

УДК 622.83:621.271

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК  
ПОД КРАЕВЫМИ ЧАСТЯМИ ПЛАСТОВЫХ ЗАЛЕЖЕЙ**

**Ю. Г. Феклистов, А. Д. Голотвин**

*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: feclistov@igduran.ru,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620219, г. Екатеринбург, Россия*

Приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований состояния подготовительных горных выработок под краевыми частями пластовых залежей осадочного типа пологого и наклонного падения при их очистной выемке. Определены напряжения в массиве горных пород под краевыми частями пластов. В качестве оценки состояния выработок принято отношение максимальных сжимающих напряжений, действующих на контуре условной круглой выработки в упругой среде, к тем же напряжениям на контуре выработки при гидростатическом исходном поле напряжений. Получено соответствие результатов инструментальных и визуальных наблюдений в шахтах, моделирования на эквивалентных материалах и аналитических решений.

*Подготовительные выработки, краевые части, влияющий пласт, целики, горное давление, области повышенного давления*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180105

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых в выработанном пространстве по различным причинам могут оставаться целики и краевые части полезного ископаемого либо возводиться искусственные опоры. Обработка пластообразных залежей, например свит угольных пластов, приводит к образованию протяженных краевых частей, под или над которыми часто располагаются подготовительные выработки [1–7]. В случаях, когда выемка полезного ископаемого ведется с полным обрушением налегающих пород, в массиве, окружающем выработанное пространство, возникает значительная по размерам зона разгрузки, а в краевой части — зона опорного давления. Если подготовительные выработки расположены под (над) краевой частью, то они будут испытывать влияние повышенного горного давления (ПГД), что может значительно осложнить их проведение и поддержание [1, 2].

К настоящему времени разработаны методики и рекомендации по рациональному расположению, охране и поддержанию выработок, расположенных в зонах влияния целиков и краевых частей пластов. Однако анализ показал, что прогноз проявлений горного давления, выполненный согласно действующим нормативным документам [1], в ряде случаев значительно отличается от фактических проявлений, а рекомендации по управлению горным давлением недостаточно эффективны. Причиной сложившейся ситуации является несовершенство методик прогноза состояния выработок и решений по их поддержанию. В последние три десятилетия не было подготовлено регламентирующих документов по совершенствованию методик прогноза проявлений горного давления в подготовительных выработках, расположенных под краевыми частями пластов в зонах повышенного горного давления, является актуальной научной и производственной задачей.

### АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА УРОВНЕ ПОЧВЫ ОТРАБОТАННОГО ПЛАСТА

Цель работы — обобщить исследования параметров давления в зоне разгрузки и в зоне опорного давления от горно-геологических и горнотехнических факторов на уровне влияющего пласта. Затем, используя соотношения теории упругости, определить компоненты напряжений под краевыми частями пластов и оценить состояние выработки.

На рис. 1 показана общая схема распределения давления на краевую часть пласта и почву в окрестности выработанного пространства.

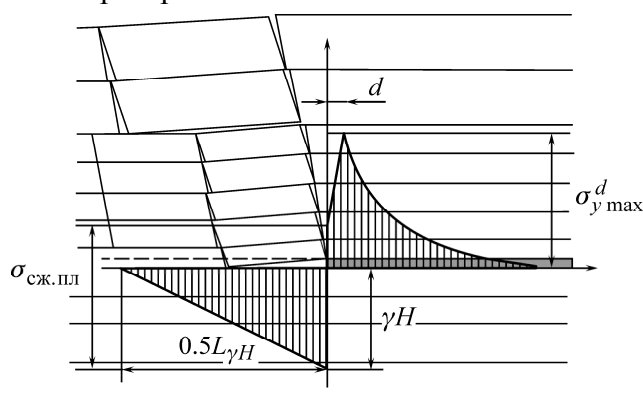


Рис. 1. Схема распределения дополнительных вертикальных напряжений в массиве горных пород в окрестности выработанного пространства и в краевой части залежи на уровне почвы отработываемого пласта:  $\sigma_{сж.пл}$  — прочность пласта, МПа;  $L_{\gamma H}$  — размер выработанного пространства, при котором вблизи его центра давление достигает значений начального геостатического  $\gamma H$ ;  $\sigma_{y \max}^d$  — максимум дополнительных вертикальных напряжений в зоне опорного давления;  $d$  — расстояние от забоя до местоположения максимума вертикальных напряжений в зоне опорного давления, м

Размер выработанного пространства  $L_{\gamma H}$ , при котором вблизи его центра давление достигает значений начального геостатического, определен на основе анализа шахтных и лабораторных исследований (ВНИМИ, ИГД им. А. А. Скочинского, КузНИУИ и др.) с использованием углов давления  $\varphi$ , характеризующих распределение нагрузок на почву выработанного пространства [2–4].

