

ГРАВИТАЦИОННЫЕ И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ЗАМЕРАМ В ОТДЕЛЬНЫХ ПУНКТАХ

А. Оловянный^{1*}

¹Санкт-Петербургское отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*Ответственный автор: e-mail agolov2009@hgepro.ru, тел. +79500033165

GRAVITATIONAL AND TECTONIC STRESSES IN THE ROCK MASS AND THEIR DETERMINATION BY MEASUREMENTS IN SEPARATE POINTS

A. Olovyannyy^{1*}

¹Saint-Petersburg Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Institute of Geoecology named after E.M. Sergeev of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

*Corresponding author: e-mail agolov2009@hgepro.ru, tel. +79500033165

ABSTRACT

Purpose. Stress state in rock mass is the most important factor affecting processes around mine working. The methods used for calculation of stresses based on hypotheses of elastic thrust, hydrostatic state or spherical equilibrium of the earth crust do not consider tectonic processes and influence of rocks' viscous properties on formation of stress fields. The goal is to develop methods of calculating stress state in rock masses depending on the elastic and viscous rock properties and interaction of tectonic plates considering stresses measured in individual points.

Methods. Conditions of stress state formation in rock masses due to gravitation effect are modeled under axial compression of a cylindrical sample with forbidden lateral movements. Solution of the problem about deformation of such sample allowed to obtain the ratio between lateral stresses and axial stresses. This ratio determines the lateral thrust coefficient in the rock mass. Tectonic component of stress state in rock mass is determined by values of deformations in the horizontal plane caused by interaction of tectonic plates. Tectonic components of stresses depend on tectonic deformations in the horizontal plane. Due to the length of tectonic processes the tectonic component of lateral stresses also depends on viscous and elastic deformations.

Findings. Gravitation component of the lateral thrust coefficient does not vary with depth, while the tectonic component is inversely proportional to depth. Growth of lateral thrust coefficient as its measurements are approaching the surface is explained by the effect of tectonic component of stresses.

Originality. Experimental measurements of stresses are possible only in a limited number of points. There is no other method to determine stresses in masses with non-horizontal bedding, non-uniformities and folds except for mathematical modeling. Within the frames of hypothesis describing a medium with limited linear viscous deformations, we have obtained equations relating the stress components with full and elastic deformations. The method is developed for formulation and solution of problems for modeling stress state using equations of rock mass state as the medium with quasi-elastic properties. Gravitation component is set by the rocks' weight, and effect of tectonics is set by the tensor of tectonic deformations.

Practical implications. A method for solving the problem for determination of stresses in rock mass considering measured stresses in individual points is proposed.

Keywords: rocks, stressed state, lateral expansion, tectonic deformations, tectonic stresses, mathematical modeling

1. ВВЕДЕНИЕ

Напряженное состояние массива пород формируется под действием сил тяжести, движения литосферных плит, сил гидростатического взвешивания и других природных воздействий (Jaeger, Cook, &

Zimmerman, 2007). Напряженное состояние массива горных пород (напряженное состояние нетронутого массива) определяет геомеханические процессы вокруг подземных сооружений и горных выработок. В связи с этим расчет напряжений, действующих в

массиве пород до образования горных выработок, есть важнейший этап определения начальных условий при постановке задач горного давления.

Напряжения были измерены во многих местах по всему миру на глубинах до нескольких километров. Результаты измерений и их анализ можно найти в многочисленных публикациях (Markov, 1977; Brown & Hoek, 1978; Lo, 1978; Herget, 1987; Savchenko, Kozurev, & Mal'tsev, 1994; Amadei & Stephansson, 1997; Leont'yev, 2001; Brady & Brawn, 2004).

Простейшим предположением относительно напряженного состояния является то, что в геологической среде имеет место литостатическое напряженное состояние. Такое представление известно как гипотеза Гейма (Heim's rule). Подтверждающим аргументом этой гипотезы служит асимптотическое с течением длительного времени поведение горной породы как вязкой среды, содержащей в своей модели элемент Максвелла (Heim, 1878). В работе (Jaeger, Cook, & Zimmerman, 2007) подробно рассмотрены модели состояния горного массива, основанные на упругом поведении горных пород. Современные представления по этой проблеме сводятся к следующему.

В соответствии с простейшими моделями напряженное состояние в однородном и изотропном массиве пород может быть описано выражениями:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \rho g z; \quad \sigma_x = \sigma_y = \lambda \sigma_z; \\ \tau_{xy} &= 0; \quad \tau_{yz} = 0; \quad \tau_{zx} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где:

- x, y, z – прямоугольная система координат;
- z – координата в направлении сил тяжести;
- x, y – координаты в горизонтальной плоскости;
- ρ – плотность горной породы;
- g – ускорение свободного падения;
- λ – коэффициент бокового распора.

Согласно гипотезе Гейма $\lambda = 1$, согласно гипотезе упругого распора (одноосная модель с ограничением боковых деформаций):

$$\lambda = \lambda_0 = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (2)$$

где:

- ν – коэффициент Пуассона.

Названные модели предсказывают, что боковые напряжения не будут превышать вертикального напряжения. Данные (Brown & Hoek, 1978; Brady & Brawn, 2004) показывают значительный разброс, но позволяют отметить некоторые общие тенденции (Рис. 1). Вертикальные напряжения сосредоточены вокруг линии $\sigma_z = \rho g z$, что соответствует среднему значению плотности 2700 кг/м^3 . Отклонения, вероятно, связаны с изменениями в местной топографии или местными геологическими неоднородностями. Предположение о том, что отклонения обусловлены топографическими эффектами, согласуется с тем фактом, что отклонения от линейного тренда уменьшаются с глубиной. Отношение средних значений горизонтальных нормальных напряжений с вертикальным напряжением приведено на Рисунке 1б. На глубине 300 м или менее, это отношение обнаружено в диапазоне от 1 до 3.5.

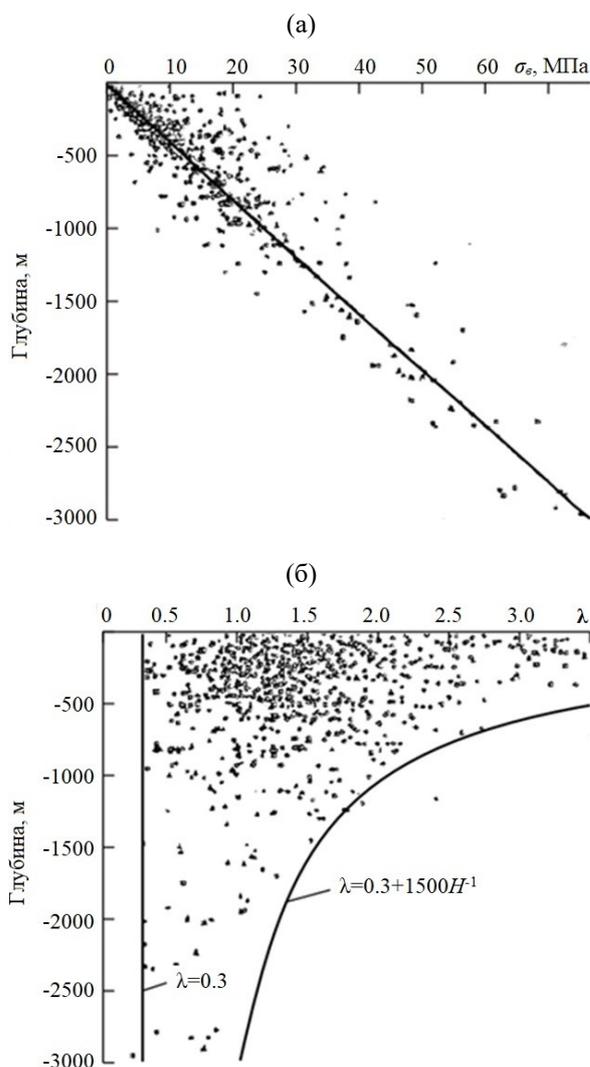


Рисунок 1. Компиляция мировых измерений напряжений, показывающая связь вертикальных напряжений (а) и коэффициента λ (б) с глубиной H (Brady & Brawn, 2004)

На больших глубинах диапазон значительно сужается, и ниже 2000 м наблюдаемые значения, как правило, меньше, чем 1. Очевидно, ни гипотеза Heim'a, ни упругая одноосная модель не обеспечивают хорошей сходимости с этими данными.

Brown & Hoek (1978) установлены два условия, которые обеспечивают приближительные границы для данных бокового распора:

$$0.3 \leq \lambda \leq 0.5 + \frac{1500}{z}, \quad (3)$$

где:

- z – в метрах.

Упругая модель, которая может предсказать значения $\lambda > 1$, основана на решении McCutchen (1982) для сферической Земли. В этой модели тонкая земная кора служит упругой изотропной и однородной оболочкой, расположенной на поверхности жесткой мантии, которая деформируется под воздействием силы тяжести. Прогнозируемое отношение напряжений λ нелинейно уменьшается с глубиной, в соответствии с зависимостью:

$$\lambda = \frac{\nu}{1-\nu} + \frac{t^2}{4az}, \quad (4)$$

где:

a – радиус Земли (6400 км);
 t – толщина земной коры.

