

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Тажиббаев К. Т., Султаналиева Р.М.

*Институт геомеханики и освоения недр НАН КР, kushbak@yandex.ru,
Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,
Бишкек, Кыргызская Республика, raia-ktu@mail.ru*

Приведены методы и результаты определения действующих и остаточных напряжений в горных породах удароопасных и сейсмоактивных участков породного массива.

Methods and results of definition of operating and residual stresses in rocks dangerous on rock burst and seismoactive sites of a file of rocks are resulted.

Горные породы представляют собой сложные гетерогенные природные образования. В таких многокомпонентных средах, образовавшихся из расплавленных магм и термальных растворов, при последующем неравномерном охлаждении формируются остаточные напряжения. Такие напряжения могут образовываться также и при неоднородных упругопластических деформациях. Исследования остаточных напряжений в металлах и технических материалах проводятся с давних пор, а в горных породах такие исследования были проведены Влохом Н.П., Липиным Я.М. и Сашуриным А.Д. в 1970 годы [1, 2, 4].

М. Фридман [5] показал, что метод разгрузки и метод дифракции рентгеновских лучей при измерении остаточных напряжений дают близко совпадающие результаты. Он показал, что ориентация остаточных напряжений хорошо согласуется с элементами структуры массива, из которого для исследования отбирались соответствующие блоки горных пород.

Экспериментальные измерения (методом полной разгрузки) действующих в породных массивах горно-складчатых областей сейсмоактивных регионов Средней Азии напряжений, выполненные нами показали значительную неоднородность напряженного состояния, и, как свидетельствуют результаты, часто горизонтальные напряжения превышали вертикальные, что не укладывается в рамки существующих теоретических положений.

В итоге многолетних экспериментальных исследований напряженного состояния удароопасных рудных месторождений Средней Азии было установлено, что в сейсмоактивных зонах и на удароопасных участках шахтных полей рудных и угольных месторождений пространственное распределение действующих напряжений неоднородное и имеет периодический характер. Было экспериментально доказано, что неоднородность, а иногда знакопеременность действующих в массиве напряжений обусловлена наличием в сейсмоактивных зонах неоднородного поля остаточных напряжений, так как колебательный (периодический) характер пространственного распределения действующих напряжений по фазе совпадает с характером распределения остаточных напряжений [6].

Тажиббаевым К.Т.[8] была разработана структурная модель квазиизотропной горной породы, где показано, что реальная среда – массив горных пород представляет собой единство непрерывности (континуум) и дискретности, т.е. дискретно – связанную среду. Предлагается рассмотреть горную породу, при изучении процессов ее деформирования и разрушения, как конструкцию, состоящую из определенно расположенных и связанных по локальным участкам структурных элементов, где приложенная извне нагрузка распределяется согласно строению этой внутренней конструкции. В предложенной модели рассматриваются структурные иерархические уровни с присущими каждому из них неоднородностями (дефектами). Согласно иерархической системе структурных уровней, каждый вышестоящий уровень включает элементы структуры всех нижестоящих уровней, т.е. согласно структурной модели, тектоническая плита сложена из блоков, блоки в свою очередь состоят из зерен, зерна составлены из кристаллических отдельных и, наконец, кристалличе-

ские отдельности состоят из атомов и молекул. Естественно при соответствующем масштабе рассмотрения для каждого структурного элемента присуще соответствующие по величине напряжения.

Как известно, измеренное в породном массиве методом разгрузки «действующее» напряжение представляет собой сумму всех напряжений (разгрузка от гравитационных, остаточных и других напряжений) первого рода.

Рассматривая породный массив как упругую однородную среду, А.Н. Динник в свое время получил следующее решение задачи о напряженном состоянии:

$$\sigma_z = \gamma H \quad (1), \quad \sigma_x = \sigma_y = m\sigma_z = m\gamma H = \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma H \quad (2)$$

где $m = \mu / (1 - \mu)$ – коэффициент бокового распора;

μ – коэффициент Пуассона горной породы; H – рассматриваемая глубина;

γ – среднее значение объемного веса рассматриваемых горных пород;

σ_z – вертикальная составляющая действующего (измеренного) нормального напряжения;

σ_y, σ_x – горизонтальные составляющие действующего нормального напряжения по соответствующим направлениям.

