail: balek@igduran.ru

**THE PHENOMENON OF ROCK MASSES
DEFORMATION FIELDS
SELF-ORGANIZATION AND
ITS APPLICATION IN GEOMECHANICS**

Аннотация:

По результатам натурных исследований выявлены условия возникновения в массивах горных пород процессов самоорганизации, проявляющихся в объединении структурных породных блоков в относительно крупные объемы, которые способны сохранять целостность и свойства сплошной среды в течение длительного времени (сопоставимого со сроком эксплуатации большинства объектов недропользования, т. е. порядка десятков лет). Установлены эмпирические закономерности, связывающие параметры этого явления с параметрами подземной геотехнологии и решениями задач геомеханики в упругой постановке.

Ключевые слова: массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, структурное строение, иерархическая блочность, современные геодинамические движения, натурные исследования

Abstract:

According to the results of in-situ researches the conditions of self-organization processes emergence in the rock masses are revealed. The processes are manifested in rock blocks structural unification into relatively large volumes, which are able to maintain the integrity and properties of the continuous medium for a long time (the time is comparable to the most mining objects operation that is about several tens of years). The empirical regularities, that link the parameters of this phenomenon with the parameters of the underground geo-technology and decisions of geo-mechanics problems in elastic formulation, have been set.

Key words: rock mass, stressed-deformed state, structural composition, hierarchical modularity, modern geodynamic motions, in-situ researches.

Блочно-иерархическая структура массивов скальных горных пород предопределяет дискретный характер распределения напряжений и деформаций. При деформировании больших объемов скальных породных массивов существенную роль начинают играть взаимные перемещения структурных породных блоков, от которых во многом зависит устойчивость горных выработок. Недостаточная изученность закономерностей этих процессов зачастую оборачивается крупными аварийными нарушениями ответственных горных выработок. Особую актуальность проблема приобретает с ростом горного давления при углублении горных работ.

Как правило, при решении задач геомеханики используют расчетные схемы, отображающие поведение скального массива геомеханическими моделями сплошной упругой изотропной среды, где взаимные подвижки структурных породных блоков не учитываются. Однако при углублении горных работ с ростом напряженного состояния эти подвижки становятся значимым фактором, и результаты расчетов существенным образом начинают расходиться с реальностью. Применение же дискретных геомеханических

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-05-00324-а)

моделей, отображающих динамику структурных неоднородностей конкретных участков горного массива, сопряжено со сложностью задания граничных условий для всего того множества структурных блоков и их иерархий, которые вовлекаются во взаимные перемещения. Это делает проблематичным практическую реализацию дискретных моделей.

Для решения проблемы предлагается новый подход, использующий явление диссипативного структурирования дискретных массивов и сред при пластических деформациях. Имеются в виду процессы самоорганизации деформационного поля, проявляющиеся в объединении подвижных структурных элементов деформируемой среды во временно стабильные объемы, которые выделяются по их относительно согласованным совместным подвижкам. Вследствие этого в хаос разнонаправленных и разномасштабных взаимных перемещений структурных элементов вносится определенная трендовая упорядоченность, и такой самоорганизовавшийся и относительно стабильный породный объем уже вполне можно рассматривать как сплошную среду. Ранее такие процессы выявляли на малых пространственно-временных масштабах: при деформировании образцов различных твердых материалов [1], сыпучих сред [2], при кратковременных (взрывных и вибрационных) воздействиях на скальный горный массив [3, 4] и пр.

Натурными исследованиями Института горного дела УрО РАН процессы диссипативного структурирования впервые экспериментально зафиксированы в массивах скальных горных пород на больших пространственно-временных базах деформирования, соответствующих масштабам ведения горных работ: от десятков – сотен метров до первых километров за интервалы времени от нескольких недель до первых десятков лет. Основное условие возникновения в массивах скальных горных пород относительно стабильных объемов, сохраняющих свойства сплошной среды, было выявлено путем сопоставления результатов натурных замеров деформаций породных массивов, проводившихся на протяжении 30 лет на шахтах Урала и Казахстана, с результатами математического моделирования напряженно-деформированного состояния исследуемых участков как упругой изотропной среды.

Установлено, что такие структуры формируются в тех областях массива, где в процессе перераспределения первоначальных напряжений направление изменения (иначе говоря, временной градиент) углов разворота главных осей тензора этих напряжений меняется на противоположное. Размеры самоорганизующихся структур не превышают ширины этой области. Вне ее массив дезинтегрируется в соответствии с теорией прочности Кулона – Мора и деформируется в форме разнонаправленных хаотичных подвижек структурных породных блоков различных рангов по разномасштабным междублоковым нарушениям.