Вертикальные и горизонтальные напряжения, предсказанные этой моделью, приведены на Рисунке 2. Графики построены для средней толщины земной коры 40 км, средней плотности 2700 кг/м³, и коэффициента Пуассона 0.25. Так как толщина земной коры составляет лишь малую часть радиуса Земли, модель предсказывает практически линейное изменение вертикальных напряжений с глубиной. Прогнозируемый вертикальный градиент напряжений почти равен ρg , и тангенциальный градиент напряжений практически равен $\frac{\nu \rho g}{1-\nu}$. Однако из-за сферической геометрии модель предсказывает конечные тангенциальные напряжения на поверхности, в отличие от нулевого напряжения в модели одноосной деформации.

Как видно из сравнения Рисунков 1б и 2б, следующее из решения McCutchen (1982) закономерность уменьшения λ с глубиной $1/z$, находится в качественном согласии с многими полевыми измерениями. Sheorey (1994, 2001), Amadei (1996) развили эту модель, считая кору и лежащую в основе мантию состоящими из нескольких слоев. Кроме того, в модели учтены анизотропия деформационных свойств, геотермальный градиент температуры и эффекты теплового расширения. Эта модель предсказывает изменение с глубиной в лучшем согласии с данными (Рис. 1), она предсказывает, что горизонтальные напряжения на поверхности будут составлять около 11 МПа. Горизонтальные напряжения такой величины в некоторых случаях были измерены в пределах нескольких десятков метров от поверхности (Lo, 1978; Herget, 1987).

Ограничивающие кривые (Brown & Hoek, 1978; Brady & Brown, 2004) имеют одинаковую алгебраическую форму, $A + B/z$, такая же форма зависимости предсказана сферическими моделями. Эмпирические значения B составляют 100 и 1500. Для сравнения: в сферической оболочке McCutchen'a модель дает $B = 62.5$, в то время как с учетом многослойности (Sheorey, 1994) в неизотермическом варианте дает $B = 410$.

Согласно решению для сферической оболочки коэффициент бокового распора определяется выражением:

$$\lambda = \frac{\nu}{1-\nu} + \frac{\beta GE}{(1-\nu)\gamma} \cdot \left(1 + \frac{1000}{H}\right), \quad (5)$$

где:

β – коэффициент линейного теплового расширения;
 G – термальный градиент.
 E – модуль упругости;
 γ – объемный вес пород;
 H – глубина, м.

Путем подбора входящих в формулу параметров Sheorey (2001) удалось получить удовлетворительное совпадение расчетных и замеренных величин для разных регионов Земли. При таком числе параметров деформационных и термальных свойств горных пород совпадение модели и полевых испытаний всегда возможно, но не убедительно.

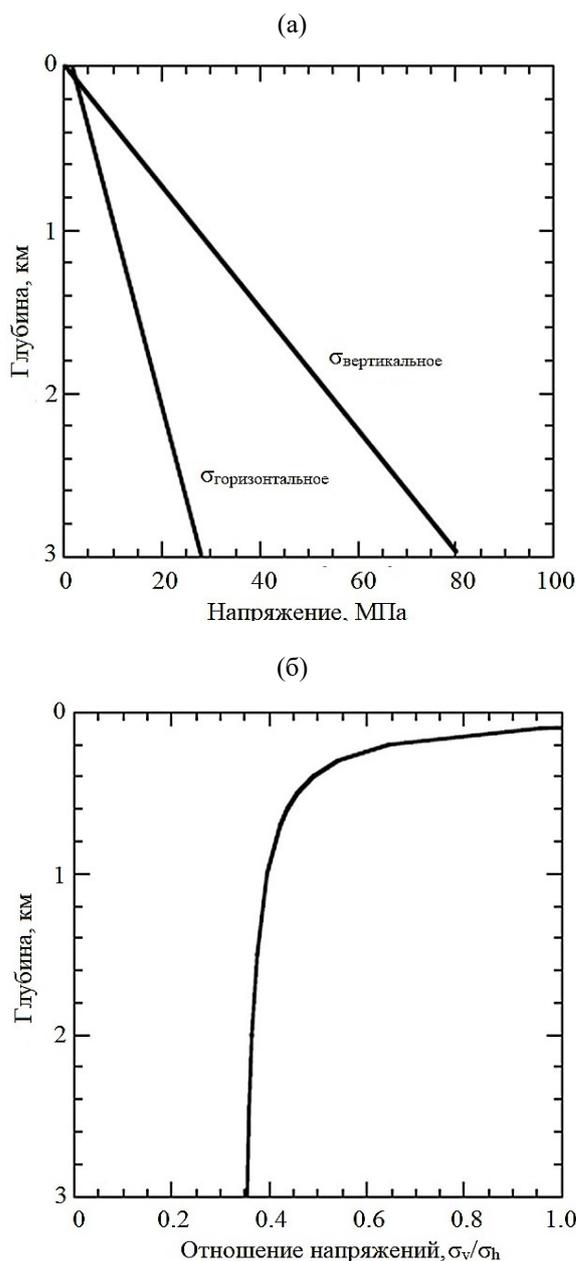


Рисунок 2. Прогнозы сферической модели: (а) вертикальные и горизонтальные напряжения; (б) отношение горизонтальных и вертикальных напряжений (Jaeger, Cook, & Zimmerman, 2007)

В отдельных случаях удастся найти удовлетворительные эмпирические зависимости для максимального бокового напряжения с меньшим числом параметров, как например Cartwright (1997) для каменноугольных месторождений Великобритании:

$$\sigma_{h \max} = 0.0092H \frac{\nu}{1-\nu} + 0.779E - 3.998. \quad (6)$$

Приведенные модели имеют качественное подтверждение натурными измерениями, однако не объясняют, например, того факта, что в соляных массивах напряженное состояние близко к гидростатическому не зависимо от глубины (Baryakh, Konstantinova, & Asanov, 1996). Такое явление может быть объяснено доводом Гейма о влиянии длительности процессов в вязких средах.

Земная кора рассечена тектоническими разрывами, которые служат границами тектонических плит. Движение плит относительно друг друга при их взаимодействии приводит к их деформациям и к появлению тектонических напряжений. В связи с этим широкое развитие получило представление о тектонических напряжениях, вызванных движением литосферных плит (Gzovskiy, 1975; Markov, 1977; Petukhov & Batugina, 1999).

В упругих и в эмпирических моделях, в сферических решениях тектонический фактор не учитывается.

Главными факторами, влияющими на напряженное состояние в массивах пород, являются силы тяжести, тектонические силы и свойства горных пород. Рассмотрим проблему горного давления, учитывая эти факторы, выделяя среди них вязкие свойства горных пород, учет влияния которых незаслуженно отброшен вместе с гипотезой Гейма.

В работах Olovyannyy (2012, 2016) исследованы процессы формирования напряженного состояния в массивах горных пород с учетом упругого и вязкого поведения. В этой работе приведены выводы о формировании горного давления и способах расчета естественного поля напряжений в неоднородном массиве горных пород по результатам замера напряжений в отдельных пунктах.

2. БОКОВОЙ РАСПОР КАК РЕАКТИВНЫЙ ОТПОР ДЕЙСТВИЯМ ГРАВИТАЦИОННЫХ СИЛ

В земной коре горные породы испытывают давление веса вышележащих пород. При отсутствии возможности деформироваться в горизонтальной плоскости в породах возникает боковой распор как реактивный отпор действиям гравитационных сил.

Условие нагружения элемента массива пород моделируются в лабораторных экспериментах при одноосном сжатии цилиндрического образца с запрещением боковых деформаций. Отношение бокового давления к давлению на образец зависит от уровня нагружения и времени испытания (Kartashov, Matveev, Mikheev, & Fadeev, 1979). Исходя только из упругого поведения образцов, такие результаты можно объяснить изменчивостью коэффициента Пуассона. Однако изменчивость коэффициента Пуассона не подтверждается экспериментом. Изменение бокового давления во времени может быть вызвано вязкими деформациями.

Рассмотрим влияние вязких свойств, в разной степени присущих всем горным породам. Если порода, описывается моделями, содержащими последовательно подключенный элемент Максвелла, то ее поведение подобно вязкой жидкости. В образце отношение бокового давления к осевому будет с течением времени стремиться к единице. Коэффициент бокового распора в массиве таких пород равен единице. В большинстве случаев деформации горных пород не описываются моделью, содержащей включенный последовательно элемент течения Максвелла. При нагрузках, не приводящих к разрушению, когда напряжения меньше длительной прочности, вязкие деформации ограничены. Рассмотрим, как на боковой распор может влиять длительность испытания при

ограниченных вязких деформациях. Поскольку в однородных ненарушенных образцах при нагружении с запрещенными боковыми деформациями разрушения не возникают, можно говорить об упругих и вязкоупругих деформациях. Точно так в ненарушенных частях массивов горных пород накопленные деформации имеют упругую и вязкоупругую природу.

Вязкоупругие деформации реализуются как сдвиговые деформации. Объемные вязкие деформации практически отсутствуют, т.е.:

$$\varepsilon_1^{ve} + \varepsilon_2^{ve} + \varepsilon_3^{ve} = 0, \quad (7)$$

где:

$\varepsilon_1^{ve}, \varepsilon_2^{ve}, \varepsilon_3^{ve}$ – компоненты нормальных вязкоупругих деформаций.

Длительные испытания образцов каменной соли и горючего сланца (Kartashov, Matveev, Mikheev, & Fadeev, 1979), аргиллита, алевролита и песчаника (Glushko & Vinogradov, 1982) свидетельствуют, что при длительных испытаниях на одноосное сжатие образцов до давления, не превышающего 0.6 от прочности, связь между напряжениями и деформациями близка к линейной для любого момента времени (изохронные кривые напряжения – деформации) (Рис. 3).