Поскольку коэффициент бокового распора меньше единицы, то по вышеуказанным формулам горизонтальные составляющие напряжения всегда меньше чем вертикальные. Однако при многочисленных инструментальных измерениях напряжений было установлено, что горизонтальные составляющие напряжения нередко превышают вертикальные, часто вертикальное составляющее также не соответствовало расчетным данным. В большей мере несоответствия были характерны сейсмоактивным горным регионам, а в пределах шахтного поля – удароопасным участкам магматических и гидротермальных образований. Эти несоответствия вызваны, прежде всего, тем, что теория упругости и существующие методы расчета не учитывают начальное имеющиеся остаточные напряжения, обусловленные геологической историей, термомеханическими условиями формирования породного массива, а также неоднородностью его вещественного состава и структуры.

Экспериментально измеренное по деформациям действующее в породном массиве напряжение, как указано выше, представляет собой сумму всех имеющихся напряжений в момент измерения. Для общего случая предлагаем определять действующее (результатирующее) напряжение по следующей формуле:

$$\sigma_u = \sigma_o + \sigma_z + \sigma_t + \sigma_n \quad (3)$$

где σ_u – измеренное (действующее) нормальное напряжение;

σ_z – гравитационное напряжение; σ_o – остаточное напряжение;

σ_t – термическое напряжение; σ_n – приливное напряжение, обусловленное силами межпланетарного взаимодействия.

В уравнении 3 отсутствие так называемого тектонического напряжения объясняется тем, что это напряжение рассматривается как напряжение, возникающее от стационарной долговременной разгрузки (релаксация) остаточных напряжений. Тектонические процессы – это, главным образом, горизонтальные перемещения тектонических плит в результате релаксации остаточных напряжений на их границах [6,9]. И по терминологии тектоническое напряжение определяется как «напряжения в горных породах, возникающее при протекании тектонических процессов, а также остаточное напряжение от заканчивающихся тектонических процессов» (Терминологический словарь. М.: Недра, 1974). Термическое напряжение, как известно, может иметь существенное значение только в зонах повышенных температур (более 100°C). Приливное напряжение не регулярное и по сравнению с гравитационными или остаточными напряжениями имеют весьма малое значение, поэтому термическим и приливным напряжением можно пренебречь при решении инженерных задач.

Исходя из указанного, для сейсмоактивных зон породного массива, где нет повышенных (по сравнению с обычной температурой разрабатываемых месторождений) температур, действующее (результатирующее) напряжение можно определить по формуле:

$$\sigma_e = \sigma_o + \sigma_{\tilde{a}} \quad (4)$$

или $\sigma_z = \sigma_{oz} - \sigma_{zz} = \sigma_{oz} - \gamma H$

$$\sigma_x = \sigma_{ox} + \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma H, \quad \sigma_y = \sigma_{oy} + \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \gamma H \quad (5)$$

(вертикальное составляющее гравитационного напряжения всегда сжимающее, т.е. имеет отрицательный знак, а горизонтальное имеет положительный знак), где $\sigma_{oz}, \sigma_{ox}, \sigma_{oy}$ – остаточные напряжения по направлению X, Y, Z соответственно.

Необходимо отметить, что измеренные в блоках, кусках, кернах (по деформациям горных пород) остаточные напряжения, всегда меньше, чем остаточные напряжения в массиве, так как при отделении кусков от массива происходит разгрузка всех видов напряжений, в том числе частично остаточных. Поэтому остаточное напряжение следует представить как:

$$\sigma_o = \sigma_{uo} \cdot K_p \quad (6)$$

где σ_{uo} – измеренное в куске (керне, образце) горной породы остаточное напряжение;

K_p – коэффициент разгрузки остаточного напряжения.

Результаты экспериментальных исследований показали, что для условий повторной разгрузки кернов с диаметрами 60 мм. (путем бурения внутреннего керна с диаметром 40мм.) $K_p = 3$.

С учетом значения данного коэффициента равенства 4 и 5 можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= 3\sigma_{z\bar{a}} + \sigma_{\bar{a}} \quad \text{или} \quad \sigma_z = 3\sigma_{uoz} - \gamma H, \\ \sigma_x &= 3\sigma_{uox} + \left[\frac{\mu}{(1-\mu)} \right] \cdot \gamma H, \quad \sigma_y = 3\sigma_{uoy} + \left[\frac{\mu}{(1-\mu)} \right] \cdot \gamma H \end{aligned} \quad (7)$$

где $\sigma_{uoz}, \sigma_{uox}, \sigma_{uoy}$ – измеренные по деформациям в куске горной породы остаточные напряжения по соответствующим направлениям.

