

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ КОМПЛЕКСНОГО
ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ
ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ МАСШТАБНЫХ
ЭФФЕКТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И ИХ КЛАСТЕРНО-
ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

Приведено теоретичні передумови комплексного геофізичного моніторингу стану геотехнічних систем з урахуванням масштабних ефектів в гірських породах та їх кластерно-ієрархічної структури.

**THEORETICAL PREMISES OF COMPLEX GEOPHYSICAL
MONITORING OF A GEOMECHANICAL STATE OF GEOTECHNICAL
SYSTEMS WITH THE ACCOUNT OF THE SCALE EFFECTS IN THE
ROCKS AND ITS CLUSTER-HIERARCHICAL STRUCTURE**

Theoretical premises of complex geophysical monitoring of a geomechanical state of geotechnical systems with the account of the scale effects in the rocks and its cluster-hierarchical structure are described.

Массивы горных пород в приповерхностной части земной коры, т.е. в сфере наиболее интенсивной инженерной деятельности человека, представляют собой, как правило, сложные, дискретные, неоднородные, анизотропные и трещиноватые среды, характеризующиеся определенным уровнем естественных (гравитационных и тектонических) напряжений [1,2 и др.]. Одной из особенностей таких сред является различие показателей механических и физических свойств, а также неоднородности и анизотропности, их напряженного состояния, для разновеликих структурных элементов, т.е. для геоструктурных блоков различных масштабных уровней, которые можно охарактеризовать средним объемом W_i .

Проявление зависимости среднего значения какого-либо параметра A^* свойств или состояния среды от величины W_i . (или $l_i = \sqrt[3]{W_i}$) обычно называют масштабным эффектом по отношению к A^* . Имеются примеры подобных зависимостей для модулей упругости E и деформации D , характеристик прочности R^* , скоростей упругих волн V , а также ряда других показателей [3]. Эти примеры свидетельствуют о том, что во многих случаях зависимости основных показателей свойств и состояния, прежде всего, скальных массивов от величины W_i или l_i могут быть значительными, вследствие этого результаты экспериментальных определений, полученные в ограниченном диапазоне $W_i(l_i)$, нельзя прямо использовать для характеристики массива объемом W_0 , "работающего", например, под сооружением (если $W_0 \gg W_i$).

На указанное обстоятельство в последние годы обращают все большее внимание [4], однако сделано пока еще мало. Объясняется это тем, что определение физико-механических свойств пород в условиях их естественного залегания в широком диапазоне объемов – технически сложная задача, которая не всегда

может быть решена существующими методами механики горных пород. Более перспективны способы ее решения с помощью так называемых “косвенных” и, в первую очередь, сейсмоакустических и сейсмических методов. Это направление довольно успешно развивалось и в прежние годы [3,5]. Получены определенные практические результаты, которые позволяют не только объективно оценить возможности “косвенных” методов, но и сделать общие выводы о характере и интенсивности масштабных эффектов в различных природных условиях. В этой связи для их диагностики и контроля перспективными являются геофизические методы.

Теоретические и экспериментальные исследования в геомеханике свидетельствуют о том, что хотя масштабные эффекты и связаны с неоднородностью строения свойств и состояния реальных геологических сред [6,7], однако эта неоднородность по-разному проявляется для аддитивных и неаддитивных показателей свойств и состояния, т. е. для характеристик, подчиняющихся или не подчиняющихся условию

$$\bar{A}_{W_0} = \frac{\sum_{k=1}^n A_{W_k}}{n}, \quad (1)$$

где \bar{A}_{W_0} – среднее значение параметра A^* в объеме W_0 ; A_{W_k} – частное значение параметра A^* в объеме $W_k = W_0/n$; n – число определений.