Положение подтверждено качественно различным распределением деформаций в областях с массовой сменой знака перед временным градиентом приращений углов разворота главных осей тензора первоначальных напряжений массива и теми областями, где смен знака не было. Натурными наблюдениями зафиксировано совпадение таких областей с местом и временем формирования зон концентрации деформаций, разделяющих массив на крупные породные объемы со свойствами сплошной среды. Распределение деформаций реперных интервалов, подтвержденных результатами сейсмо- и георадарного зондирования, совпадало с районированием массива по данному критерию как во времени, так и в пространстве. По другим же критериям такого совпадения не наблюдалось. Подробное обоснование критерия и примеры проявления процессов самоорганизации породных структур представлены в работе [5].

При этом натурными наблюдениями было выявлено совпадение зон концентрации деформаций с наиболее крупными тектоническими нарушениями, картируемыми геолого-морфологическими методами в пределах каждой такой области со сменой знака перед градиентом приращений углов. При последующих изменениях напряженного состояния основные приращения деформаций концентрируются в тех же зонах, которые, таким образом, выступают в роли каналов диссипации внешней энергии.

Это обеспечивает сохранение однажды сформировавшихся структур до новой смены знака перед временным градиентом углов. В тех областях, где таких смен знака не происходит, массив дезинтегрируется с хаотичными смещениями по площадкам сдвига самых разномасштабных иерархий, а не только по самым крупным. Источником внешней энергии для блоковых подвижек служат перераспределения напряжений окружающего массива, происходящие вследствие развития зоны обрушения.

Характерные размеры самоорганизующихся породных структур определены на основании современных концепций о параметрах структурного строения скального массива [3, 4], согласно которым усредненный линейный коэффициент, определяющий скачкообразное изменение расстояния между элементами структурной нарушенности смежных масштабных объемов массива, варьируется в диапазоне $2 \div 3$. Из такого коэффициента вложения смежных структурных иерархий следует, что ширина относительно стабильных породных объемов не может быть меньше $1/3$ ширины той области, где происходит смена знака перед временным градиентом приращений углов разворота главных осей тензора первоначальных напряжений массива. Данное положение также было подтверждено натурными наблюдениями [5].

По результатам инструментальных исследований выявлена зависимость условий самоорганизации деформационного поля от масштабов техногенного воздействия. Установлено, что при перераспределении первоначальных напряжений в окрестностях типичных для условий разработки мощных рудных залежей крупномасштабных зон обрушения (с поперечными размерами порядка 250 – 300 м и более) критерий смены знака перед временным градиентом приращений углов тензора является достаточным для любой категории устойчивости массива. При перераспределении же напряжений вокруг горизонтальных и вертикальных горных выработок (в процессе проходки) критерий применим лишь для сравнительно низкопрочных массивов четвертой и пятой категорий устойчивости.

Сопоставление результатов комплекса натуральных геомеханических и геофизических исследований с данными математического моделирования показало, что в окрестностях зон обрушения массовая смена временных градиентов углов разворота главных осей тензора первоначальных напряжений обуславливается масштабными изменениями формы зон обрушения, которые происходят при оставлении и последующей выемке целиковых участков рудной залежи. Размеры же области со сменой знака перед градиентом углов при любых первоначальных напряжениях окружающего массива определяются шириной целикового участка. На этом основании был определен параметрический критерий, связывающий процессы самоорганизации деформационного поля с параметрами подземной геотехнологии.

Критерий представляет собой отношение ширины целикового участка рудной залежи, отработка которого обуславливает возникновение в прилегающем массиве области с переменной знака перед временным градиентом приращений углов осей тензора, к расстоянию между наиболее крупными структурными нарушениями массива, выделяемыми в пределах данной области. Ширина стабильных структур, таким образом, составляет $1/3 \div 1$ от ширины целикового участка. При разработке мощных рудных залежей это обеспечивает формирование пространственно протяженных участков концентрации деформаций шириной порядка 20 – 30 м, разделяющих массив на относительно разгруженные породные объемы размерами в несколько сотен метров. В соответствии с общепризнанными критериями применимости методов механики сплошной среды, согласно которым область задания граничных условий должна по крайней мере в 3 раза превышать размеры моделируемого объекта, такие базы деформирования вполне достаточны для расчетов устойчивых параметров подземных выработок, которые могут находиться как на участках концентрации деформаций, так и между ними. Таким образом, появляется возможность использовать решения упругой задачи, вводя в модель деформирования сплошной среды корректирующие поправки, учитывающие расположение выработки.