В стадии геологической разведки и проектирования разработки месторождений практически невозможно определить напряжения на различных глубинах, хотя для геомеханической части проекта необходимы и всегда не хватает сведений о напряженном состоянии породного массива. В связи с этим для сейсмогенных горных регионов предлагаем определить остаточные напряжения методами разгрузки или рентгенографии в кернах пород во всех трех направлениях для данной глубины и затем рассчитать действующие в породном массиве напряжения по предложенным формулам

(7). Следует отметить, что для расчетов напряжений определяются и учитываются остаточные напряжения первого рода.

Результаты исследований. Результаты сравнения расчетных данных напряжений (формула 7) с экспериментальными данными, полученными для Восточно-Коунрадского месторождения (шахта №6, горизонт 220 м, $\gamma_{cp} = 2,7 \text{ т/м}^3$, $H = 220 \text{ м}$, $\mu = 0,25$) показали их достаточное соответствие (рис. 1.; 2).

Из рисунков 1и 2 видно, что формулы хорошо описывают даже случаи скачкообразного и знакопеременного изменения напряжения. Следует также отметить, что напряжения, измеренные в массиве, и остаточные напряжения, измеренные в кернах, отобранных из участков замера действующих напряжений в массиве, по длине скважины изменяются периодически и согласованно между собой, совпадая по фазе.

Наряду с вышеуказанным подходом, когда напряжение породного массива можно определить по величине остаточных напряжений, определяемых методом полной разгрузки в кернах и расчетным данным по формуле 7, для определения остаточных напряжений на разных масштабных уровнях, т.е. на разных структурных элементах, нами были определены остаточные напряжения первого, второго и третьего рода методом рентгеноскопии.

Экспериментальные и расчетные значения действующих в массиве горных пород напряжений (Восточный Коунрад, шахта 6, гор.220, квершлаг 1, жила 5, вертикальная скважина, σ_1 , 1-экспериментальное, 2-расчетное)

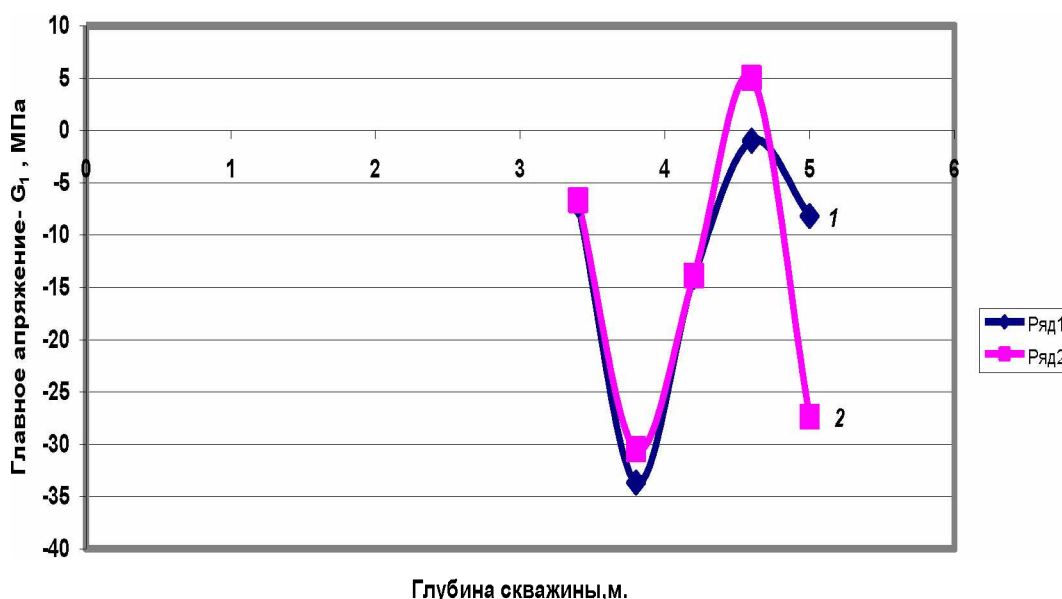


Рисунок 1 - Расчетные и экспериментальные значения напряжений (вертикальная скважина)

Экспериментальные и расчетные значения действующих в массиве горных пород напряжений (Восточный Коунрад, шахта 6, гор.220, квершлаг 1, жила 5, горизонтальная скважина, σ_3 , 1-экспериментальное, 2-расчетное)