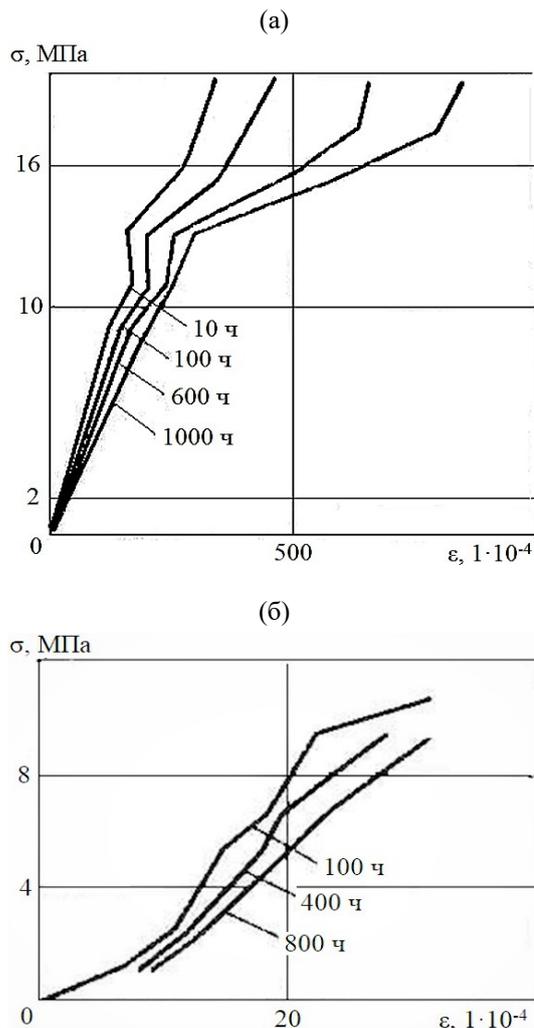


Рисунок 3. Изохронные графики деформирования: (а) аргиллита и (б) горючего сланца (Kartashov, Matveev, Mikheev, & Fadeev, 1979)

Исходя из этого, можно считать, что для большого количества типов горных пород при монотонном нагружении и при длительном действии нагрузок до наступления пластических деформаций и разрушения сдвиговые вязкие деформации пропорциональны упругим; в этом случае справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^{ve} - \varepsilon_2^{ve} &= k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e); \\ \varepsilon_1^{ve} - \varepsilon_3^{ve} &= k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_3^e); \\ \varepsilon_1^{ve} - \varepsilon_1^{ve} &= k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_1^e), \end{aligned} \quad (8)$$

где:

k_{ve} – коэффициент пропорциональности между вязкоупругими и упругими деформациями сдвига;

$\varepsilon_1^e, \varepsilon_2^e, \varepsilon_3^e$ – компоненты нормальных упругих деформаций. Последнее очевидное равенство приведено с целью выполнения следующих выкладок.

Просуммировав левые и правые части этих равенств, учитывая условие (7), получим:

$$3\varepsilon_1^{ve} = k_{ve}(2\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e - \varepsilon_3^e). \quad (9)$$

С помощью круговой подстановки индексов 1, 2 и 3 получим еще два аналогичных выражения. Таким образом, связь между вязкоупругими и упругими деформациями для горных пород, вязкое поведение которых может быть описано линейной ползучестью, представляется следующим образом:

$$\varepsilon_i^{ve} = \frac{1}{3}k_{ve}(2\varepsilon_i^e - \varepsilon_j^e - \varepsilon_k^e); \quad (10)$$

$$\gamma_{ij}^{ve} = k_{ve}\gamma_{ij}^e,$$

где:

$\varepsilon_i^e, \varepsilon_j^e, \varepsilon_k^e, \gamma_{ij}^e, \varepsilon_i^{ve}, \gamma_{ij}^{ve}$ – компоненты упругих и вязкоупругих деформаций соответственно;

i, j, k – номера осей прямоугольной системы координат (принимают значения 1, 2 и 3).

В условиях одноосного сжатия цилиндрического образца (элемента массива горных пород) с запрещением боковых деформаций, компоненты деформаций могут быть представлены как сумма упругой и вязкоупругой составляющих:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^e + \varepsilon_z^{ve}; \quad \varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^{ve}; \quad \varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_\theta^{ve}, \quad (11)$$

где:

z, r, θ – оси цилиндрической системы координат;

$\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ – компоненты соответственно напряжений и деформаций;

$\varepsilon_r^{ve}, \varepsilon_\theta^{ve}, \varepsilon_z^{ve}$ – составляющие вязкоупругих деформаций.

Поскольку в условиях осевой симметрии при отсутствии радиальных перемещений деформации и напряжения по направлениям осей r и θ равны между собой, введем обозначения индексов: 1 – для оси z ; 2 – для осей r и θ .

Учитывая (10) и (11) для вязкоупругих деформаций можно записать:

$$\varepsilon_1^{ve} = \frac{2}{3}k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e); \quad \varepsilon_2^{ve} = -\frac{1}{3}k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e). \quad (12)$$

Таким образом:

$$\varepsilon_1^e + \frac{2}{3}k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e) = \varepsilon_z; \quad \varepsilon_2^e - \frac{1}{3}k_{ve}(\varepsilon_1^e - \varepsilon_2^e) = 0. \quad (13)$$

Отсюда:

$$\varepsilon_1^e = \frac{1 + \frac{1}{3}k_{ve}}{1 + k_{ve}}\varepsilon_z; \quad \varepsilon_2^e = \frac{\frac{1}{3}k_{ve}}{1 + k_{ve}}\varepsilon_z. \quad (14)$$

Поскольку напряжения определяются только упругими деформациями, то:

$$\sigma_i = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\varepsilon_i^e(1-\nu) + \nu(\varepsilon_j^e + \varepsilon_k^e) \right]. \quad (15)$$

Другие компоненты напряжений получаются круговой перестановкой индексов.

Учитывая (14), из (15) получим:

$$\sigma_1 = E \frac{(1-\nu)\varepsilon_1^e + 2\nu\varepsilon_2^e}{1-\nu-2\nu^2}; \quad \sigma_2 = E \frac{\nu\varepsilon_1^e + \varepsilon_2^e}{1-\nu-2\nu^2}. \quad (16)$$

С учетом (16) найдем отношение боковых напряжений к осевым:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\nu + \frac{1}{3}k_{ve}(1+\nu)}{1-\nu + \frac{1}{3}k_{ve}(1+\nu)}. \quad (17)$$

На начальном этапе нагружения $k_{ve} = \gamma^{ve} / \gamma^e = 0$, при этом:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\nu}{1-\nu} = \lambda_0. \quad (18)$$

В процессе длительного нагружения образца отношение $k_{ve} = \gamma^{ve} / \gamma^e$ растет (Рис. 4), вместе с ним отношение σ_2 / σ_1 стремится к величине, отличающейся от λ_0 . В массивах горных пород, когда эти процессы протекают в течение геологических периодов, это отношение достигнет максимальной величины, свойственной данной породе. Возникает вопрос, является ли предел отношения $k_{ve} = \gamma^{ve} / \gamma^e$ при $t \rightarrow \infty$ константой материала или оно существенно зависит от напряженного состояния. Для пород, подчиняющихся закону линейной вязкости предельная величина отношения $k_{ve} = \gamma^{ve} / \gamma^e$ при $t \rightarrow \infty$ названа коэффициентом упругой вязкости (Olovyannyy, 2012; Olovyannyy, 2016).

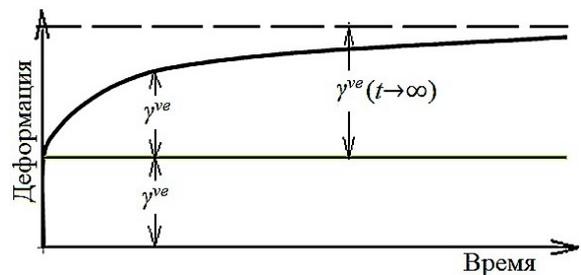


Рисунок 4. График деформирования горной породы при постоянной нагрузке

Анализ результатов испытаний горных пород Западного Донбасса показал (Glushko & Vinogradov, 1982), что средняя величина отношения деформации ползучести к условно-мгновенной для аргиллитов составляет 0.529, алевролитов – 0.427, песчаников – 0.390.

Таким образом, в массивах горных пород с горизонтальным залеганием слоев боковой распор, формирующийся в течение длительного времени:

$$\lambda = \frac{v + \frac{1}{3}K_{ve}(1+v)}{1 - v + \frac{1}{3}K_{ve}(1+v)} \quad (19)$$

Из графиков (Рис. 5), построенных по формуле (19), видно, что даже для прочных и хрупких пород (например, песчаников и гранитов), вязкоупругие деформации которых не превышают упругих ($K_{ve} < 1$), коэффициент бокового распора может значительно отличаться от λ_0 . Так, при $v = 0.2$ коэффициент бокового распора меняется от 0.25 до 0.63 при K_{ve} , растущем от 0 до 1. Для пластичных соляных или глинистых пород вязкоупругие деформации которых могут быть больше упругих в 5 и более раз ($K_{ve} = 2 - 10$ и более), коэффициент бокового распора может превысить 0.6 даже при $v = 0.1$, а при $v = 0.2$ достичь и даже превзойти 0.9.

