



**ОБОСНОВАНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ШИРИНЫ УСТОЙЧИВЫХ УГОЛЬНЫХ ЦЕЛИКОВ МЕЖДУ
ВЫЕМОЧНЫМИ СТОЛБАМИ ПРИ ИХ ПОДГОТОВКЕ И ОТРАБОТКЕ**

В. Н. Фрянов¹, Л. Д. Павлова¹, А. А. Исаченко²

¹*Сибирский государственный индустриальный университет, E-mail: ld_pavlova@mail.ru
ул. Кирова 42, г. Новокузнецк 654007, Россия*

²*АО "ОУК "Южкузбассуголь", E-mail: aleksey.isachenko@evraz.com,
пр. Курако 33, г. Новокузнецк 654027, Россия*

Обоснован научный подход к определению ширины устойчивых угольных целиков при подготовке и отработке выемочных участков с нагрузкой более 15 тыс. т в сутки. Предложенная методика отличается от традиционной учетом скорости продвижения очистных и подготовительных забоев, времени поддержания подготовительных выработок, влияния динамического опорного давления при зависании и обрушении подработанных пород кровли соседних выемочных участков.

Выработка, вычислительный эксперимент, деформации, напряжения, целик

**JUSTIFICATION OF THE WIDTH OF STABLE COAL PILLARS
BETWEEN EXTRACTION PANELS DURING THEIR PREPARATION
AND MINING BASED ON THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION**

V. N. Fryanov¹, L. D. Pavlova¹, and A. A. Isachenko²

¹*Siberian State Industrial University, E-mail: ld_pavlova@mail.ru,
ul. Kirova 42, Novokuznetsk 654007, Russia*

²*JSC "UCC "Yuzhkuzbassugol" E-mail: aleksey.isachenko@evraz.com,
pr. Kurako 33, Novokuznetsk 654027, Russia*

A scientific approach to determining the width of stable coal pillars during the preparation and mining of extraction panels with a load of more than 15 thou t/day has been substantiated. The proposed procedure differs from the traditional one by taking into account the advance rate of stoping and development faces, the time of maintaining the development workings, the effect of dynamic support pressure during the hanging and caving of undermined roof rocks of neighboring extraction panels.

Working, computational experiment, strains, stresses, pillar

На современных высокопроизводительных угольных шахтах осуществляется, как правило, отработка пологих угольных пластов средней мощности с подготовкой и отработкой выемочных столбов длиной 2–3 км и длиной лавы 300–400 м. Преобладает многоштрековая схема подготовки выемочных участков с выемкой пластов длинными комплексно-механизированными забоями. В благоприятных горно-геологических условиях эта система разработки обеспечивает высокие технико-экономические показатели [1]. Однако при переходе горных работ на глубину более 400 м на шахтах Кузбасса возникли следующие осложняющие факторы [2, 3]:

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-41-420004.

— горное давление в боках одиночных подготовительных выработок более 14 МПа и на краевых участках пластов до 30 МПа, что существенно превышает предел прочности угля при сжатии, т. е. возникает необходимость возведения дополнительной крепи или упрочнения угольного пласта клеевыми составами и остановок забоев для реализации этих мероприятий;

— повышение метаноносности угольных пластов до 18–24 м³/т, что привело к необходимости дегазации массива горных пород и, как следствие, ограничениям производительности очистных и подготовительных забоев по газовому фактору;

— выборочная отработка угольных пластов в свите и отдельных участков пласта способствовала формированию зоны неравномерного сдвижения массива горных пород, концентраторов напряжений в пределах шахтного поля и необходимости осуществления дополнительных специальных мероприятий по предотвращению динамических явлений.

Указанные факторы привели к неравному подвиганию очистных и подготовительных забоев, необходимости учета влияния скорости деформирования и реологических свойств массива горных пород. В этой связи актуальны исследования, направленные на выявление закономерностей пространственно-временного деформирования угольных целиков и подготовительных выработок с учетом последовательности подвигания очистных и подготовительных забоев с целью обоснования рациональной ширины целиков между выемочными участками.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи разработана математическая модель деформирования массива горных пород, которая по мере пространственно-временного развития горных работ позволяет учитывать:

— упругое деформирование под влиянием природных сил при отсутствии в массиве горных выработок (решается краевая задача теории упругости, в которой разрешающие уравнения равновесия, совместности деформаций и физические уравнения замыкаются граничными условиями второго типа [4]);