Примером аддитивных характеристик служат в основном показатели плотности, пористости, водопроницаемости, неаддитивных – модули упругости и деформации, показатели прочности и др. Для аддитивных показателей неоднородность массивов при выборочном характере опробования обуславливает возможность пропуска менее распространенных пород. Природа масштабных эффектов здесь носит чисто вероятностный или статистический характер [5].

Различие средних значений неаддитивных показателей в объемах W_i разного масштаба наряду с указанной выше причиной определяется также и их физической природой. Поэтому хотя причина одна и та же, однако природа масштабных эффектов для аддитивных и неаддитивных показателей различна, и это предопределяет специфику их изучения. Наибольший практический интерес представляют масштабные эффекты для неаддитивных параметров среды, которые рассматриваются в работе [8]. Прежде, чем перейти к методике изучения, целесообразно представить общую схему возможных масштабных эффектов и явлений, с которыми встречаются в механике горных пород.

Вариант такой схемы, исходя из физической сущности рассматриваемых явлений, представлен на рис. 1. Выделено три группы эффектов, которые связываются с показателями свойств среды, характеристиками ее состояния и происходящими процессами. Первая группа эффектов непосредственно определяется особенностями строения и свойствами среды, частичное влияние на нее оказывают и характеристики состояния массивов пород [8]. Вторая группа