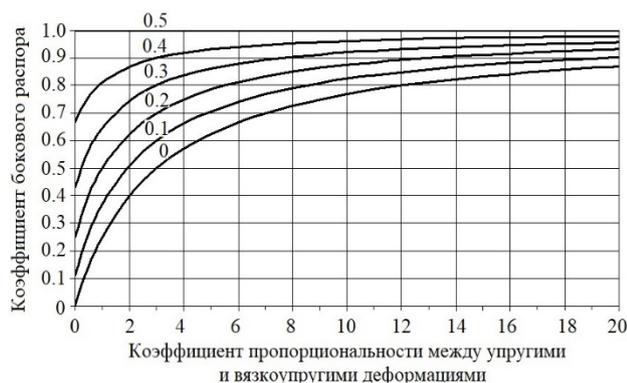


Рисунок 5. Зависимость коэффициента бокового распора от коэффициента упругой вязкости для пород с различными упругими свойствами ($0 < v < 0.5$)

По современным представлениям, в соляном массиве пород на глубине выемки полезных ископаемых 300 – 1000 м и более коэффициент бокового распора близок к единице. При $v > 0.25$ и $K_{ve} > 3$ рассчитанный по формуле (19) коэффициент $\lambda > 0.8$, что соответствует этим представлениям. Даже в скальных породах, у которых $0.4 < K_{ve} < 1$ и $0.2 < v < 0.3$, коэффициент бокового распора, рассчитанный по формуле (11), находится в интервале 0.55 – 0.75, что существенно отличается от рассчитываемого с учетом только упругих деформаций бокового распора ($\lambda_0 = 0.25 - 0.43$).

Важно отметить, что в части разреза с однородными породами коэффициент бокового распора, обусловленный гравитацией, не зависит от глубины. Это подтверждает исследование Savchenko (2004), который анализируя керн Кольской сверхглубокой скважины, установил, что до глубины 11.5 км среднее значение отношения действующих горизонтальных напряжений к вертикальным составляет около 0.777 и практически не зависит от глубины.

3. ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Движение тектонических плит относительно друг друга приводит к тому, что при взаимодействии они деформируются и в них появляются дополнительные напряжения в горизонтальной плоскости. На удалении от границ взаимодействия в вертикальных сечениях деформации слоев плит в горизонтальной плоскости можно считать постоянными. При этом в слоях пород с различными упругими свойствами горизонтальные напряжения различны. Поэтому при рассмотрении отдельных областей массива пород правильнее рассматривать не тектонические напряжения, а тектонические деформации, распределение которых при известных направлениях подвижек можно получить из решения для плит с большей достоверностью, чем для напряжений. На рассматриваемом участке земной коры (в плане) могут быть определены главные (максимальные и минимальные) деформации, вызванные движением тектонических плит. В слоистом неоднородном массиве горных пород напряжения распределяются в зависимости от жесткости отдельных слоев, и потому говорить о распределении напряжений по территории имеет смысл только для отдельных слоев с известными деформационными свойствами.

Рассмотрим участок, на котором при наличии тектонических подвижек нарушений сплошности и складок не возникает и известны значения главных деформаций в горизонтальной плоскости. Введем прямоугольную систему координат x, y, z . Ось z направим по направлению сил тяжести, оси x и y по направлениям главных деформаций ε_x и ε_y в горизонтальной плоскости.

Горизонтальные деформации в этом случае представляют сумму упругих и вязких составляющих, равную тектоническим деформациям:

$$\varepsilon_x^e + \varepsilon_x^v = t_x; \quad \varepsilon_y^e + \varepsilon_y^v = t_y, \quad (20)$$

где:

t_x, t_y – величины главных деформаций, вызванных тектоническими деформациями.

Решая систему уравнений (10), (15) и (20) относительно напряжений в горизонтальной плоскости, получим выражения для отношения боковых напряжений к вертикальным по направлениям главных деформаций:

$$\lambda_x = \frac{v + \frac{1}{3}K_{ve}(1+v)}{1 - v + \frac{1}{3}K_{ve}(1+v)} + \frac{\frac{1}{3}K_{ve}(2t_x + t_y) + (t_x + vt_y)/(1+v)}{\sigma_z \frac{1 - v + \frac{1}{3}K_{ve}^2(1+v) + \frac{2}{3}K_{ve}(2-v)}{E}}; \quad (21)$$

$$\lambda_y = \frac{v + \frac{1}{3}K_{ve}(1+v)}{1 - v + \frac{1}{3}K_{ve}(1+v)} + \frac{\frac{1}{3}K_{ve}(2t_y + t_x) + (t_y + vt_x)/(1+v)}{\sigma_z \frac{1 - v + \frac{1}{3}K_{ve}^2(1+v) + \frac{2}{3}K_{ve}(2-v)}{E}}.$$

В формулах (21) первые слагаемые совпадают с выражением для коэффициента бокового распора в статических условиях от влияния сил гравитации, а вторые определяют тектонические дополнения.

Если порода обладает свойством деформироваться вязко не ограничено ($K_{ve} \rightarrow \infty$), то, как следует из (21), $\lambda_x = \lambda_y = 1$. Когда вязкая деформация ограничена ($\varepsilon_i^v = \varepsilon_i^{ve}$), что, по-видимому, имеет место в большинстве случаев, боковые напряжения зависят от тектонических деформаций и могут быть меньше или больше напряжений гравитационного бокового распора, а в некоторых случаях превышать вертикальное давление.

Из (21) видно, что гравитационная часть коэффициента бокового распора не зависит от глубины, в то время как тектоническая часть с глубиной уменьшается. В связи с ростом σ_z с глубиной тектоническая часть уменьшается обратно пропорционально глубине. Приближаясь к земной поверхности, σ_z может расти до любых больших величин, которые ограничены лишь условием предельного состояния по прочности пород. Гиперболическая зависимость коэффициента бокового распора от глубины соответствует графикам, ограничивающим замеренные значения напряжений (Рис. 1).

Учитывая (21), тектонические напряжения в горизонтальной плоскости можно представить зависящими от главных тектонических деформаций:

$$\begin{aligned} T_x &= E[k_1(v, K_{ve})t_x + k_2(v, K_{ve})t_y]; \\ T_y &= E[k_1(v, K_{ve})t_y + k_2(v, K_{ve})t_x], \end{aligned} \quad (22)$$

где:

k_1, k_2 – коэффициенты влияния тектонических деформаций.

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{\frac{2}{3}K_{ve} + \frac{1}{1+v}}{1-v + \frac{1}{3}K_{ve}^2(1+v) + \frac{2}{3}K_{ve}(2-v)}; \\ k_2 &= \frac{\frac{1}{3}K_{ve} + \frac{v}{1+v}}{1-v + \frac{1}{3}K_{ve}^2(1+v) + \frac{2}{3}K_{ve}(2-v)}. \end{aligned} \quad (23)$$

Представление о величинах этих коэффициентов и их зависимости от упругой вязкости дают графики, рассчитанные при $\nu = 0.2$ (Рис. 6).

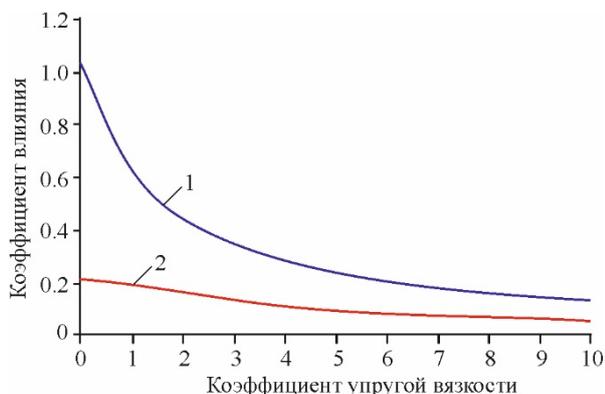


Рисунок 6. Графики зависимости коэффициентов влияния тектонических деформаций k_1 (1) и k_2 (2) от коэффициента упругой вязкости

Тектонические деформации могут быть как сжимающими, так и растягивающими. Горизонтальные напряжения могут превысить вертикальные и могут вызвать разрушения и складкообразование. В некоторых случаях появление растягивающих полных напряжений может привести к разрывам.

4. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В МАССИВАХ СО СЛОЖНОЙ ГИПСОМЕТРИЕЙ

Получить картину распределения напряжений в массивах горных пород с негоризонтальным залеганием слоев, с неоднородностями и складками с помощью замеров практически невозможно. Замерить напряжения можно лишь в ограниченном количестве точек и потому определить поле напряжений в таком массиве можно только с помощью математического моделирования.

Расчет напряжений сводится к решению краевой задачи для весомой среды с заданными условиями перемещений на ее границах. Полные деформации пород, накопившиеся за время формирования массива, складываются из упругой и вязкой составляющих. Оставаясь в рамках гипотезы среды с ограниченными линейно вязкими деформациями, учитывая соотношения (10), получим следующие выражения, связывающие компоненты полных и упругих деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \left(1 + \frac{2}{3}K_{ve}\right)\varepsilon_i^e - \frac{1}{3}K_{ve}\varepsilon_j^e - \frac{1}{3}K_{ve}\varepsilon_k^e; \\ \gamma_{ij} &= (1 + K_{ve})\gamma_{ij}^e, \quad (i, j, k = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (24)$$

Подставив в формулы (24) выражения для упругих деформаций через напряжения, получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{1 + \frac{2}{3}K_{ve}(1+\nu)}{E} \left[\sigma_i - \frac{\nu + \frac{1}{3}K_{ve}(1+\nu)}{1 + \frac{2}{3}K_{ve}(1+\nu)} (\sigma_j + \sigma_k) \right]; \\ \gamma_{ij} &= \frac{\tau_{ij}(1 + K_{ve})}{G}, \end{aligned} \quad (25)$$

где:

G – модуль сдвига.