Выявленная связь между параметрами процесса самоорганизации и минимальными размерами формирующихся структур позволяет прогнозировать размеры и границы стабильных участков массива заблаговременно, на стадии составления проекта отработки залежи.

Зависимости, связывающие решения упругой задачи с фактическим напряженно-деформированным состоянием при самоорганизации деформационного поля, определены на основании сопоставительного анализа результатов математического моделирования и данных натурных исследований. В основном были использованы данные регулярных инструментальных наблюдений за деформированием горного массива на шахте "Северопесчанская" Богословского рудоуправления, ежегодно проводившихся в течение 28 лет по 17 поверхностным и 4 подземным реперным линиям. Линии включали более 250 постоянных (забетонированных) реперов, заложенных с интервалом около 20 м в окрестностях зоны обрушения вне области гравитационного оседания горного массива, главным образом в лежащем боку рудной залежи. Общая протяженность линий составляла более 5 км.

Универсальность выявленных зависимостей обоснована типичностью геомеханических характеристик породного массива Северопесчанского месторождения (в ряду трещиноватых массивов скальных горных пород рудных месторождений), широким диапазоном горно-геологических и геомеханических условий, охваченных натурными исследованиями, и качественным совпадением с натурными данными, полученными по другим рудникам Урала и Казахстана. При этом были учтены следующие, ранее установленные в ИГД УрО РАН, положения:

1) В окрестностях крупномасштабных (с поперечными размерами более 250 - 300 м) зон обрушения, формирующихся при выемке мощных рудных залежей, напряженное состояние скального массива в целом адекватно отображается моделью деформирования сплошной среды, где в качестве граничных условий задаются горизонтальные напряжения окружающего нетронутого массива [6].

2) В скальных породных массивах на базах деформирования 20 – 30 и более метров связь между прочностными и деформационными параметрами имеет универсальный характер, не зависящий от литологических разностей [7].

Сопоставительный анализ показал, что в окрестностях крупномасштабных зон обрушения техногенные деформации массива на базах 20 – 30 и более метров соответствуют поведению сплошной упругой изотропной среды при условии введения в расчетные деформации (полученные решением упругой задачи) следующих корректирующих коэффициентов:

для пространственно протяженных зон концентрации деформаций

$$K_b = 3,0 \pm 0,3;$$

для относительно стабильных участков массива, оконтуренных этими зонами

$$K_s = 0,5 \pm 0,06.$$

Коэффициенты определены путем статистической обработки результатов по 275 точкам, отражающих горизонтальную деформацию 75 реперных интервалов подземных и поверхностных наблюдательных станций за 5 характерных этапов развития зоны обрушения шахты "Северопесчанская", выделенных на основании наиболее существенных скачкообразных изменений ее формы и размеров, происходивших в течение всех 28 лет ежегодных натурных наблюдений и замеров. Сводные результаты сопоставительного анализа представлены в прилагаемых таблице и на точечных диаграммах рисунка.

Таблица

Сопоставительная оценка расчетных ε_r и замеренных ε_f значений деформации массива в окрестностях зон обрушения рудных шахт

Параметры аппроксимирующих прямых	Количество сопоставляемых пар значений	Достоверность аппроксимации R^2 (индекс корреляции r)	Среднеквадратичное отклонение значений ε_f от аппроксимирующей прямой	Критерий Стьюдента при доверительной вероятности 0,95	Доверительный интервал значений ε_f
По участкам концентрации деформаций					
$\varepsilon_f = 3.1 \varepsilon_r$	26	0.76 (0.87)	0.777	2.06	± 0.31
По участкам со свойствами сплошной среды					
$\varepsilon_f = 0.5 \varepsilon_r$	20	0.61 (0.78)	0.119	2.09	± 0.06
По обобщенным реперным интервалам					
$\varepsilon_f = 1.1 \varepsilon_r$	16	0.91 (0.96)	0.163	2.06	± 0.08