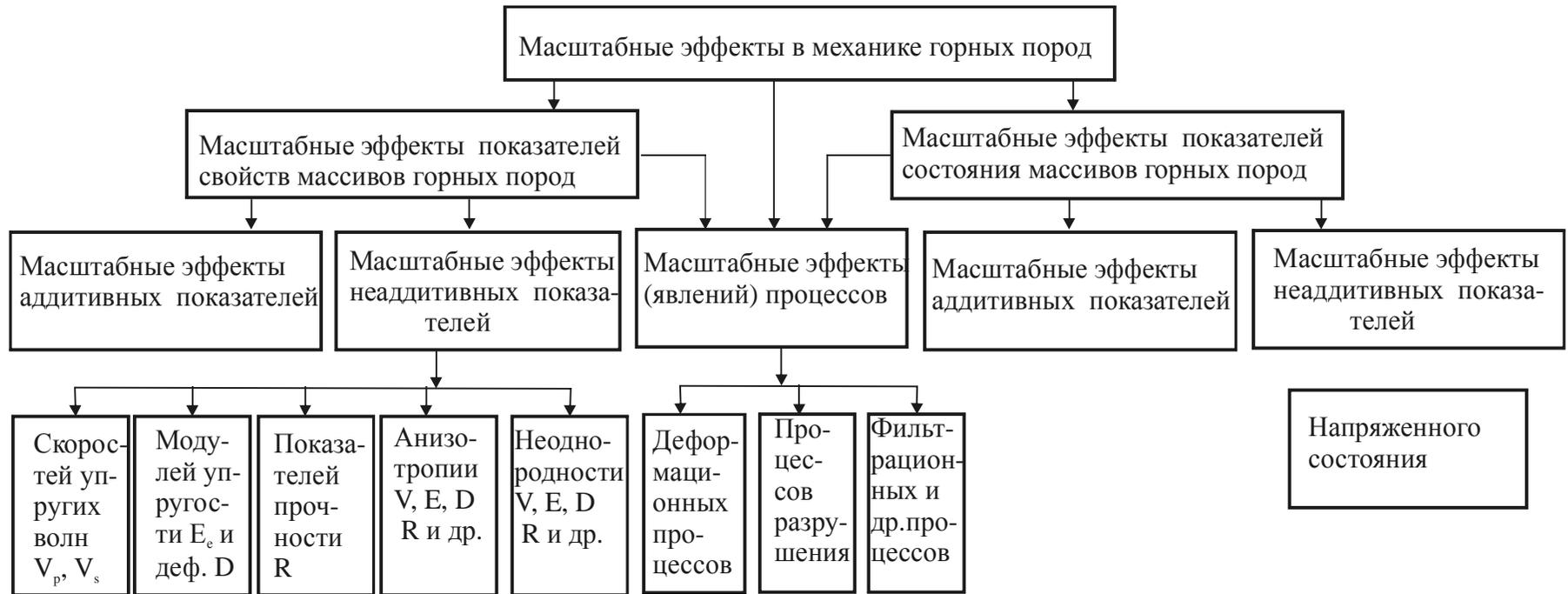


Рис. 1 – Схема масштабных эффектов в механике горных пород

определяется спецификой состояния исследуемых массивов, однако, в свою очередь, значительно зависит и от показателей их свойств и строения. Масштабные эффекты процессов, происходящих в массиве, полностью определяются параметрами первых групп, следовательно, эти эффекты в какой-то мере являются производными.

Развиваемые и используемые авторами методы изучения масштабных эффектов всех групп базируются на способах определения скоростей упругих волн (продольных V_p и поперечных V_s) для различных баз l_i и объемов породы W_i , их спектральных характеристик. Эти способы, использующие упругие колебания различных диапазонов частот (сейсмического, акустического и ультразвукового), в настоящее время отработаны и изложены в целом ряде специальных публикаций [8-14]. Величина объема породы, определяющего эффективные скорости упругих волн, оценивается на основании следующего выражения:

$$W_i = \pi l_i (a' \Lambda_i)^2, \quad (2)$$

где l_i – база измерения скоростей упругих волн; Λ_i – длина волны колебаний с частотой f_i , $\Lambda_i = V_i f_i^{-1}$; a' – глубина захвата упругих волн, в соответствии с выводами работы [15] принимается, что $a' \approx 0,25$; V_i – скорость упругих волн.

Следовательно

$$W_i \approx 0,2 l_i \Lambda_i^2. \quad (3)$$

Специфика изучения масштабных эффектов различных групп состоит в том, что наряду с совокупностью значений V_{Wi} используются:

в первой группе – корреляционные соотношения между величинами V_p (V_s) и основными показателями физико-механических свойств массива (величинами E_c , D , κ^* и т.д.);

во второй группе – специальные методы определения состояний пород в массиве;

в третьей – временные вариации скоростей упругих волн [10-14].

Изменения физико-механических свойств и состояния пород на разных масштабных уровнях отражается и в динамике происходящих в массиве деформационных процессов: деформационные процессы в мелких структурных элементах значительно слабее, чем в крупных. Наряду с изменением средних показателей свойств среды на разных масштабных уровнях происходит изменение степени и характера ее анизотропии, а также изменение напряженного состояния горных пород. Средний уровень напряжений в мелких блоках выше, чем в более крупных структурных элементах.

Переход от свойств пород в образце к свойствам массива на том же масштабном уровне предусматривает введение поправок, учитывающих различное состояние горных пород в образце и в условиях естественного залегания. Это различие прежде обуславливается трещиноватостью, обводненностью, напряженным состоянием, температурным режимом, газонасыщенностью и др. Среди всех этих факторов ведущая роль принадлежит трещиноватости и связанной с ней обводненностью массива, а также напряженному состоянию.

На основе анализа литературных источников и результатов собственных исследований предложено рассматривать горные породы как геоматериал кластерно-иерархической структуры, а структуризацию геотехнических систем – как иерархию естественных структур различных порядков, начиная от самых малых до самых больших (субмикроструктура, микроструктура, мезоструктура, макро-структура, блочно-иерархическое строение массива, слоистость), процесс разрушения которых происходит многостадийно после достижения пороговой концентрации микротрещин. Информация о напряженно-деформированном состоянии горных пород массива дает фундаментальное представление о важнейших геологических процессах, протекающих в земной коре как на глобальном (движение литосферных плит), так и на региональном и локальном уровнях (формирование складок, разрывов, возникновение землетрясений), а также об образовании и размещении полезных ископаемых.