В таблице приведены данные натурных исследований в Кузнецком и Челябинском угольных бассейнах, а также результаты эквивалентного моделирования, послужившие основой для определения зависимости значений  $\text{tg}\varphi$  от горно-геологических и горнотехнических условий. На основе экспериментальных данных получена зависимость  $\text{tg}\varphi$  от средневзвешенной прочности подработанного массива  $\sigma_{сж.м}$  и глубины горных работ (среднеквадратичное отклонение составило 20%):

$$\text{tg}\varphi = 4.4 \left( \frac{\gamma H}{\sigma_{сж.м}} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — объемный вес пород,  $\text{МН}/\text{м}^3$ ;  $H$  — глубина горных работ, м;  $\sigma_{сж.м} = k_{стр} \sigma_{сж.обр}$  — средневзвешенная прочность массива на одноосное сжатие, МПа,  $k_{стр}$  — коэффициент структурного ослабления массива пород [6–8],  $\sigma_{сж.обр}$  — прочность пород образцов пород на одноосное сжатие при стандартных лабораторных испытаниях, МПа.

Исходные данные для оценки зависимости угла давления  $\varphi$  от горно-геологических и горнотехнических условий отработки

Объект (пласт, лава, длина лавы)	$H$ , м	$l_3$ , м	$l_{ш}$ , м	$P$ , кПа	$\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	$\sigma_{сж.обр}$ , МПа	$\lambda k_{стр}$	$\sigma_{сж.м}$ , МПа	$h$ , м	$l_3$ , м	$\frac{\gamma H}{\sigma_m}$	$\text{tg} \sigma_3$
Кузнецкий бассейн												
пл. III, л. 1–6, $L_{л} = 134$ м	280	29	49	6620	25	58	0.10	5.8	264	46	1.20	5.86
пл. III, л. 1–5, $L_{л} = 120$ м	127	72	45	3320	25	58	0.10	5.8	133	37	0.55	3.59
пл. IV–V, л. 1–8, $L_{л} = 105$ м	123	40	55	3040	25	58	0.10	5.8	122	32	0.53	3.81
Челябинский бассейн												
пл. В-Багуринский, л. 46, $L_{л} = 135$ м	240	48	48	3520	24	17	0.20	3.4	147	34	1.69	4.32
пл. В-Багуринский, л. 6, $L_{л} = 120$ м	240	60	60	4790	24	17	0.20	3.4	200	42	1.69	4.76
пл. В-Багуринский, л. 6, $L_{л} = 120$ м	240	39	39	2700	24	17	0.20	3.4	112	28	1.69	4.00
Моделирование на эквивалентных материалах												
II	0.5	0.32		7.3	15	0.06	0.8	0.048	0.49	0.32	0.16	1.56
VII	0.74	0.20		10.8	15	0.016	0.8	0.013	0.72	0.20	0.85	3.60
XII	1.5	0.61		21.9	15	0.07	0.8	0.056	1.46	0.61	0.41	2.39
XIII	1.0	0.41		14.6	15	0.038	0.8	0.030	0.97	0.41	0.47	2.37
XIV	1.0	0.40		14.6	15	0.038	0.8	0.030	0.97	0.40	0.47	2.42
XV	1.0	0.42		14.6	15	0.038	0.8	0.030	0.97	0.42	0.47	2.31
XVI	0.5	0.21		7.3	15	0.031	0.8	0.025	0.49	0.21	0.30	2.33
XVII	0.5	0.18		7.3	15	0.031	0.8	0.025	0.49	0.18	0.30	2.72