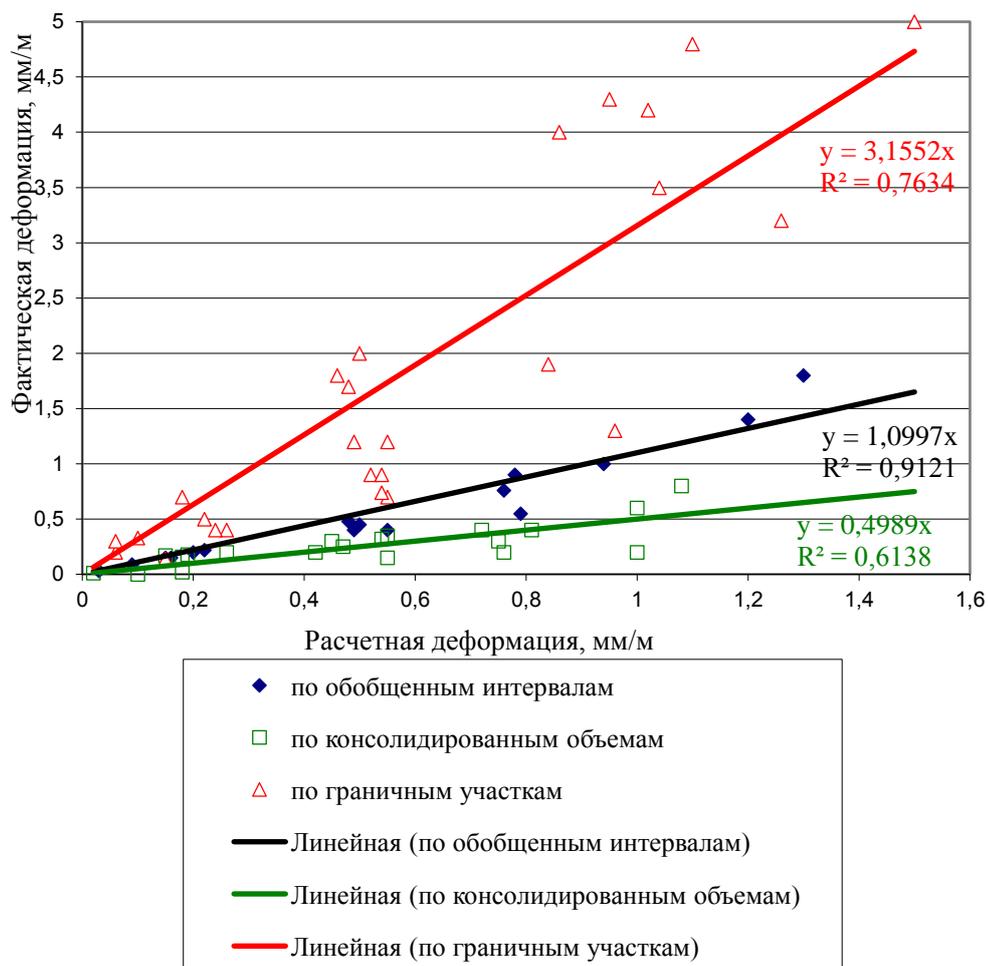


Рис. 1 – Сопоставление расчетных и замеренных деформаций горного массива в окрестностях зон обрушения

При определении корректирующих коэффициентов принято во внимание, что выявленные эмпирические зависимости не функциональные, а корреляционные, и следствием изменений факторных признаков являются лишь усредненные (трендовые) значения расчетных техногенных деформаций. Эта объективная особенность исследуемых процессов обусловлена их природной стохастичностью, препятствующей выходу на строгие функциональные зависимости, что было учтено путем введения специальной поправки на принципиально неустранимую (флуктуационную) изменчивость техногенных деформаций. Для этого выполнен ретроспективный дисперсионный анализ натуральных данных, полученных за все 28 лет ежегодных замеров горизонтальных деформаций как по этапам развития зоны, так и по местоположению консолидированных объемов.

Оказалось, что амплитуды знакопеременных "пилообразных" отклонений, относительно соответствующих трендовых кривых, при любой комбинации выборок распределяются по нормальному закону и практически (для уровня значимости 5 – 10 %) не зависят от интенсивности приращения техногенного поля деформаций, определяемого последовательностью и скоростью выемки рудной залежи и, соответственно, развития зоны обрушения. Все это позволило ограничить искомую флуктуационную поправку $\Delta \epsilon$ половиной доверительного интервала, определенного для максимального значения стандартного отклонения измеряемых техногенных деформаций – $\pm 0,3$ мм/м. В соответствии с двухсторонним критерием "отсечения" хвостов кривой нормального распределения для уровня значимости 10 % максимальная амплитуда отклонений составила 1 мм/м и, соответственно, $\Delta \epsilon = \pm 0,5$ мм/м. Уровень относительной деформации в 1 мм/м совпадает с теоретическими значениями предельной деформации скальных пород и массивов на одноосное сжатие и подтверждается данными натуральных мониторинговых замеров [6, 7]. Все это свидетельствует об универсальности выявленных зависимостей.