Формулы (25) могут быть представлены в виде выражений, определяющих связь напряжений и деформаций в линейно упругих средах:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{1}{E_1} [\sigma_i - \nu_1 (\sigma_j + \sigma_k)]; \\ \gamma_{ij} &= \frac{\tau_{ij}}{G_1}, \end{aligned} \quad (26)$$

где:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E}{1 + \frac{2}{3}K_{ve}(1+\nu)}; \\ \nu_1 &= \frac{\nu + \frac{1}{3}K_{ve}(1+\nu)}{1 + \frac{2}{3}K_{ve}(1+\nu)}; \\ G_1 &= \frac{G}{1 + K_{ve}}, \end{aligned} \quad (27)$$

соответственно квазиупругие постоянные: модули продольной и поперечной деформации и модуль сдвига.

Учитывая соотношения (26) и (27), напряжения массива горных пород вне зон тектонических разрывов могут быть рассчитаны от действия собственного веса так же, как в упругой среде, в которой роль упругих модулей играют величины, зависящие от упругих и вязких параметров.

В зонах неоднородностей механических свойств пород может сформироваться напряженное состояние, при котором в течение длительного времени в породах возникнут условия нарушения прочности. Для таких случаев необходимы специальные подходы, учитывающие такие ситуации. Из решения задач для разрушающейся среды могут быть выявлены зоны ослаблений прочности.

Первичная трещиноватость осадочных (литогенетические трещины) и изверженных пород не зависит от напряжений, при моделировании эти дефекты среды должны задаваться в исходных данных о свойствах пород.

5. ОГРАНИЧЕНИЯ ДЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПО УСЛОВИЯМ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Породы в массиве обычно испытывают всестороннее сжатие. Под влиянием природных или инженерных факторов напряжения меняются, и при некоторых величинах и соотношениях компонентов напряжений порода возникают условия для разрушения. Разрушение происходит в результате сдвига по площадкам. Условие прочности горных пород на сдвиг при всестороннем сжатии определяется критерием Кулона-Мора* (*применение нелинейных критериев, которых в геомеханике много, не может повлиять на путь решения проблемы):

$$|\tau_n| \leq C + \sigma_n \tan \varphi, \quad (28)$$

где:

τ_n , σ_n – касательные и нормальные напряжения на площадке разрушения;

C – сцепление;

φ – угол внутреннего трения.

В терминах главных напряжений условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{\max} - \vartheta \sigma_{\min} < \sigma_c, \quad (29)$$

где:

σ_c – прочность при одноосном сжатии:

$$\sigma_c = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}; \quad (30)$$

ϑ – характеристика внутреннего трения:

$$\vartheta = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (31)$$

Из условия прочности (29) следует, что:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} < \vartheta + \frac{\sigma_c}{\sigma_{\min}}. \quad (32)$$

Это неравенство определяет предельное условие, как для коэффициента бокового распора, так и для отношения между горизонтальными напряжениями в главных направлениях.

Поскольку земная кора содержит зоны ослаблений прочности, сдвиги и плоские разрывы различных масштабов и ориентаций, на этих поверхностях напряжения ограничены силой трения (Zoback et al., 2003). Кроме того, в течение геологических периодов времени слои горных пород испытывали различные воздействия, которые привели к образованию в них локальных зон трещин, складчатости и других дефектов, которые могут вызвать снижение сцепления. На поверхностях ослаблений сцепление по контактам отдельностей практически отсутствует.

На участках слоев пород, затронутых влиянием ослаблений различных масштабов и ориентаций, условие прочности (32) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \leq \vartheta. \quad (33)$$

Таким образом, в массиве горных пород в среднем, исключая локальные зоны концентраций, соотношение между боковыми и вертикальными напряжениями ограничиваются условием:

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \leq \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (34)$$

Отсюда следуют, что в массивах горных пород с плоскими разно направленными нарушениями боковой распор ограничен условиями:

$$\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \leq \lambda \leq \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}. \quad (35)$$

Учитывая соотношение $\sin \varphi = \frac{\tan \varphi}{(1 + \tan^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}}$ и,

полагая $\mu = \tan \varphi$, условие (35) может быть записано в виде:

$$\left[\left(1 + \mu^2\right)^{\frac{1}{2}} + \mu^2 \right]^{-2} \leq \lambda \leq \left[\left(1 + \mu^2\right)^{\frac{1}{2}} + \mu^2 \right]^2. \quad (36)$$

При наличии напорных вод условие, ограничивающее соотношение между главными напряжениями, применимо для эффективных напряжений:

$$\frac{\sigma_{\max} - P}{\sigma_{\min} - P} \leq \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (37)$$

где:

P – поровое давление.

При $\varphi < 34^\circ$ из критериев (33) – (37) следует $\lambda = 0.3 \dots 3.5$, что согласуется с предельными величинами замеренных напряжений (Рис. 1).

6. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ЗАМЕРОВ В ОТДЕЛЬНЫХ ПУНКТАХ

6.1. Условие горизонтального залегания слоев пород

Массив горных пород обычно имеет слоистое строение. Породы слоев обладают различными деформационными и прочностными свойствами. Напряжения в разных слоях могут существенно отличаться не только в зависимости от глубины залегания, но и от свойств пород. Проведение замеров в каждом слое рассматриваемой области практически невозможно. Замеры напряжений выполняются в отдельных точках, обычно их значения не могут быть отнесены ко всей расчетной области.

Задача распределения напряжений во всех слоях пород рассматриваемой области решается, исходя из следующих данных. Замеры напряжений выполнены в слое пород на глубине H_z . Деформационные свойства пород: $E^{(0)}$, $\nu^{(0)}$, $K_{ve}^{(0)}$. В результате замеров определены главные направления и напряжения в горизонтальной плоскости $\sigma_x^{(0)}$ и $\sigma_y^{(0)}$. Вертикальная составляющая напряжений ($\sigma_z^{(0)}$) определяется весом пород налегающей толщи.

Учитывая (19), гравитационная составляющая бокового распора в точке замера напряжений определяется по формуле:

$$\sigma_G^{(0)} = \sigma_z^{(0)} \frac{\nu^{(0)} + \frac{1}{3} K_{ve}^{(0)} (1 + \nu^{(0)})}{1 - \nu^{(0)} + \frac{1}{3} K_{ve}^{(0)} (1 + \nu^{(0)})}. \quad (38)$$

При этом тектонические составляющие по главным направлениям:

$$\sigma_x^T = \sigma_x^{(0)} - \sigma_G^{(0)}; \quad \sigma_y^T = \sigma_y^{(0)} - \sigma_G^{(0)}. \quad (39)$$

Учитывая тектоническую составляющую бокового распора (22), определяются главные тектонические деформации в месте замера:

$$t_x = \frac{(\sigma_x^T k_1 + \sigma_y^T k_2)}{[E^{(0)}(k_1^2 - k_2^2)]}; \quad (40)$$

$$t_y = \frac{(\sigma_y^T k_1 + \sigma_x^T k_2)}{[E^{(0)}(k_1^2 - k_2^2)]},$$

где:

k_1, k_2 определены по формулам (23) при подстановке в них значений $\nu^{(0)}$ и $K_{ve}^{(0)}$.

Боковые тектонические напряжения в каждом из слоев геологического разреза определяются по формулам (22) при подстановке соответствующих параметров деформационных свойств пород. При этом напряжения в слоях следующие:

$$\sigma_x = \sigma_G + E[k_1(\nu, K_{ve})t_x + k_2(\nu, K_{ve})t_y];$$

$$\sigma_y = \sigma_G + E[k_1(\nu, K_{ve})t_y + k_2(\nu, K_{ve})t_x]; \quad (41)$$

$$\sigma_z = \bar{\rho}gh,$$

где:

σ_G – гравитационная составляющая напряжений бокового распора в рассматриваемых слоях, определяемая с учетом параметров свойств пород в этих слоях:

$$\sigma_G = \sigma_z \frac{\nu + \frac{1}{3} K_{ve} (1 + \nu)}{1 - \nu + \frac{1}{3} K_{ve} (1 + \nu)}, \quad (42)$$

где:

$\bar{\rho}$ – плотность пород (средняя от рассматриваемого слоя до поверхности);

g – ускорение свободного падения;

h – глубина.

Рассчитанные напряжения (41) корректируются с учетом условий (33) – (37).

На Рисунке 7 приведен пример распределения напряжений по глубине в неоднородном массиве пород, рассчитанных при следующих деформационных и прочностных свойствах пород в рассматриваемой части массива (Табл. 1):

Таблица 1. Свойствах горных пород в рассматриваемой части массива

Порода	E , МПа	ν	φ°	K_{ve}
Порода 1	970	0.22	35	2.0
Порода 2	8300	0.19	27	4.0
Порода 3	1640	0.25	30	2.0
Порода 4	8000	0.25	30	4.0

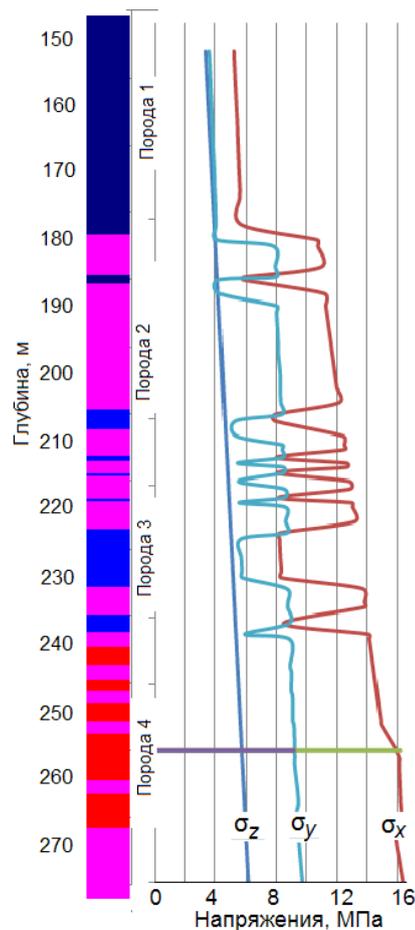


Рисунок 7. Распределение напряжений в массиве пород с горизонтальным залеганием слоев пород, рассчитанных по определению в одной точке

Определение выполнено на глубине 256 м в 4 породах. Получены следующие значения напряжений в горизонтальной плоскости $\sigma_x^{(0)} = 16.2$ МПа, $\sigma_y^{(0)} = 9.2$ МПа. При вертикальных напряжениях около 5.8 МПа напряжения в горизонтальной плоскости свидетельствуют о наличии тектонической составляющей.