Примечание:  $L_{л}$  — длина лавы, м;  $H$  — средняя глубина отработки лавы, м;  $l_3$  — расстояние от прибора-мессдозы, которым измерено давление пород, на почву пласта, до забоя, м;  $l_{ш}$  — расстояние от мессдозы до ближайшего вентиляционного или конвейерного штрека, включая его ширину, м;  $P$  — давление на мессдозу, кПа;  $\gamma$  — объемный вес пород, МН/м<sup>3</sup>;  $h = P/\gamma$  — высота толщи пород, создающих давление на мессдозу, м;  $l_3 = l_3 l_{ш} / (l_{32} + l_{ш2}) 0.5$  — расстояние, эквивалентное расстоянию от точки измерения в выработанном пространстве до забоя, при условно бесконечной длине лавы для плоской задачи [5];  $\text{tg} \varphi_3 = h/l_3$  — тангенс угла давления в той или иной точке, вычисленный на основе экспериментальных данных

На рис. 2 приведена зависимость тангенса угла давления  $\text{tg} \varphi$  от отношения геостатического давления  $\gamma H$  к средневзвешенной прочности подработанного массива пород  $\sigma_{сж.м}$ .

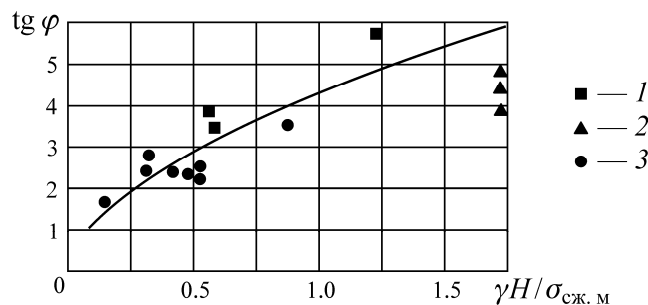


Рис. 2. Зависимость тангенса угла давления  $\text{tg} \varphi$  от отношения геостатического давления  $\gamma H$  к средневзвешенной прочности подработанного массива пород  $\sigma_{сж.м}$ : 1 — Кузнецкий бассейн; 2 — Челябинский; 3 — моделирование

Согласно формуле (1), минимальная ширина  $L_{\gamma H}$  протяженного выработанного пространства, при котором вблизи его середины достигается давление близкое к начальному геостатическому  $\gamma H$ , определяется как

$$L_{\gamma H} = \frac{2H}{\operatorname{tg} \varphi} = 0.5H \left( \frac{\sigma_{\text{сж. м}}}{\gamma H} \right)^{0.5}. \quad (2)$$

Распределение давления в упругой части зоны опорного давления принято на основании исследований [2, 3] в виде

$$\frac{\sigma_y^d}{\gamma H} = \sigma_{y \max}^d \frac{e^{-(x-d)/b}}{\gamma H} - 1. \quad (3)$$

Здесь  $\sigma_{y \max}^d$  — максимальное дополнительное вертикальное напряжение в зоне опорного давления;  $x$  — расстояние от груди забоя в сторону массива, м;  $d$  — расстояние от груди забоя до максимума опорного давления, м;  $b$  — параметр, характеризующий затухание давления в упругой части зоны опорного давления, м [2, 3, 6].

Параметр  $b$  находится по результатам наблюдений за деформациями контуров подготовительных выработок в зоне опорного давления [11–13]:

$$b = 0.35(H^2 m_b)^{1/3}, \quad (4)$$

где  $m_b$  — вынимаемая мощность пласта, м.

Распределение давления в зоне предельного состояния на восходящей ветви до точки максимума вычислялось по формуле [2, 3, 9]:

$$\frac{\sigma_y^d}{\gamma H} = \frac{\sigma_{\text{сж. пл}} + 2.6\sigma_{\text{сж. пл}} x/m_b}{\gamma H} - 1, \quad (5)$$

$\sigma_{\text{сж. пл}}$  — прочность пласта на одноосное сжатие, МПа.

Максимальное дополнительное вертикальное напряжение  $\sigma_{y \max}^d$  и расстояние  $d$  до местоположения максимума опорного давления определяются на основе баланса сил в зонах опорного давления и разгрузки. Соотношение между протяженностью зоны временного опорного давления впереди очистного забоя  $L_{\text{од}}$  и параметром  $b$ , полученное на основе экспериментальных данных, количественно составляет 1.8–2.2.