С целью изучения возможностей акустических методов для диагностики напряженного состояния массива горных пород с учетом их кластерно-иерархического строения рассмотрено в первом приближении распространение акустических волн в слоистой пористой (или трещиноватой) среде с учетом ее физической и геометрической нелинейности. Для этого в уравнения, полученные нами для скоростей распространения и коэффициентов затухания акустических волн, которые получены авторами в [11], с учетом разработанной в статье [15] физической модели кластерного строения породного массива модули упругости λ_i для трансверсально-изотропной среды заменим на

$$\lambda_i^* = \frac{2\Delta U_i}{21,21R_i^3 \varepsilon_i^2}, \quad (4)$$

где ΔU_i – разности потенциальной энергии связи в горных породах при сжатии на относительные величины ε_i ; R_i – расстояние между кластерами.

Анализ полученных уравнений позволяет сделать вывод, что на изменение скоростей и коэффициентов затухания продольных волн оказывают влияние напряжения лишь в направлении их распространения, а на изменение скоростей и коэффициентов затухания поперечных волн влияют также и напряжения в направлении поляризации, что подтверждают и результаты экспериментальных исследований.

С увеличением напряжений скорости акустических волн возрастают, а коэффициенты поглощения уменьшаются, причем коэффициенты поглощения больше зависят от частоты и расстояния между кластерами. Характер влияния трещиноватости на акустические параметры среды имеет противоположный характер. Эти выводы подтверждены экспериментально.

Развитие деформационных процессов в породном массиве в камерных выработках больших пролетов, их сопряжениях, а также в лавах сопровождается формированием блочных и балочных конструкций, консолей и плит разных размеров и с различными условиями их защемления. В связи с этим с целью теоретического обоснования применения виброакустического метода для опе-

ративного контроля состояния горных выработок, а также выявления наиболее информативных параметров метода рассмотрим удар какого-либо тела, например шара, о прямоугольную плиту со сторонами a^* , b , толщиной d и различными условиями закрепления плиты. Воспользовавшись приближенной теорией и рядом допущений о недеформируемости при изгибе срединной части плиты из уравнения равновесия [16], получим следующие значения амплитуды и частоты колебаний кровли горных пород, которые моделируем в виде плиты:

$$\begin{aligned}\omega_i &= \alpha_i V_p d \sqrt{\beta_i}; \\ A_{cmi}^{\max} &= \frac{\gamma_i}{V_p^2 \beta_i d^2},\end{aligned}\quad (5)$$

где V_p – скорость распространения продольной волны; α_i , γ_i , β_i – коэффициенты формы отслоения в кровле, зависящие от условий закрепления отслоений.

Подставляя в уравнение (5) выражение для скорости распространения продольной упругой волны в напряженных горных породах без учета вязких свойств среды, получим зависимость частоты и амплитуды колебаний кровли горных выработок от величины начальных механических напряжений в массиве

$$\begin{aligned}\omega_i &= \alpha_i V_p^0 d \sqrt{A \beta_i \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K_i}\right)}; \\ A_{cmi}^{\max} &= \frac{\gamma_i}{V_p^{02} d^2 A \beta_i \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K_i}\right)},\end{aligned}\quad (6)$$

где A – акустический коэффициент трещиноватости; σ_{zz}^0 – компоненты начальных напряжений; K_i – модули всестороннего сжатия.

Кластерное строение породного массива учитывается заменой в формулах (6) модуля сдвига K_i на K_i^*

$$K_i^* = \frac{2\Delta U_i}{66,63 R_i^3 \varepsilon_i^2 (1 - 2\nu_i)}. \quad (7)$$

Необходимую информацию о состоянии исследуемой литосферы (грунтов и породного массива) без нарушения ее сплошности позволяют получить и электрометрические методы, основанные на известном явлении изменения электропроводности среды от изменения влажности, степени трещиноватости, пористости, а также величины приложенной нагрузки. Известно, что при получении информации о состоянии исследуемого объекта применяют как искусственные, так и естественные электрические поля. И тот и другой методы достаточно хорошо работают в тех или иных условиях.