Графики (Рис. 7) показывают, что в неоднородном массиве пород при наличии тектонической составляющей в горизонтальной плоскости напряжения меняются по глубине скачками в зависимости от деформационных свойств пород в слоях.

Приведем пример численного эксперимента, иллюстрирующего влияние тектонических напряжений на деформирование массива горных пород. Методом конечных элементов моделируется деформирование массива горных пород от влияния отработки пласта руды мощностью 2.5 м одиночной лавой. На Рисунке 8 приведены результаты расчетов в трех вариантах: 1 – тектонические напряжения отсутствуют; 2 – замеренные напряжения в горизонтальной плоскости меньше на 40% вертикальной составляющей; 3 – замеренные напряжения в горизонтальной плоскости больше вертикальной составляющей в 1.4 раза.

Результаты моделирования рассмотренных вариантов показали, насколько существенным или несущественным может оказаться влияние тектонических напряжений.

Картины распространения зон ориентированных ослаблений в породах в приведенных вариантах отличаются. Существенную роль тектонические напряжения играют в деформировании толщи подстилающих пород. При повышенных напряжениях бокового распора проявляется ситуация “выдавливания клина”.

Если задача эксперимента – определение высоты распространения водопроводящих трещин в налегающих породах, то при заданных условиях можно говорить о несущественности этого влияния. В рассмотренных вариантах расчета высота зон распространения трещин находится в пределах 60 – 70 м.

6.2. Условия сложной гипсометрии

В массиве пород, имеющем сложное строение: наклонное и волнистое залегание слоев, переменную толщину слоев, включения различных типов пород, – главные направления тензора напряжений не совпадают с направлениями вертикали и горизонталей и меняются от точки к точке. Для такого массива расчет напряжений может быть выполнен только при решении задач механики с заданными краевыми и начальными условиями.

Рассматриваются следующие условия. В области массива пород наклонные слои с различными свойствами имеют переменную толщину. В одном из слоев (в точке S) выполнено определение напряжений. Параметры свойств пород слоя: $E^{(0)}, \nu^{(0)}, K_{ve}^{(0)}$; определенные напряжения: $\sigma_x^{(0)}, \sigma_y^{(0)}, \sigma_z^{(0)}$ (Рис. 9).

Напряженное состояние определяется путем последовательного решения двух краевых задач.

На первом этапе решается краевая задача для весовой среды с заданием условия запрещения перемещений по горизонтальным направлениям на левой и правой границах области.

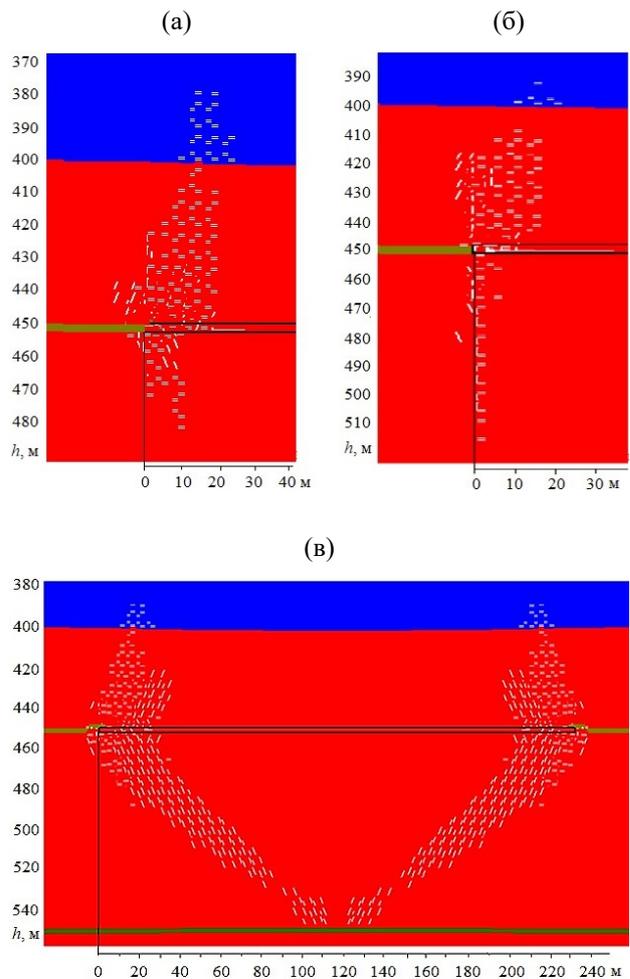


Рисунок 8. Расчетные картины нарушений вмещающих пород в результате отработки пласта одиночной лавой (штрихи белого цвета показывают положение и ориентацию нарушений): (а) при отсутствии тектонических напряжений; (б) при горизонтальных напряжениях $0.6 \rho gh$; (в) при горизонтальных напряжениях в 1.4 раза больше ρgh (по вертикальной оси расстояние до поверхности)

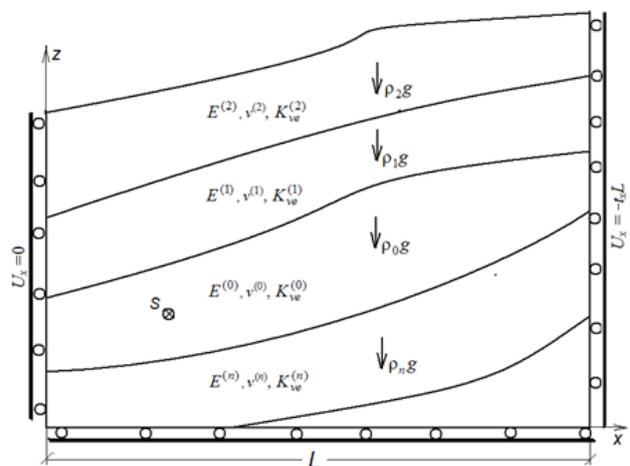


Рисунок 9. Схема условий краевой задачи для расчета напряжений в массиве пород в плоскости $(x - z)$

Свойства пород в слоях принимаются как для квазиупругой среды, параметры свойств которой определяются выражениями (27). В результате решения задачи получается распределение напряжений в массиве пород без учета тектонического фактора. При этом в точке замера рассчитываются гравитационные напряжения: $\sigma_x^{(g)}$, $\sigma_y^{(g)}$, $\sigma_z^{(g)}$. Разность замеренных и гравитационных напряжений определяют тектоническую составляющую в этой точке:

$$\begin{aligned} \sigma_x^T &= \sigma_x^{(0)} - \sigma_x^{(g)}; \\ \sigma_y^T &= \sigma_y^{(0)} - \sigma_y^{(g)}; \\ \sigma_z^T &= \sigma_z^{(0)} - \sigma_z^{(g)}. \end{aligned} \quad (43)$$

Воспользовавшись формулами (26) рассчитываются деформации в горизонтальной плоскости в точке S , вызванные тектоническим фактором (t_x и t_y).

На втором этапе решается задача для весомой среды с заданными перемещениями по боковой границе, обеспечивающие тектонические деформации в горизонтальной плоскости t_x и t_y . На Рисунке 9 приведена расчетная схема для условий плоской деформации. При решении задачи для пространственного случая условия по перпендикулярной оси y формулируются как для оси x . Свойства среды принимаются как для первой задачи – массив с квазиупругими свойствами, параметры которых определяются по формулам (27).

Необходимость соблюдения условия (33) – (37) требует выполнения проверки и корректировки напряжений, рассчитанных с учетом тектоники. При этом задача второго этапа решается с учетом возможности пластических деформаций и разрушения с соответствующими критериями для пород всех слоев (33).

Приведем примеры численного эксперимента, иллюстрирующего влияние тектонических напряжений на деформирование массива горных пород с холмистым рельефом (Рис. 10).

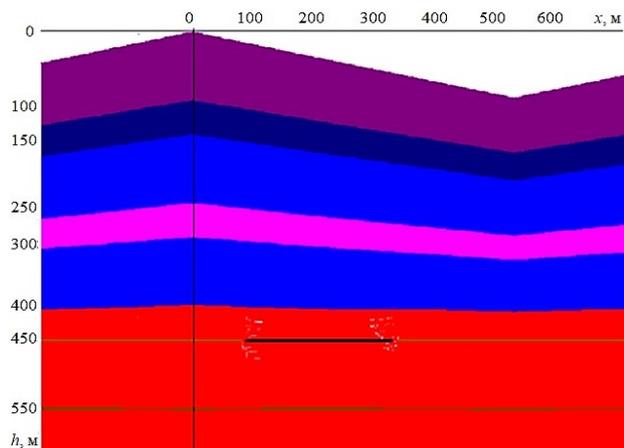


Рисунок 10. Геологический разрез с холмистым рельефом (на глубине 450 м пласт руды)

Методом конечных элементов моделируется деформирование массива горных пород от влияния отработки одиночной лавой пласта руды мощностью 2.5 м. Рассмотрены два варианта: в первом варианте напряженное состояние массива пород рассчитано только от влияния сил гравитации, во втором – от веса

пород и горизонтальных сжимающих тектонических деформаций в плоскости рассматриваемого разреза.