Для оценки влияния фактора времени на параметры распределения горного давления на почву выработанного пространства проанализированы результаты шахтных наблюдений в различных угольных бассейнах [11–13]. Установлено, что при отработке вторых слоев мощных пластов размер  $L_{\gamma H}$  уменьшается в 1.5–2.0 раза по сравнению с выемкой первого слоя. Значение параметра  $b$ , характеризующего снижение давления в опорной зоне от расстояния за большой период времени, составляет  $(0.6–0.9)b$  для зоны временного опорного давления. Считая эти изменения параметров  $L_{\gamma H}$  и  $b$  предельными, их значения во времени  $t$  (мес) определяются так:

$$L_{\gamma H t} = L_{\gamma H} (0.6 + 0.4e^{-2t/T}), \quad (6)$$

$$b_t = b (0.75 + 0.25e^{-2t/T}), \quad (7)$$

где  $T$  — общая продолжительность процесса сдвижения в зависимости от глубины разработки, мес.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД КРАЕВОЙ ЧАСТЬЮ ПЛАСТА.  
КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ ЧАСТЕЙ ПЛАСТОВ**

Для оценки состояния подготовительных выработок под краевыми частями пластов по соотношениям теории упругости [14] найдены компоненты напряжений. Напряжения рассчитывались для полуплоскости, где в качестве краевых условий на верхней границе принимались параметры опорного давления и давления в зоне разгрузки на уровне почвы обрабатываемого пласта.

Для оценки влияния напряженного состояния пород краевыми частями пластов принят коэффициент условий  $K_y$ , который определяется как отношение значений максимальных тангенциальных напряжений на контуре условной круглой выработки в зоне повышенного горного давления под краевой частью пласта к тому же параметру в условиях геостатического равнокомпонентного поля напряжений в той же точке:

$$K_y = \frac{3\sigma_{к1} - \sigma_{к2}}{2\gamma H}, \tag{8}$$

где  $\sigma_{к1}$ ,  $\sigma_{к2}$  — наибольшее и наименьшее главные напряжения;  $3\sigma_{к1} - \sigma_{к2}$  — значения максимальных сжимающих тангенциальных напряжений на контуре выработки под краевой частью пласта;  $2\gamma H$  — максимальные сжимающие тангенциальные напряжения на контуре выработки в обычных условиях при геостатическом равнокомпонентном поле напряжений в той же точке.

На рис. 3 приведен пример расчета изолиний главных напряжений под краевой частью пласта ( $H = 400$  м,  $m_b = 2$  м,  $t = 36$  мес).

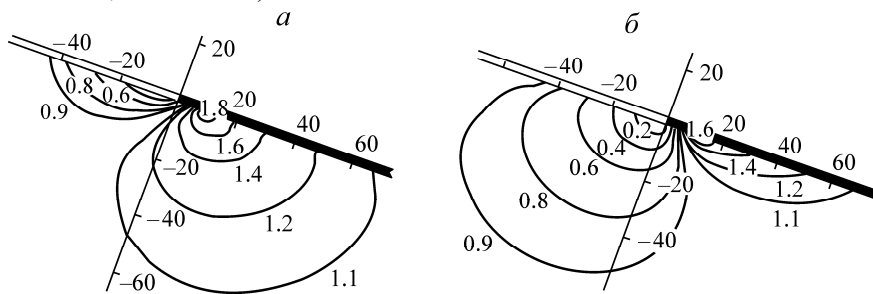


Рис. 3. Изолинии главных напряжений под краевой частью пласта (в долях от  $\gamma H$  в данной точке):  
а — наибольших  $\sigma_{к1} / \gamma H_T$ ; б — наименьших  $\sigma_{к2} / \gamma H_T$

На рис. 4. представлена схема, поясняющая определение коэффициента условий  $K_y$  в зависимости от значений главных напряжений, действующих под краевыми частями обрабатываемых пластов. В результате анализа установлено, что конфигурация и размеры зон повышенного горного давления по экспериментальным данным хорошо согласуются с их размерами, определяемыми по коэффициенту условий  $K_y$ .