Для многослойной среды, состоящей из трехслойных пачек, которые имеют толщины h_1, h_2, h_1 , а удельные электрические сопротивления – $\rho_1^*, \rho_2^*, \rho_1^*$, при условии, если влажность пород не слишком велика, получим следующие выражения для определения удельного электрического сопротивления многослойной среды

$$\rho^* = \sum_{i=1}^n \rho_i^*, \quad (8)$$

где

$$\rho_i^* = \frac{\sqrt{6}(\rho_1^*)^{1/2}(\rho_2^*)^{1/2} \left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}}{3K_i}\right)^{3/2}}{\pi \left(1 + \frac{\sigma_{ii}}{E_i}\right)^2 W_e^{1/2} \gamma_1^{1/2}}, \quad K_v < 0,8; \quad (9)$$

$$\rho_i^* = \frac{1,12(\rho_1^*)^{1/2}(\rho_2^*)^{1/2} \left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}}{3K_i}\right)^{3/2}}{\sqrt{\pi} \left(1 + \frac{\sigma_{ii}}{E_i}\right)^2 m_0^{1/2}}, \quad K_v > 0,8; \quad (10)$$

W_e – влажность грунтов на единицу сухой массы в долях единицы; γ_1 – отношение удельного веса грунтов к удельному весу воды; m_0 – пористость грунтов; где K_v – коэффициент влагонасыщенности; E_i – модули Юнга; σ_{ii} – величина напряжений в направлении, в котором производится измерение удельного электрического сопротивления.

Из приведенных формул следует, что на величину удельного электрического сопротивления оказывает влияние как объемное напряженное состояние исследуемого объекта, так и величина действующих напряжений в направлении, в котором выполняются измерения.

Кластерная структура среды учитывается заменой E_i и K_i на E_i^* и K_i^* аналогично (7)

$$E_i^* = \frac{2\Delta U_i}{22,21R_i^3 \varepsilon_i^2 (1 - 2\nu_i)}. \quad (11)$$

Таким образом, с позиций геофизического контроля все типы кластерно-иерархических структур равноценны, если соблюдается соотношение между длиной волны физического излучения и размером структуры [11-17]. При этом процедура измерений и методы их интерпретации связаны с реальной структурой массива. Другими словами, для повышения эффективности измерений необходимо обеспечить согласование параметров измерительной системы с характеристиками области исследований.

Изучение массива ведется на некоторой площади или в объеме массива, в пределах которых наблюдения проводятся выборочно или по определенной схе-

ме. В массиве находится неоднородность, характеристический размер которой равен a . Каждое измерение при геофизическом контроле охватывает некоторую область массива, которая называется областью воздействия эксперимента W^* , оказывающую существенное влияние на параметры распространяющегося в этом объеме физического поля. В случае использования, например, волновых методов контроля область воздействия эксперимента определяется согласно положениям геометрической оптики через зону Френеля в предположении, что длительность излучаемого сигнала меньше его распространения в пределах области измерения L . При этом радиус первой зоны Френеля, определяющего параметр области воздействия эксперимента, можно представить следующим образом [14]:

$$r = \sqrt{\Lambda L / 4} \quad (12)$$

где Λ - длина волны физического излучения.

Согласование измерительной системы с объектом исследований производится через правильный подбор соотношения между существующими неоднородностями и областью воздействия эксперимента, а также длиной волны воздействующего на массив поля. По отношению к величине области воздействия эксперимента W все существующие неоднородности можно разбить на следующие три типа.

1. Неоднородность высшего порядка относительно W , для которой справедливо $a^3 \ll W$ (a – характеристический размер неоднородности), выступающая чаще всего в форме свойств «эквивалентной» однородной среды. К этой группе относятся зернистые, пористые, микро- и макротрещиноватые горные породы.