— упругое деформирование под влиянием природных и техногенных сил после проведения в массиве горных выработок (решается краевая задача с учетом формы и размеров горных выработок [5]);

— нелинейное деформирование под влиянием природных и техногенных сил после проведения в массиве горных выработок (решается краевая задача с учетом изменения прочностных и деформационных свойств угля и пород на основе теории прочности Кулона – Мора [4, 6, 7]);

— нелинейное деформирование под влиянием природных и техногенных сил после проведения в массиве горных выработок (решается краевая задача с учетом изменения прочностных и деформационных свойств угля и пород по энергетической теории прочности, ползучести пород, их реологических свойств, времени эксплуатации выработок и угольных целиков [8–11, 14]).

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности очистных и подготовительных выработок осуществлялось методом конечных элементов с использованием авторского комплекса программ [12]. Неоднородность строения массива горных пород учитывается в конечных элементах в виде мощностей породных слоев и угольных пластов и их деформационных свойств. На каждом этапе решения задачи осуществляется вычисление напряжений и оценка состояния пород или угля в конечных элементах с помощью огибающих предельных кругов Мора. Паспорта прочности для каждого типа пород и угля строятся по измеренным в шахтных или лабораторных условиях пределам прочности при сжатии или растяжении. Модули деформации пород или угля во всех конечных элементах корректируются после каждого этапа расчета по диаграммам “напряжение – деформация”.

В результате решения двумерной задачи геомеханики определялись следующие параметры напряженно-деформированного состояния массива горных пород в пределах расчетной области: вертикальные и горизонтальные смещения, деформации, напряжения, отношение остаточной

прочности угля и пород к исходной, которое принимается равным отношению касательных напряжений, полученных по огибающей паспорта прочности пород, к вычисленным методом конечных элементов.

Для исследования принята система разработки угольных пластов длинными комплексно-механизированными забоями с полным обрушением пород кровли и охраной подготовительных выработок угольными целиками [13, 17]. Влияние пространственного положения системы очистных и подготовительных выработок и угольных целиков разной ширины при моделировании учитывается в виде многоугольников, границы которых совпадают с координатами вершин конечных элементов. Материалом для заполнения многоугольников являются обрушенные или закладочные породы, элементы крепи. В процессе поэтапного моделирования форма выработок и угольных целиков автоматически изменяются за счет отжима угля, разрушений пород кровли и почвы, а также деформаций элементов крепи.

Программа исследований включала следующие варианты пространственно-временного расположения горных выработок и угольных целиков:

- одиночные выработки;
- параллельные выработки, ограничивающие угольный целик шириной 40 – 70 м;
- параллельные выработки, ограничивающие угольный целик шириной 40 – 70 м, с расположением по границам целика очистного выработанного пространства.

Результаты и всестороннее рассмотрение вопроса. Экспериментальный участок выбран в пределах Ерунаковского месторождения Кузбасса при отработке пологого пласта 48 мощностью 2.06 – 2.41 м и надработке весьма сближенного пласта 45 мощностью 1.70 – 2.23 м. Междупластье составляет в районе фланговых наклонных стволов 0.5 м и увеличивается до 15.0 м при продвижении к центральным уклонам. Глубина разработки 500 – 600 м. Непосредственная кровля пласта 48 представлена мелкозернистым алевролитом мощностью 1.6 – 12.0 м, основная кровля — крупнозернистым алевролитом мощностью до 30 м. Алевролиты мелкозернистые в почве пласта склонные к пучению. Объектами, вносящими аномалию в распределение отношения остаточной прочности пород к исходной и вертикальных напряжений, являются неоднородное строение массива горных пород и пространственное положение системы очистных и подготовительных выработок, охраняемых угольными целиками шириной 38.8 – 70.0 м.

На первом этапе изучалось распределение параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности одиночной выработки. На рис. 1 приведены изолинии распределения отношения остаточной прочности угля и пород к исходной в окрестности вентиляционного штрека 48-8 и конвейерного штрека 48-7, разделенных угольным целиком шириной 38.8 м. По оценке результатов моделирования и шахтных измерений установлены следующие критерии состояния угля или пород по величине отношения остаточной прочности к начальной: меньше 0.5 — массив разрушен, в диапазоне 0.5 – 0.75 — массив разделен трещинами на блоки, больше 0.75 — массив не нарушен.