На рис. 5 показаны натурные данные о состоянии выработок под краевой частью пласта и конфигурации зон ПГД на основе расчета коэффициента условий  $K_y$ .

В области под краевой частью пласта, где имеет место условие

$$3\sigma_{к1} - \sigma_{к2} < 0, \tag{9}$$

на контуре выработки возникают растягивающие напряжения. В этом случае, учитывая, что прочность горных пород на растяжение в среднем в 20 раз меньше, чем на сжатие, выражение для коэффициента  $K_y$  запишется в виде

$$K_y = \frac{10(3\sigma_{к2} - \sigma_{к1})}{\gamma H}. \tag{10}$$

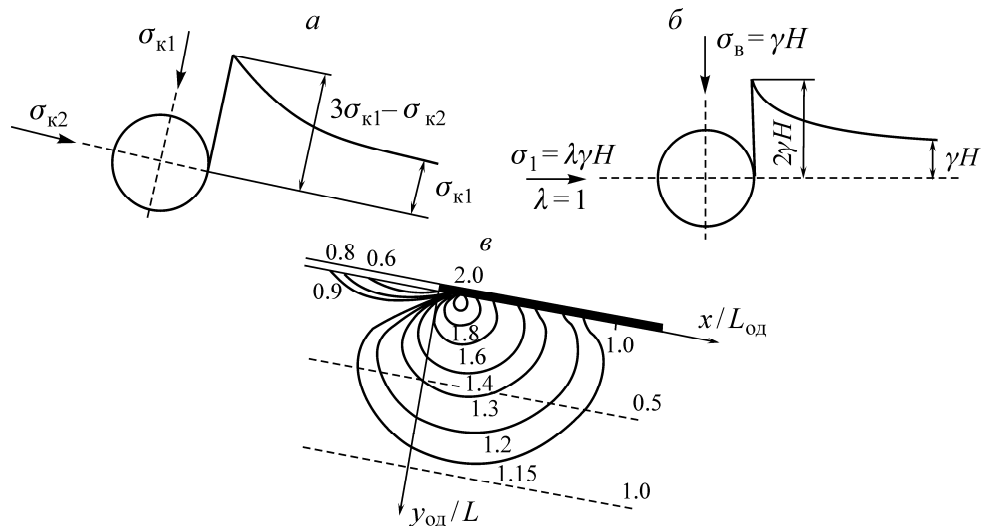


Рис. 4. Схема к определению коэффициента условий  $K_y$  под краевыми частями пластов: *a* — при гидростатическом поле напряжений; *б* — под краевыми частями пластов; *в* — изолинии, построенные по коэффициенту условий  $K_y = (3\sigma_{к1} - \sigma_{к2}) / 2\gamma H$