2. Эффективная относительно W , когда $a^3 \sim W$; это соответствует случаю статистически неоднородного массива, в котором параметры регистрируемых физических сигналов являются случайной функцией пространственных координат.

3. Низшего порядка относительно W , для которой справедливо $a^3 \gg W$; к ней относятся крупные включения и пустоты, зоны повышенных напряжений и зоны нарушения в массиве вокруг горных выработок. Этот тип неоднородности может рассматриваться как неслучайное изменение (тренд) физико-механических свойств горных пород в пространственных координатах.

Относительно длины волны Λ излучаемого поля в массиве все неоднородности тоже можно разделить на три типа.

1. Высшего порядка относительно Λ , удовлетворяющая условию $a \ll \Lambda$, может выступать при рассмотрении процессов распространения колебаний в форме свойств эквивалентной однородной среды (например, идеально упругие и дифференциально упругие многофазные среды).

2. Эффективная относительно Λ включает в себя структурную неоднородность массива (включения, трещины, зернистость), для которой справедливо $a \sim \Lambda$. Дифракция волн на этих неоднородностях приводит к рассеянию энергии

волнового поля; их воздействие выражается в изменении структуры и флуктуациях параметров сигнала.

3. Низшего порядка относительно Λ , для которой справедливо $a \gg \Lambda$, позволяет использовать методы лучевой теории распространения волн в неоднородных средах. Эти методы широко применяются в геоакустике и сейсморазведке, особенно при описании процессов отражения и преломления волн в слоистых средах.

Классификация неоднородности массива относительно области воздействия эксперимента позволяет корректно ставить и правильно решать задачи рационального выбора параметров точек сети наблюдений в массиве (выбор базы L и шага Δl измерений и т.п.) и обработки результатов измерений, полученных в различных точках массива. Классификацию неоднородности массива относительно длины волны Λ необходимо учитывать при разработке моделей массива.

Классификации несколько условны, однако они позволяют выделить четыре основных направления в изучении неоднородных горных пород геофизическими методами.

1. Определение интегральных свойств массива горных пород, выступающих в форме свойств «эквивалентной» однородной среды. Это направление соответствует условиям $a^3 \ll W$; $a \ll \Lambda$, в настоящее время оно наиболее разработано. К данному направлению относятся многочисленные модели идеально упругих и дифференциально упругих многофазных систем, которые успешно используются при оценке интегральной трещиноватости и пористости массива.

2. Оценка параметров неоднородностей высшего порядка относительно области воздействия эксперимента и эффективных относительно длины волны в массиве. К этому направлению относятся работы, связанные с установлением однозначных зависимостей между структурой сигнала и параметрами неоднородности массива (раскрытие и количество трещин, средний диаметр зерен, радиус корреляции неоднородности и т.п.) при выполнении условия $a^3 \ll W$, $a \sim \Lambda$.

Дальнейшее развитие данного направления весьма перспективно и связано с изучением спектрально-корреляционной структуры зондирующих $S_1(t)$ и прошедших через массив горных пород $S_2(t)$ сигналов.

3. Изучение пространственной неоднородности массива горных пород, эффективной относительно области воздействия эксперимента. Указанное направление связано с изучением случайной компоненты изменчивости массива, для которой выполняются условия $a^3 \sim W$; $a = \Lambda$. Здесь преимущественное развитие получили статистические методы оценки степени неоднородности массива с целью определения его нарушенности.

4. Изучение пространственной неоднородности низшего порядка относительно области воздействия. Для этого направления справедливы условия $a^3 > W$; $a \gg \Lambda$, в настоящее время основные при контроле состояния массива вблизи горных выработок. К типичным задачам данного направления относятся: изуче-

ние распределения напряжений и определение зон нарушенности в массиве вокруг горных выработок; прозвучивание массива с целью выделения крупных включений (рудных тел, карстов и т.п.); контроль процессов упрочнения (замораживания, цементации, битумизации) массива.