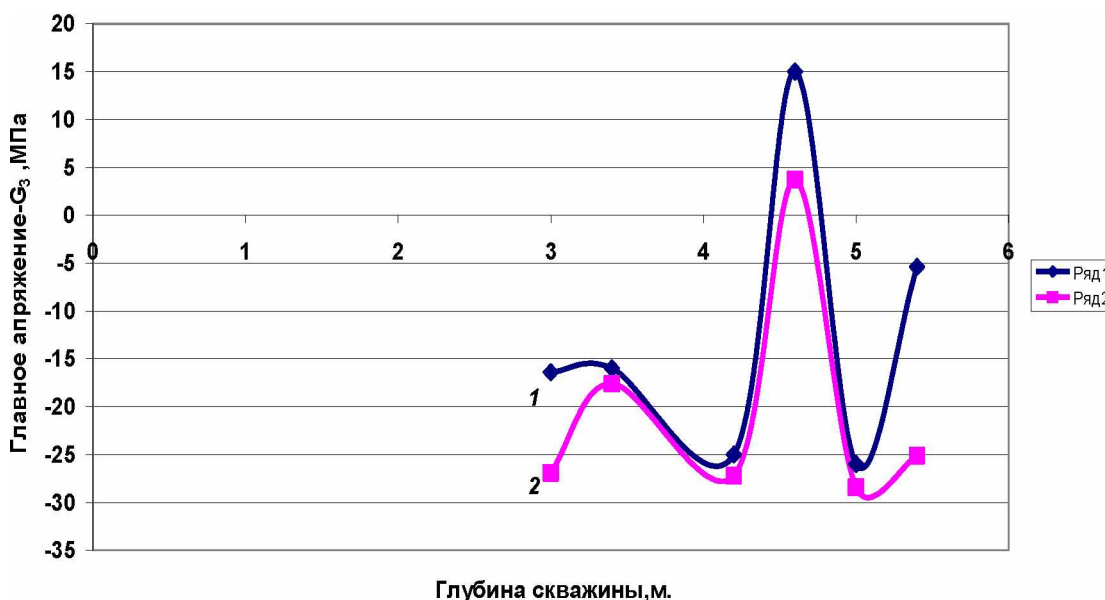


Рисунок 2 - Расчетные и экспериментальные значения напряжений (горизонтальная скважина)

Остаточное напряжение первого рода характеризует состояние представительных образцов, размеры которых велики по сравнению с размерами элементов структуры (зерен), а второго рода относится к таким структурным элементам, как мономинеральные агрегаты в породе (слои, включения и т.п.), отдельные минеральные зерна. Остаточное напряжение третьего рода описывает состояние объемов в пределах кри-

сталлической решетки. Таким образом, макронапряжения в горной породе являются по существу напряжениями первого, текстурные и структурные аналогичны напряжениям второго, а локальные – напряжениям третьего рода. Ввиду того, что горная порода в общем случае имеет стохастическое строение, значение напряжений в элементах структуры и текстуры носят случайный характер. Если считать, что распределение напряжений соответствует нормальному закону, то их значения можно достаточно полно характеризовать средней величиной и дисперсией. Для исследования изменения остаточных напряжений от воздействия теплового поля, нами рассматривались несколько разновидностей горных пород. Исследование изменений остаточных напряжений проводилось в образцах, представляющих исходное (генетические) состояние и образцах после их термической обработки. Эти опыты были проведены в лаборатории “Исследования физических процессов в горных породах” МГИИ (г. Москва) с использованием рентгеновского дифрактометра типа ДРОН-2. На основе анализа положения и формы профилей рентгеновских линий с использованием методов Фурье и гармонического анализа распределения интенсивности определены остаточные деформации кристаллической решетки ε (остаточное напряжение третьего рода $\sigma_{к.р.}$), напряжения внутри зерна $\sigma_{в.з.}$, напряжения на границе зерна $\sigma_{г.з.}$. Результаты измерения остаточных напряжений на разных структурных уровнях приведены в табл. 1.