Таким образом, для условий дискретизации деформационного поля в окрестностях типичных крупномасштабных зон обрушения, поперечные размеры которых превышают 250 – 300 м, максимальные прогнозные значения техногенных деформаций на базах 20 – 30 и более метров определяются следующими соотношениями:

при расположении выработки в пределах области, деформирующейся как сплошная упругая изотропная среда

$$\epsilon_s = K_s \epsilon_r \pm \Delta \epsilon, \quad (1)$$

при расположении выработки на пограничном участке концентрации деформаций

$$\epsilon_b = K_b \epsilon_r \pm \Delta \epsilon, \quad (2)$$

где ϵ_s , ϵ_b – фактические значения техногенных деформаций горного массива в окрестностях зон обрушения подземных рудников, соответственно, для сохраняющих свойства сплошной среды относительно стабильных объемов массива и для пограничных участков концентрации деформаций;

ϵ_r – расчетные значения техногенных деформаций, полученные путем решения упругой задачи;

$K_s = 0,5 \pm 0,06$ – поправочный коэффициент для деформаций участков массива внутри областей со свойствами сплошной упругой изотропной среды;

$K_b = 3,0 \pm 0,3$ – поправочный коэффициент для пограничных зон концентрации деформаций;

$\Delta \epsilon = 0,5$ мм/м – поправка на принципиально неустранимую (вследствие вероятностной природы) изменчивость техногенных деформаций.

На основании выявленных закономерностей неизвестного ранее явления самоорганизации скальных массивов в Институте горного дела УрО РАН разработана новая методика задания граничных условий для расчета устойчивых параметров горных выработок при подземной разработке мощных рудных тел системами с обрушением. Главное ее отличие от известных методик заключается в том, что масштабные уровни напряженного

состояния деформируемой среды определяются не структурным строением массива, а его напряженно-деформированным состоянием на двух уровнях: в окрестностях зоны обрушения на базах в десятки – сотни метров и в окрестностях рассматриваемой подземной выработки на базах менее 20 – 30 метров. Граничные условия, определяющие напряженное состояние в окрестностях подземной выработки, складываются из первоначальных напряжений нетронутого массива и дополнительных, обусловленных влиянием зоны обрушения, которые рассчитываются с учетом самоорганизации деформационного поля путем внесения в результаты решения упругой задачи корректирующих поправок, в соответствии с выражениями (1) и (2).

На базе данной методики разработан новый метод управления напряженно-деформированным состоянием горных массивов при подземной разработке рудных месторождений, использующий процессы самоорганизации деформационного поля в окрестностях зон обрушения. Регулирование последовательности развития зон обрушения путем целенаправленного (с учетом первоначального напряженного состояния и структурного строения окружающего породного массива) оставления и последующей выемки целиковых участков рудных залежей позволяет избегать пересечения горных выработок зонами концентрации деформаций и обеспечить нахождение наиболее ответственных выработок в пределах относительно стабильных и разгруженных областей, где массив ведет себя как сплошная упругая изотропная среда.

Литература

1. Панин Е.И. Структурные уровни деформации твердых тел / Е.И. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. - Новосибирск: Наука, 1985. - 247 с.
2. Ревуженко А.Ф. О механизме деформирования сыпучего материала при больших сдвигах / А.Ф. Ревуженко, С.Б. Стажевский, Е.И. Шемякин // ФТПРПИ. – 1974.- № 3. - С. 130 – 133.
3. Курленя М.В. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 1 / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ. - 1999. - № 3.- С. 12 - 26.
4. Курленя М.В. Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. 2 / М.В. Курленя, В.Н. Опарин // ФТПРПИ.- 2000. - № 4. - С. 3 - 26.
5. Балек А.Е. Процессы самоорганизации в иерархически блочной геомеханической среде при техногенном воздействии / А. Е. Балек, А.Л. Замятин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2006. - № 7. - С. 145 - 153.
6. Сашурин А.Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии / А.Д. Сашурин. - Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. – 268 с.
7. Шуплецов Ю.П. Прочность и деформируемость скальных массивов / Ю.П. Шуплецов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 195 с.