Как следует из рис. 1 соседние выработки не оказывают влияния на изменение прочности угля в целике, следовательно на стадии проведения подготовительных выработок при ширине целика более 40 м можно выбирать крепь без учета воздействия соседних выработок.

Характер распределения вертикальных напряжений на рис. 2 подтверждает, что в боках выработок вертикальные напряжения достигают 20 МПа. Так как предел прочности угля при сжатии равен 10 МПа [6], то уголь в надрабатываемом пласте 45 и угольном целике будет частично разрушен, что подтверждается распределением отношения остаточной прочности угля и пород к исходной на рис. 1. В кровле и почве выработок происходит разгрузка пород в пределах свода высотой до 10 м.

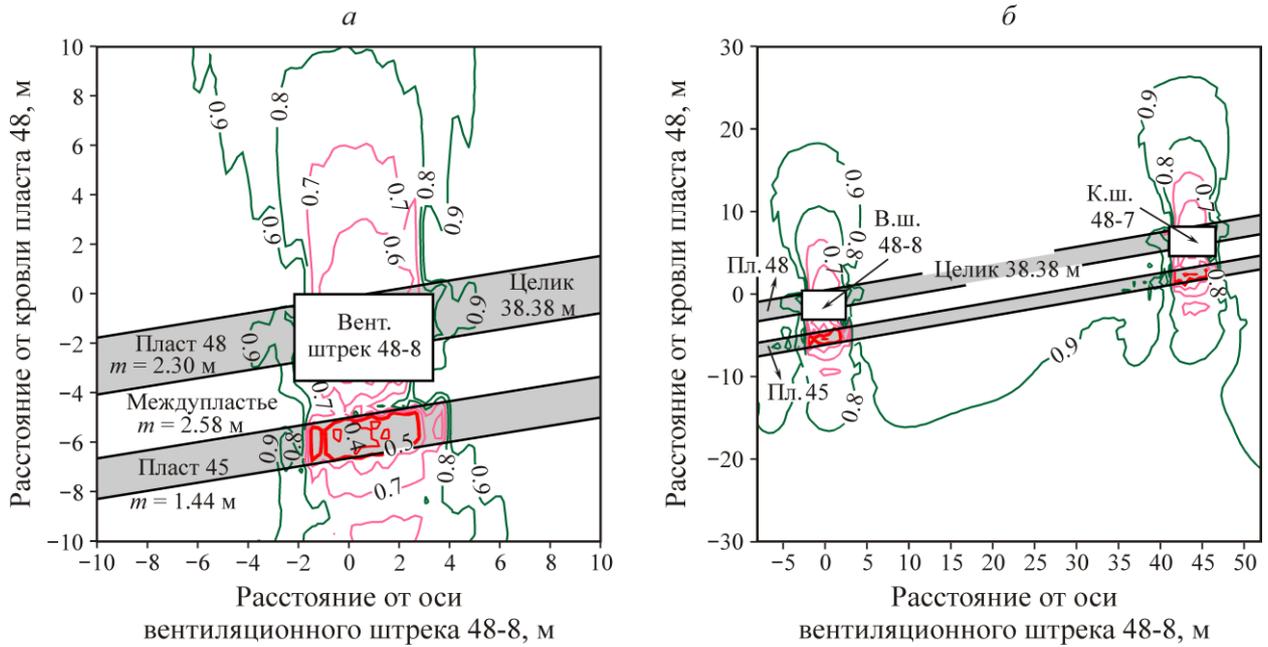


Рис. 1. Распределение отношения остаточной прочности угля и пород к исходной: *а* — одиночная выработка; *б* — целик между выработками 38.8 м