На основе результатов исследований структуры и остаточных напряжений были установлены существенные их изменения при воздействии тепловым полем. Результаты исследований показали, что термическая обработка горных пород в режиме закалки приводит к существенным изменениям остаточных напряжений на всех структурных уровнях. В кварцах сжимающие остаточные напряжения 3-го рода снижаются, а в некоторых случаях преобразуются в растягивающие напряжения, а в кальцитах растягивающие напряжения преобразуются в значительные сжимающие остаточные напряжения, за счет чего происходит упрочнение, тогда как в кварцах термическая обработка за счет увеличения растягивающих остаточных напряжений приводит к разупрочнению.

Таблица 1

Остаточные напряжения минералов горных пород для разных структурных уровней

Название и место отбора породы	Название минерала	Состояние и номер образца	$\sigma_{к.р.}$, МПа	$\sigma_{в.з.}$, МПа	$\sigma_{г.з.}$, МПа
Гранит Кыртабылгы	кварц	исходн.,10	-748	400	164
		после т.о.,7	-36	1030	61
Мрамор Новороссийск	кальцит	исходн.,12	729	1100	80
		после т.о.,7	-246	480	26
Песчаник Рогун	кальцит	исходн.,2	347	140	646
		после т.о.,4	-43	860	195
	кварц	исходн.,2	-26	61	550
		после т.о.,4	-46	220	190
	кварц	исходн.,2 ¹	-155		
		после т.о.,1	-96		
		пос. т.о.,4 ¹	136		
Кварц Вост.Коунрад	кварц	исходн.,2	-220		
		исходн.,2	-111		
Гранит Вост.Коунрад	кварц	исходн.,2	-86		
		исходн.,2	-130		

Термообработка горных пород приводит к структурным изменениям в зависимости от минералов. В кальцитах растягивающие остаточные напряжения 3-рода преобразуются в значительные сжимающие напряжения, а напряжения растяжения внутри и на границах зерен уменьшаются в 2-3 раза. В кальцитах, в целом, имеется тенденция к уменьшению растягивающих напряжений 3-рода и к переходу от растягивающих к сжимающим напряжениям.

Выводы

1. Для сейсмогенных горных регионов предлагается определить остаточные напряжения методами разгрузки или рентгенографии в кернах пород во всех трех направлениях для данной глубины и затем рассчитать действующие в породном массиве напряжения по предложенным формулам.

2. Установлено, что тепловое воздействие приводит к изменениям остаточных напряжений в зависимости от вещественного состава минералов горных пород. В кальцитах растягивающие остаточные напряжения 3-рода преобразуются в значительные сжимающие напряжения, напряжения растяжения внутри и на границах зерен уменьшаются в 2-3 раза.

3. Термическая обработка в режиме закалки приводит к существенным изменениям остаточных напряжений на всех структурных уровнях, в кварцах сжимающие остаточные напряжения 3-го рода снижаются, а в некоторых случаях преобразуются в растягивающие напряжения.

Литература

1. Влох Н.П., Липин Я.М., Сашурин А.Д. Исследование остаточных напряжений в крепких горных породах //Современные проблемы механики горных пород/Матер. 4-й Всес.конф. по механике горных пород.-Л.,1972.-С.186-189.,
2. Липин Я.Н., Влох Н.П., Сашурин А.Д. О закономерностях распределения остаточных напряжений в кусках крепких горных пород// Измерение напряжений в массиве горных пород. Материалы 3 семинара. Новосибирск, 1971. ИГД СОАН СССР, Новосибирск,1972. – с. 123-127.
3. Шарков Е.В. В подземных мастерских Плутона // Что такое интрузивы. – М, 1986. – С.144.
4. Сашурин А.Д., Влох Н.П., Зубков А.В., Липин Я.М., Голиков В.Е. Исследование структуры поля напряжений в крепких горных породах и ее влияние на результаты натуральных измерений.// Измерение напряжений в массиве горных пород. Материалы 3 семинара. Новосибирск, 1971. ИГД СОАН СССР, Новосибирск,1972. – с 136-140.
5. Friedman M. Residual elastic strain in rock// Tectonophysics, v.15, № 4, 1975, p. 297-333.
6. Тажибаев К.Т. Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов. - Фрунзе: Илим, 1989. - 180 с.
7. Влох Н.П., Липин Л.И., Зубков А.В. Стреляние скальных пород и мероприятия его предупреждения //Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород. Материалы VI Всесоюзной конф. по механике горных пород. – Фрунзе, 3-5 октября 1978. –Фрунзе: Илим, 1979. –с 151-161.
8. Тажибаев К.Т. Деформация и разрушение горных пород, “Илим”, Фрунзе.1986.-106с.
9. Тажибаев К.Т. Концепция стационарной деформации литосферных плит, прогноз и предупреждения тектонических землетрясений. / Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2009 г. № 2. Бишкек. – с.47-57.