В первом варианте напряженное состояние пород в слое руды характеризуют графики главных напряжений (Рис. 11). В этом случае направление максимальных напряжений близко к вертикальному. Моделирование показало, что картина нарушений пород вблизи концов лавы, расположенных ближе к вершине холма или ближе к впадине, отличаются несущественно (Рис. 12). В обоих случаях верхняя граница зон трещин достигает отметки 400 м.

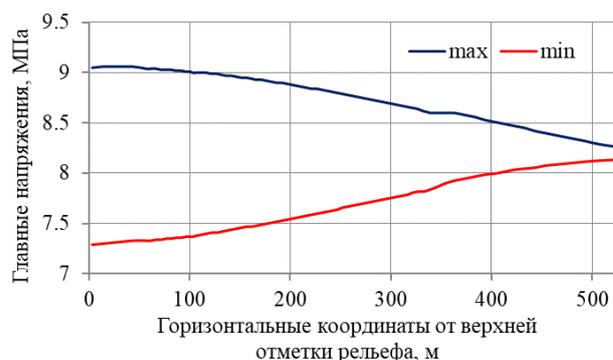


Рисунок 11. Распределение главных напряжений в пласте руды при отсутствии тектонических деформаций (направление максимальных напряжений близко к вертикальному)

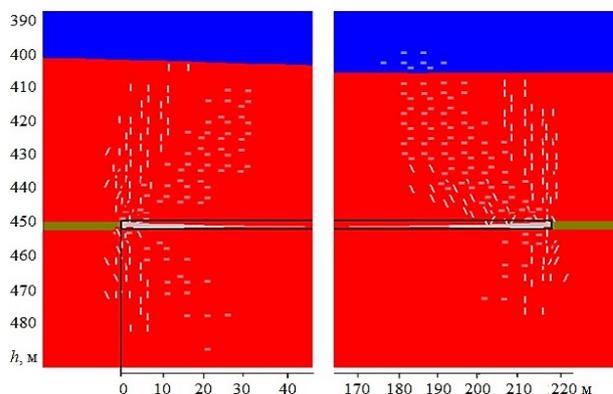


Рисунок 12. Расчетные картины нарушений вмещающих пород над и под границами лавы при отсутствии тектонических деформаций

Рассмотрим пример с тектоническими деформациями по горизонтали в рассматриваемой плоскости 0.01 у.е. Распределение напряжений вдоль пласта руды приведено на Рисунке 13. В этом случае максимальные напряжения ориентированы по горизонтали. При этом горизонтальные напряжения вдвое больше, чем при отсутствии тектонических деформаций.

Можно сказать, что картины нарушений пород вмещающего массива вблизи границ лавы при наличии тектонических сил и без них отличаются незначительно (Рис. 14). Основное отличие наблюдается в подработанном массиве пород, в котором при наличии тектонических деформаций площадь зоны нарушений существенно больше по ширине. В рассмотренном примере влияние тектоники на высоту распространения зон трещин не существенно.

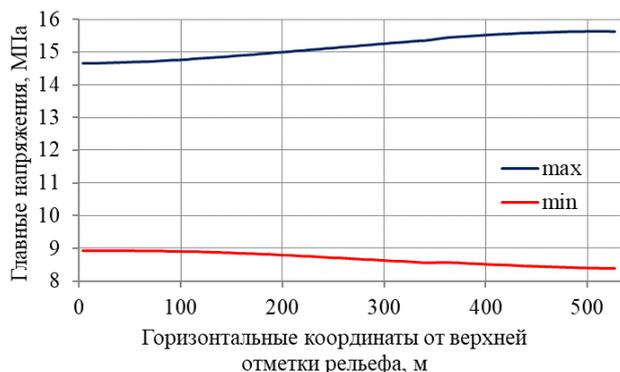


Рисунок 13. Распределение главных напряжений в пласте руды, рассчитанных с учетом тектонических деформаций 0.01 у.е. (максимальные напряжения ориентированы вблизи горизонтали)

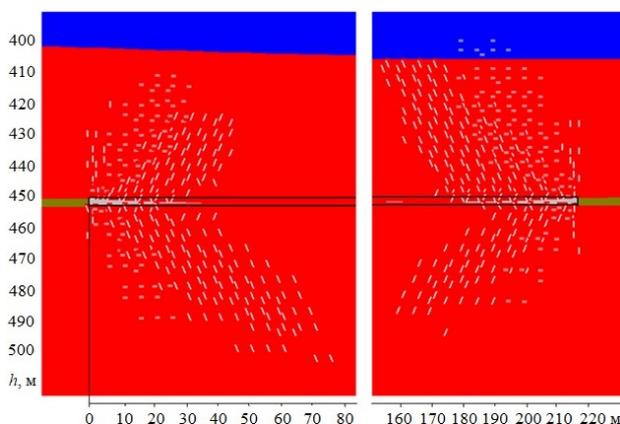


Рисунок 14. Расчетные картины нарушений вмещающих пород над и под границами лавы при наличии горизонтальных тектонических деформаций 0.01 у.е.

Примечание. Численный эксперимент выполнен для условия мгновенного образования выработки в направлении поперек плоскости рассматриваемого разреза. При этом моделирование не учитывает разрушения пород над обрабатываемым пластом в забое лавы во время проходки. В задачу моделирования входило исследование влияния тектонических напряжений на нарушения вмещающего массива, которые максимальны вдоль постоянных границ выработок.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Действующие напряжения в массиве пород служат важнейшим фактором, влияющим на геомеханические процессы вокруг горных выработок. При математическом моделировании они определяют начальные условия постановки задач.

Напряженное состояние формируется главным образом под влиянием гравитационных и тектонических сил.

Все горные породы обладают вязкими свойствами, у многих из них при длительном нагружении в стесненных условиях вязкие деформации ограничены. Из решения задачи о поведении элемента массива горных пород с ограниченными вязкими деформациями получена зависимость напряжений бокового распора как реактивного отпора при действии грави-

тационных сил. Коэффициент бокового распора в однородных породах и с горизонтальным залеганием слоев определяется по формуле (19).

Гравитационная составляющая коэффициента бокового распора не зависит от глубины, но зависит от коэффициентов Пуассона и коэффициента упругой вязкости, который определяется пределом отношения вязкоупругой и упругой сдвиговых деформаций.

Тектонические напряжения появляются вследствие взаимодействия тектонических плит, образующих земную кору. Принимая во внимание, что деформации в тектонических плитах на участках без разломов и складчатости распределяются по глубине практически равномерно, напряжения в них зависят от горизонтальных тектонических деформаций и упругих свойств пород. Исходя из условия ограниченности вязких деформаций, получена зависимость тектонических напряжений от тектонических деформаций в горизонтальной плоскости.

Коэффициент бокового распора на участках с тектоническими деформациями выражается суммой гравитационной и тектонической составляющих. При этом если гравитационная часть не зависит от глубины, то тектоническая в гиперболической связи с ней. Гиперболическая связь тектонической составляющей бокового распора определяет закономерность зависимости напряжений от глубины, этот вывод совпадает с известными результатами полевых определений напряжений.

Рассмотрена проблема моделирования напряженного состояния в массивах пород с простой и сложной гипсометрией. Учитывая линейный характер вязких деформаций в неразрушающихся породах, получены уравнения, связывающие напряжения и полные деформации, как для квазиупругой среды. Для массивов пород со сложной гипсометрией и неоднородными свойствами напряжения в массиве могут быть рассчитаны как в упругой среде с приведенными квазиупругими модулями, которые рассчитываются в зависимости от параметров упругих и вязких свойств.

Измерение напряжений в массивах пород техническими средствами возможно только в отдельных точках. В работе показано, что с помощью полученных зависимостей для гравитационной и тектонической составляющих бокового распора можно рассчитать поле напряжений в неоднородном массиве горных пород по замеренным напряжениям в одном пункте.

В пункте замера рассчитывается гравитационная составляющая напряжений, вызванных весом пород налегающей толщи с учетом упругих и вязких свойств горных пород. Тектоническая составляющая напряжений в точке замера определяется разностью замеренных и гравитационных напряжений. Учитывая полученные величины тектонических напряжений, рассчитываются тектонические деформации, влияние которых определяет напряженное состояние в области, окружающей точку замера напряжений.

При горизонтальном залегании слоев пород тектоническая составляющая деформаций относится ко всем породам в разрезе. Напряжения в слоях рассчитываются в зависимости от тектонических деформаций и деформационных свойств пород.

При сложном строении тектонические деформации прикладываются к объему, окружающему пункт замера. В таком массиве напряжения рассчитываются из решения краевых задач, учитывающих собственный вес пород и тектонические деформации, рассчитанные в пункте определения напряжений.