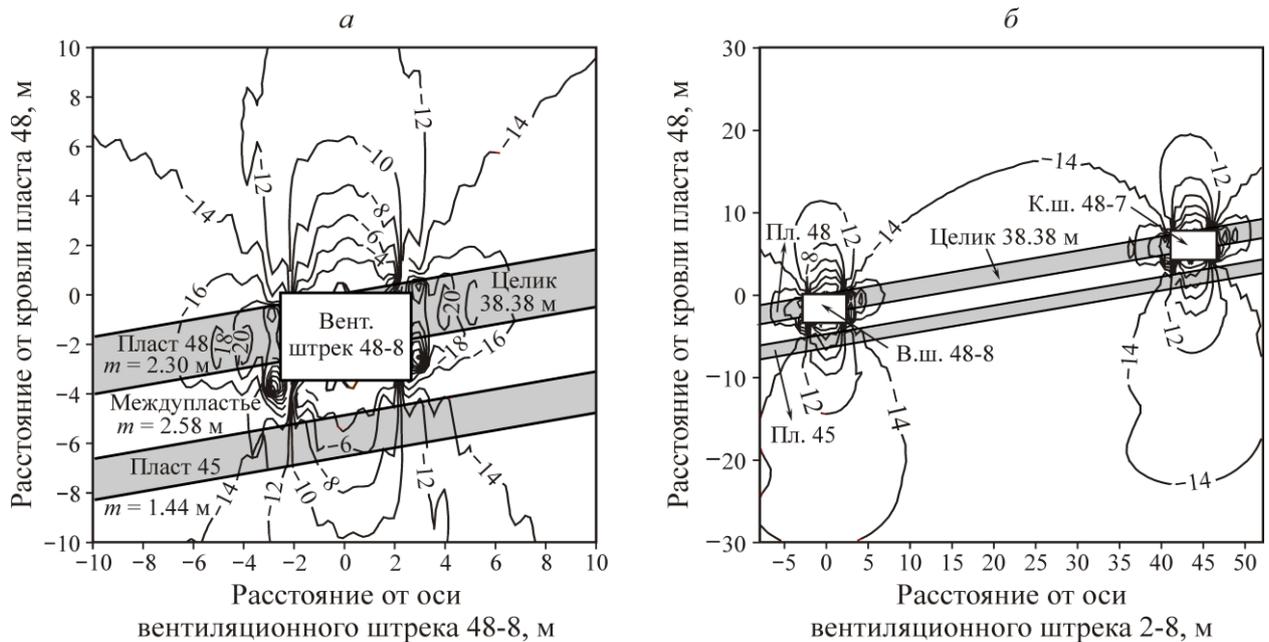


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений, МПа: *а* — одиночная выработка; *б* — целик между выработками 38.8 м

После отработки выемочного столба 48-7 со стороны конвейерного штрека 48-7 выявлено существенное влияние зависящих над выработанным пространством пород кровли на характер распределения геомеханических параметров. На рис. 3 показано распределение отношения остаточной прочности угля и пород к исходной прочности в окрестности вентиляционного и конвейерного штреков и в угольном целике после отработки участка 48-7 без учета времени эксплуатации выработок (рис. 3*а*) и с учетом времени (рис. 3*б*). Согласно значениям изолиний при времени эксплуатации вентиляционного штрека более 6 мес. отношение остаточной прочности к исходной в угольном пласте снижается до 0.5, следовательно целик шириной 38.8 м является неустойчивым и не обеспечивает поддержание вентиляционного штрека 48-8.