Обоснован базовый принцип мониторинга для прогнозной диагностики состояния геотехнических систем с учетом их кластерно-иерархической структуры, в основе которого лежит многоплановость и многостадийность, а также комплексный подход к решению как отдельных вопросов контроля, так и всего мониторинга в целом. Геофизический контроль должен быть как непрерывный, так и оперативный. Непрерывность контроля необходима для обеспечения постоянной безопасности работ, но при этом системы контроля становятся громоздкими, четко проявленными к соответствующим объектам, теряют свою оперативность и соответственно, эффективность. Оперативный контроль, как правило, базирующийся на переносных приборах, более дешевый и эффективный, но нуждается в сопоставлении результатов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савич А.И. Опыт изучения масштабных эффектов в механике горных пород / А.И. Савич, Л.В. Шаумян // Инженерная геология. - 1986.- № 2. - С. 12-24.
2. Гзовский М.В. Основы тектонофизики / М.В. Гзовский. - М.: Наука, 1975.-178 с.
3. Мячкин В.И. Геофизические методы изучения деформационных процессов в земной коре / В.И. Мячкин, А.И. Савич: Сб. научн. тр. / Гидропроект. — М., 1983. - Вып. 89. - С. 21-29.
4. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин / Р.Л. Салганик // Механика твердого тела. - 1972. - № 4. - С. 15-22.
5. Савич А.И. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород / А.И. Савич, В.И. Коптев. - М.: Недра, 1969. - 218 с.
6. Шаумян Л.В. Физико-механические свойства массивов скальных горных пород / Л.В. Шаумян. - М.: Наука, 1972. - 137 с.
7. Шаумян Л.В. Природа физико-механических свойств массивов скальных грунтов: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра геол.- мин. наук: спец. 04.00.07 / Л.В. Шаумян. - М., 1983. - 39 с.
8. Соболев Г.А. Изучение образования и предвестников разрыва сдвигового типа в лабораторных условиях / Г.А. Соболев // Физические процессы в очагах землетрясений: Сб. научн. тр. - М.: Наука, 1980. - 312 с.
9. Bernaix J. Etude geotechnique de la roche de Malpasset / J. Bernaix - Du P., Dunod, 1967. - 235 p.
10. Müller L. Gesteins und Ge,rigseigenschaften in Abhängigkeit von betrachteten Grössenbereich / L. Müller // Z. Deutsch. Geol. Ges, Jahrg. - 1967. - 119. - P. 25-38.
11. Паламарчук Т.А. Элементы механосинергетики породного массива / Т.А. Паламарчук, В.Я. Кириченко, Б.М. Усаченко. - Днепрпетровск: «Лири ЛТД», 2006. - 307 с.
12. Яланский А.А. Особенности и диагностика процессов самоорганизации породного массива в окрестности горных выработок / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, С.Н. Розумный // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2003. – № 3. – С. 151-154.
13. Яланський А.О. Спектральний аналіз геофізичної інформації для розв'язання задач геології / А.О. Яланський, Г.С. Веселовський, Т.А. Паламарчук, Г.М. Шевцова // Геологія, геохімія горючих копалин. – 1999. – № 2. – С 76-82.
14. Глушко В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
15. Гречихин Л.И. Взрывные технологии в шахтном строительстве / Л.И. Гречихин, О.И. Рублева // Вестник. Современные проблемы шахтного и подземного строительства. – Донецк: «Инфо-Пресс», 2006. – Вып. 7. – С. 100-110.
16. Тимошенко С.П. Пластины и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. - М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. - 635 с.
17. Усаченко Б.М. Исследование синергетических и волновых процессов в массиве горных пород / Б.М. Усаченко, Т.А. Паламарчук, Е.А. Слащева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2000. – № 8. – С. 182-184.