УДК 624.042.7

АНАЛИЗ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Смирнов С.Б., Ордобаев Б.С.

*Кыргызско-Российский Славянский университет, Бишкек, Кыргызская Республика
e-mail: ordobaev@mail.ru*

ANALYSIS OSCILLATORY MODELS DESTROYED BUILDINGS AND STRUCTURES

*Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyz Republic
e-mail: ordobaev@mail.ru*

Приведен анализ резонансно-колебательной модели сейсмического разрушения сооружений.

The analysis of the resonant vibrational model of seismic destruction facilities.

Ранее в [1 – 3] уже было детально описано противоречие между необычным сдвиговым характером всех сейсмических разрушений, происходящих в колоннах, стенах, простенках, перемычках и нынешней резонансно-колебательной сейсмической доктриной. Кроме того, была обнаружена высокая вероятность того, что все эти необычные разрушения вызваны неизвестными пока ударно-волновыми воздействиями в грунте.

Последние исследования показали, что и для многих других типов сооружений и объектов сейсмические разрушения тоже имеют столь же необычную форму, которая может возникнуть лишь при очень больших волновых ускорениях грунта (свыше 10^3g). Такие ускорения возможны лишь при квазиударных импульсах. К указанным разрушениям относятся: разрывы проводов ЛЭП; срезание анкерных болтов в трансформаторах ЛЭП; сбрасывание зданий с фундаментов; срезы высоких и низких труб опор мостов и эстакад; отрывы породы или бетона вдоль вертикальных плоскостей горных выработок тоннелей, шахт и иных подземных сооружений; боковое раздавливание подземных трубопроводов; разрывы водопроводов, рельсов и кабелей; гидравлические удары в грунтах; разрушения горных пород; выбрасывание камней из грунта и т.д.

Особо надо отметить часто встречающийся случай специфических локальных разрушений, когда землетрясение «вырезают» из зданий и сооружений их отдельные участки вертикальными плоскостями, оставляя совершенно нетронутыми соседние части. Эти локальные разрушения не только абсолютно опровергают колебательную и подтверждают ударно-волновую модель сейсмических разрушений, но и говорят о наличии в грунте особо узких «коридоров-волноводов», которые наиболее благоприятны для распространения

Литература

1. Влох Н.П., Липин Я.М., Сашурин А.Д. Исследование остаточных напряжений в крепких горных породах //Современные проблемы механики горных пород/Матер. 4-й Всес.конф. по механике горных пород.-Л.,1972.-С.186-189.,
2. Липин Я.Н., Влох Н.П., Сашурин А.Д. О закономерностях распределения остаточных напряжений в кусках крепких горных пород// Измерение напряжений в массиве горных пород. Материалы 3 семинара. Новосибирск, 1971. ИГД СОАН СССР, Новосибирск,1972. – с. 123-127.
- 3.Шарков Е.В. В подземных мастерских Плутона // Что такое интрузивы. – М, 1986. – С.144.
- 4.Сашурин А.Д., Влох Н.П., Зубков А.В., Липин Я.М., Голиков В.Е. Исследование структуры поля напряжений в крепких горных породах и ее влияние на результаты натурных измерений.// Измерение напряжений в массиве горных пород. Материалы 3 семинара. Новосибирск, 1971. ИГД СОАН СССР, Новосибирск,1972. – с 136-140.
5. Friedman M. Residual elastic strain in rock// Tectonophysics, v.15, № 4, 1975, p. 297-333.
- 6.Тажобаев К.Т. Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов. - Фрунзе: Илим, 1989. - 180 с.
7. Влох Н.П., Липин Л.И., Зубков А.В. Стреляние скальных пород и мероприятия его предупреждения //Горные удары, методы оценки и контроля удароопасности массивов горных пород. Материалы VI Всесоюзной конф. по механике горных пород. – Фрунзе, 3-5 октября 1978. –Фрунзе: Илим, 1979. –с 151-161.
8. Тажибаев К.Т. Деформация и разрушение горных пород, “Илим”, Фрунзе.1986.-106с.
9. Тажибаев К.Т. Концепция стационарной деформации литосферных плит, прогноз и предупреждения тектонических землетрясений. / Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. 2009 г. № 2. Бишкек. – с.47-57.