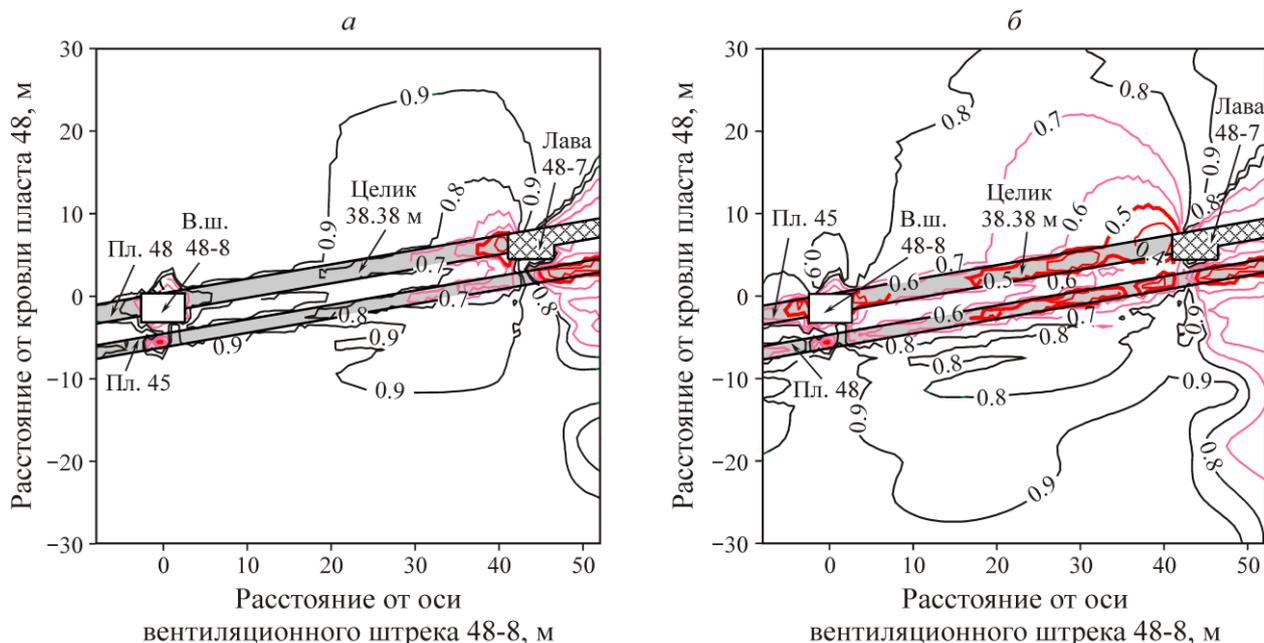


Рис. 3. Изменения отношения остаточной прочности угля и пород после отработки выемочного участка 48-7 (ширина целика 38.8 м): *а* — без учета ползучести; *б* — с учетом ползучести во время эксплуатации выработок в течение 6 мес.

Этот вывод подтверждается исследованиями других авторов [14–17], а также характером распределения вертикальных напряжений (рис. 4), которые в окрестности вентиляционного штрека 48-8 превышают предел прочности угля при сжатии (10 МПа) и достигают 30 МПа. Таким образом, уголь в боках штрека 48-8 будет разрушен до глубины 5 м и возможность его сохранения в устойчивом состоянии весьма ограничена.

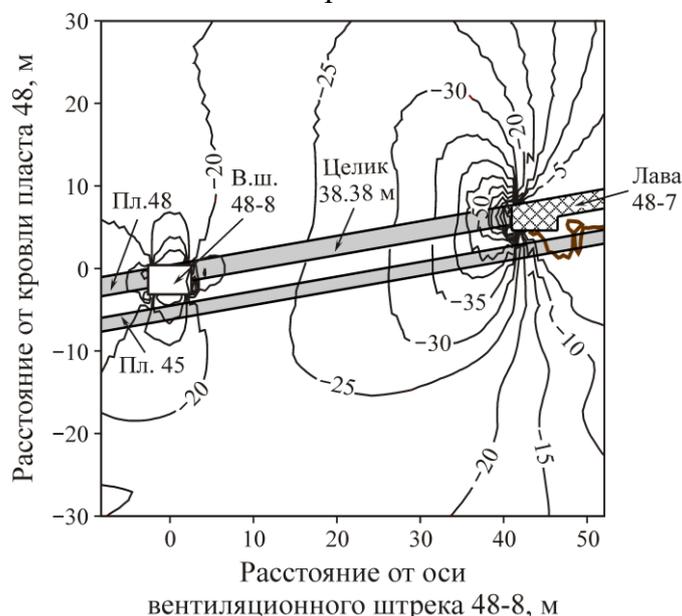


Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений (МПа) в угольном целике шириной 38.8 м и в окрестности подготовительных выработок после отработки верхнего выемочного столба 48-7

На втором этапе для обоснования ширины устойчивого угольного целика проведены вычислительные эксперименты для определения параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности выработок и угольном целике шириной 50, 60, 70 м. Результаты моделирования систематизированы в таблице, в которой выделены ширина устойчивой части угольного целика и конвергенция кровли и почвы вентиляционного штрека 48-8.

Результаты исследований ширины целика между конвейерным штреком 48-7 и вентиляционным штреком 48-8

Ширина целика, м	Ширина устойчивой части целика, м / %	Состояние вентиляционного штрека 48-8					
		Объем зоны предразрушения, м ³				Конвергенция, м	
		в почве	в кровле	в боку по падению	в боку по восстанию	кровля – почва	бок – бок
Мощность пород между пластами 48 и 45 – 2.58 м, скважина № 16886							
38.8	9 / 23	16.0	6.0	7.0	11.5	0.19	0.060
50	25 / 50	16.0	11.0	5.0	5.0	0.13	0.055
60	38 / 63	16.0	10.5	3.0	3.5	0.12	0.055
70	52 / 75	16.0	12.0	2.2	2.3	0.11	0.045

Согласно таблице угольный целик шириной 38.8 м неустойчивый и не обеспечивает поддержание в эксплуатационном состоянии подготовительной выработки нижележащего выемочного столба 48-8. Угольные целики шириной 50 и более метров сохраняют устойчивость.