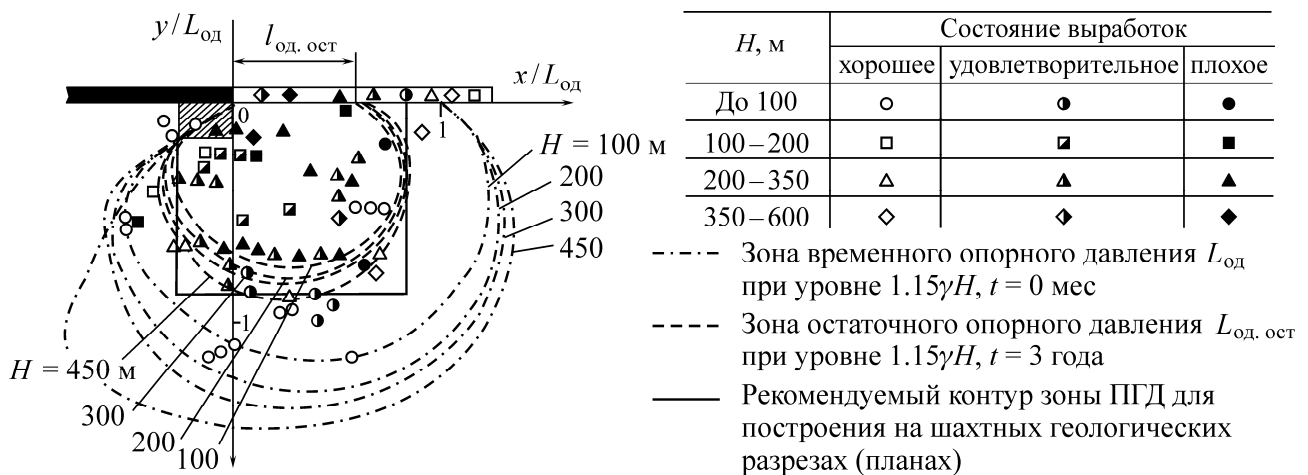


Рис. 5. Сопоставление границ зон ПГД, построенных по коэффициенту условий  $K_y$ , с натурными наблюдениями за состоянием подготовительных выработок под краевыми частями пластов

Данная зона растягивающих напряжений, расположенная на расстояниях до  $0.21L_{од}$  в сторону выработанного пространства от кромки краевой части на уровне пласта и в глубину до  $0.11L_{од}$ , на рис. 5 показана штриховкой.

**ВЫВОДЫ**

На основе выполненных исследований уточнены параметры зон повышенного горного давления под краевыми частями пластов в зависимости от основных горно-геологических и горно-технических условий, а также с учетом фактора времени.

Предложенная оценка устойчивого состояния подготовительных выработок под краевыми частями пластов позволяет более адекватно определять состояние выработки в процессе горных работ.

Установлено, что при расположении подготовительных выработок под краевыми частями пластов условия их проведения и поддержания могут значительно ухудшаться, что следует учитывать на стадии проектирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Указания** по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР: Утв. МУП СССР 26.12.1984 г. (ВНИМИ, ДонУГИ, КузНИУИ и др.). — Л., 1986. — 222 с.
2. **Петухов И. М., Линьков А. М., Сидоров В. С., Фельдман И. А.** Теория защитных пластов. — М.: Недра, 1976. — 224 с.
3. **Фармер Я.** Выработки угольных шахт: пер. с англ. — М.: Недра, 1990. — 269 с.
4. **Белов В. А., Голотвин А. Д.** Оценка параметров опорного давления впереди очистного забоя // Изв. вузов. Горн. журн. — 2005. — № 1. — С. 18–21
5. **Борисов А. А.** Механика горных пород и массивов. — М.: Недра, 1980. — 360 с.
6. **Фисенко Г. Л.** Предельные состояния горных пород вокруг выработок. — М.: Недра, 1976. — 270 с.
7. **Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарян Э. В.** Основы механики горных пород. — Л.: Недра, 1989. — 488 с.
8. **Шуплецов Ю. П.** Прочность и деформируемость скальных массивов. — Екатеринбург: УрО РАН, 2003. — 195 с.
9. **Якоби О.** Практика управления горным давлением: пер. с нем. — М.: Недра, 1987. — 566 с.
10. **Феклистов Ю. Г.** Определение деформаций вмещающих пород в процессе выемки рудных тел на границе с зоной обрушения // ФТПРПИ. — 1989. — № 4. — С. 116–119.
11. **Громов Ю. В., Бычков Ю. Н., Кругликов В. П.** Управление горным давлением при разработке мощных пологих пластов угля. — М.: Недра, 1985. — 239 с.
12. **Голотвин А. Д., Летов С. А., Слинки Б. П. и др.** Указания по управлению горным давлением в очистных забоях под (над) целиками и краевыми частями угольных пластов мощностью до 3,5 м и углом падения до 35°: Утв. МУП СССР 16.05.1984 г. (ВНИМИ, ДонУГИ, КузНИУИ, ПечорНИИ-проект, КНИУИ). — Л., 1984. — 62 с.
13. **Голотвин А. Д., Феклистов Ю. Г. и др.** Рекомендации по управлению горным давлением в очистных забоях на шахтах ОАО “Челябинскуголь”: Утв. 21.11.2000 г. Управление Челябинского округа ГГТН РФ. — Екатеринбург: УФ ВНИМИ, УГГА, ОАО “Челябинскуголь”, 2000. — 93 с.
14. **Самуль В. И.** Основы теории упругости и пластичности: учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1982. — 264 с.

*Поступила в редакцию 4/III 2015*