Соотношения между рассчитанными напряжениями ограничиваются условиями прочности, учитывающими возможность разрывов и ослаблений прочности на границах отдельностей разных масштабов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Результаты данных исследований получены благодаря частичной поддержке Института геологии окружающей среды Российской академии наук и Института минерально-солевого производства (АО "ВНИИ Галургии").

REFERENCES

- Amadei, B. (1996). Importance of Anisotropy When Estimating and Measuring in situ Stress in Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(3), 293-325.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(95\)00062-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(95)00062-3)
- Amadei, B., & Stephansson, O. (1997). *Rock Stress and Its Measurement*. London and New York: Chapman & Hall.
<https://doi.org/10.1007/978-94-011-5346-1>
- Baryakh, A.A., Konstantinova, S.A., & Asanov, V.A. (1996). *Deformirovanie solyanykh porod*. Ekaterinburg: UrO RAN.
- Brady, B., & Brawn, E. (2004). *Rock Mechanics for Underground Mining*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Brown, E.T., & Hoek, E. (1978). Trends in Relationships Between Measured in-situ Stresses and Depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(4), 211-215.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91227-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91227-5)
- Cartwright, P.B. (1997). A Review of Recent in situ Stress Measurements in United Kingdom Coal Measure Strata. In *Proceedings of the International Symposium on Rock Stress* (pp. 469-482). Rotterdam: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group.
- Glushko, V.T., & Vinogradov, V.V. (1982). *Razrusheniye gornyykh porod i prognozirovaniye proyavleniy gornogo davleniya*. Moskva: Nedra.
- Gzovskiy, M.V. (1975). *Osnovy tektonofiziki*. Moskva: Nauka.
- Heim, A. (1878). *Untersuchungen uber den Mechanismus der Gebirgsbildung*. Basel: Schwabe.
- Herget, G. (1987). Stress Assumptions for Underground Excavations in the Canadian Shield. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 24(1), 95-97.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(87\)91238-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(87)91238-1)
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., & Zimmerman, R.W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*. Hoboken: Blackwell Publishing.
- Kartashov, Yu.M., Matveev, B.V., Mikheev, G.V., & Fadeev, A.B. (1979). *Prochnost' i deformiruemost' gornyykh porod*. Moskva: Nauka.
- Leont'yev, A.V. (2001). Analiz estestvennykh napryazheniy po rezul'tatam izmereniy v rudnikakh na territorii Severnoy Evrazii. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*, (1), 31-40.
- Lo, K.Y. (1978). Regional Distribution of in-situ Horizontal Stresses in Rocks of Southern Ontario. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 371-381.
<https://doi.org/10.1139/t78-034>
- Markov, G.A. (1977). *Tektonicheskie napryazheniya i gornoe davlenie v rudnikakh Khibinskogo massiva*. Leningrad: Nauka.
- McCutchen, W. R. (1982). Some Elements of a Theory of in situ Stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 19(4), 201-203.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(82\)90890-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(82)90890-7)
- Olovyannyi, A.G. (2012). *Mekhanika gornyykh porod. Modelirovaniye razrusheniy*. Sankt-Peterburg: IPK Kosta.
- Olovyannyi, A.G. (2016). Bokovoy raspор i tektonicheskie napryazheniya v massive gornyykh porod. *Gornyy Zhurnal*, (6), 25-31.
- Petukhov, I.M., & Batugina, I.M. (1999). *Geodinamika nedr*. Sankt-Peterburg: Mig.
- Savchenko, S.N., Kozyrev, A.A., & Mal'tsev, V.A. (1994). Napryazhennoe sostoyaniye porod blochnogo stroeniya razlichnykh masshtabnykh urovney. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*, (6), 24-29.
- Savchenko, S.N. (2004). Otsenka napryazhennoy sostoyaniya gornyykh porod v rayone bureniya Kol'koy sverkhglubokoy skvazhiny. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*, (1), 27-34.
- Sheorey, P.R. (1994). A Theory for in situ Stresses in Isotropic and Transversely Isotropic Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 31(4), 193.
[https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)91070-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)91070-7)
- Sheorey, P.R., Murali Mohan, G., & Sinha, A. (2001). Influence of Elastic Constants on the Horizontal in situ Stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(8), 1211-1216.
[https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(01\)00069-7](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(01)00069-7)
- Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollimund, B.R., ... & Wiprut, D.J. (2003). Determination of Stress Orientation and Magnitude in Deep Wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7-8), 1049-1076.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.001>

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Напряженное состояние в массиве горных пород является важнейшим фактором, влияющим на процессы вокруг горных выработок. Применяемые методы расчета напряжений, основанные на гипотезах упругого распора, гидростатического состояния или сферического равновесия земной коры, не учитывают тектонические процессы и влияние вязких свойств горных пород на формирование полей напряжений. Ставится цель разработать методы расчета напряженного состояния в массивах горных пород в зависимости от упругих и вязких свойств пород и взаимодействия тектонических плит по замерам в отдельных пунктах.

Методика. Условия формирования напряженного состояния в массивах пород от влияния гравитации моделируется при осевом сжатии цилиндрического образца с запрещенными боковыми перемещениями. Из решения задачи о деформировании такого образца получены отношения осевых напряжений к боковым, которые определяют коэффициент бокового распора в массиве горных пород. Влияние вязких свойств пород определяется коэффициентом упругой вязкости, который равен предельной величине отношения вязкоупругих и упругих

деформаций. Тектоническая составляющая напряженного состояния массива горных пород определяется величинами деформаций в горизонтальной плоскости, вызванными взаимодействием тектонических плит. В связи с длительностью протекания тектонических процессов тектоническая составляющая боковых напряжений также зависит от вязких и упругих деформаций.

Результаты. Гравитационная составляющая коэффициента бокового распора с глубиной не меняется, тектоническая составляющая обратно пропорциональна глубине. Рост коэффициента бокового распора при приближении к поверхности, определенный замерами, объясняется влиянием тектонической составляющей напряжений.

Научная новизна. Экспериментальные замеры напряжений возможны лишь в ограниченном количестве точек. Для определения поля напряжений в массивах с негоризонтальным залеганием, с неоднородностями и складками, другого способа, кроме математического моделирования, нет. В рамках гипотезы среды с ограниченными линейно вязкими деформациями получены выражения, связывающие компоненты напряжений с полными и упругими деформациями. Приведен способ постановки и решения задач моделирования напряженного состояния с привлечением уравнений состояния горного массива как среды с квазиупругими свойствами. Гравитационная составляющая задается весом пород, а влияние тектоники – тензором тектонических деформаций.

Практическая значимость. Предложен способ решения задачи для определения поля напряжений в массиве пород с учетом замеренных напряжений в отдельных пунктах.

Ключевые слова: породы, напряженное состояние, боковое расширение, тектонические деформации, тектонические напряжения, математическое моделирование

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Напружений стан в масиві гірських порід є найважливішим фактором, що впливає на процеси навколо гірничих виробок. Застосовувані методи розрахунку напружень, засновані на гіпотезах пружного розпору, гідростатичного стану або сферичної рівноваги земної кори, не враховують тектонічні процеси і вплив в'язких властивостей гірських порід на формування полів напружень. Ставиться за мету розробити методи розрахунку напруженого стану в масивах гірських порід в залежності від пружних і в'язких властивостей порід і взаємодії тектонічних плит за вимірами в окремих пунктах.

Методика. Умови формування напруженого стану в масивах порід від впливу гравітації моделюється при осьовому стисненні циліндричного зразка із забороненими бічними переміщеннями. З рішення задачі про деформацію такого зразка отримані відношення осьових напружень до бічних, що визначають коефіцієнт бічного розпору в масиві гірських порід. Вплив в'язких властивостей порід визначається коефіцієнтом пружної в'язкості, що дорівнює граничній величині відношення в'язкопружних і пружних деформацій. Тектонічна складова напруженого стану масиву гірських порід визначається величинами деформацій у горизонтальній площині, викликаними взаємодією тектонічних плит. У зв'язку з тривалістю протікання тектонічних процесів тектонічна складова бічних напружень також залежить від в'язких і пружних деформацій.

Результати. Гравітаційна складова коефіцієнта бічного розпору з глибиною не змінюється, тектонічна складова обернено пропорційна глибині. Зростання коефіцієнта бічного розпору при наближенні до поверхні, визначеного вимірами, пояснюється впливом тектонічної складової напружень.

Наукова новизна. Експериментальні виміри напружень можливі лише в обмеженій кількості точок. Для визначення поля напружень в масивах з негоризонтальним заляганням, з неоднорідностями і складками, іншого способу, окрім математичного моделювання, немає. В рамках гіпотези середовища з обмеженими лінійно в'язкими деформациями отримані вирази, що зв'язують компоненти напружень з повними і пружними деформациями. Наведено спосіб постановки і рішення задач моделювання напруженого стану із залученням рівнянь стану гірського масиву як середовища з квазіпружними властивостями. Гравітаційна складова задається вагою порід, а вплив тектоники – тензором тектонічних деформацій.

Практична значимість. Запропоновано спосіб рішення задачі для визначення поля напружень в масиві порід з урахуванням заміряних напружень в окремих пунктах.

Ключові слова: породи, напружений стан, бокове розширення, тектонічні деформації, тектонічні напруження, математичне моделювання

ARTICLE INFO

Received: 11 August 2017

Accepted: 14 September 2017

Available online: 30 September 2017

ABOUT AUTHORS

Anatoliy Olovyannyy, Candidate of Technical Sciences, Principal Researcher of the Saint-Petersburg Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Institute of Geocology named after E.M. Sergeev of the Russian Academy of Sciences, 41 Srednii Ave., 519, 190004, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: agolov@hgepro.ru