Изолинии распределения отношения остаточной прочности угля и пород к исходной с учетом ползучести материала во время эксплуатации выработок в течение 6 мес. при ширине целика 50 м представлены на рис. 5. По результатам анализа данных таблицы и рис. 5, учитывая необходимость сокращения потерь угля, минимальную ширину целика между вентиляционным штреком 48-8 и конвейерным штреком 48-7, обеспечивающего сохранение несущей способности, рекомендуется принимать равной 50 м.

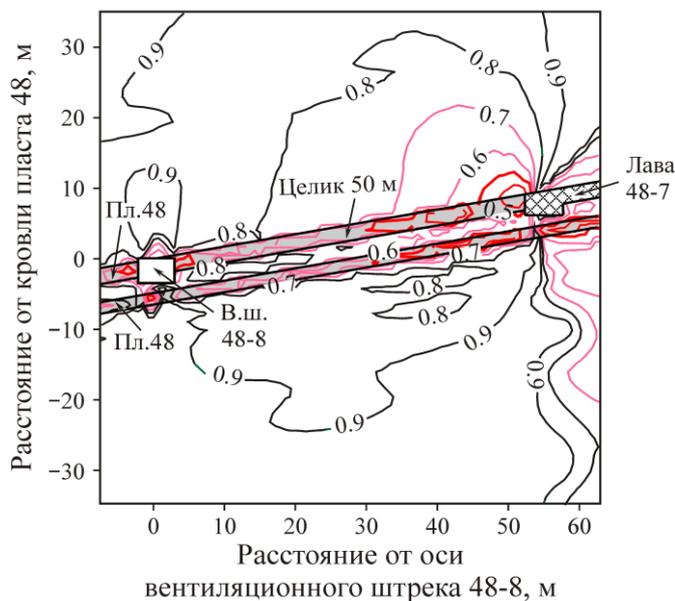


Рис. 5. Изолинии распределения отношения остаточной прочности угля и пород к исходной после отработки выемочного участка 48-7 (время эксплуатации выработок 6 мес., ширина целика 50 м)

ВЫВОДЫ

По результатам численного моделирования разработана методика обоснования ширины устойчивых угольных целиков между выемочными участками при интенсивной их подготовке и отработке с учетом изменения прочностных, деформационных и реологических свойств угля и пород. Предложенный подход обеспечивает прогноз геомеханических параметров подготовительных выработок и ширины устойчивого угольного целика между ними. Установлено, что проведение протяженных выработок и период их эксплуатации более 6 мес. приводит за счет ползучести горных пород к уменьшению несущего ядра целика и разрушению угля в боках выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Tarazanov I. G. and Gubanov D. A.** The results of the coal industry performance in Russia in January – December 2020, *Coal*, 2021, no. 3, pp. 27 – 43 (in Russian) [**Таразанов И. Г., Губанов Д. А.** Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2020 года // *Уголь*. — 2021. — № 3. — С. 27 – 43.]
2. **Artemiev V. B., Korshunov G. I., Loginov A. K., Shik V. M., and Yutyayev E. P.** Protection of preparatory workings by pillars in coal mines, Moscow, Publishing house “Mining” LLC “Cimmerian Center”, 2011, 204 pp. [**Артемьев В. Б., Коршунов Г. И., Логинов А. К., Шик В. М., Ютяев Е. П.** Охрана подготовительных выработок целиками на угольных шахтах. — М.: Изд-во “Горное дело” ООО “Киммерийский центр”, 2011. — 204 с.]
3. **Egorov P. V., Krasilnikov V. V., Kalinin S. I., and Zamyshlyayev V. N.** Development of very close seams in the mines of Kuzbass, Prokopyevsk, KuzNIUI, 1992, 286 pp. [**Егоров П. В., Красильников Б. В., Калинин С. И., Замышляев В. Н.** Разработка весьма сближенных пластов на шахтах Кузбасса. — Прокопьевск: КузНИУИ, 1992. — 286 с.]
4. **Timoshenko S. P. and Goodyer J.** Theory of elasticity, Moscow, Nauka, 1975, 576 pp. [**Тимошенко С. П., Гудьер Дж.** Теория упругости. — М.: Наука, 1975. — 576 с.]
5. **Fryanov V. N. and Pavlova L. D.** Modeling stress–strain state of rock mass under mining of complex-shape extraction pillar, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 134, pp. 1–5 (012020). – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/134/1/012020/pdf>
6. **Stumpf G. G., Ryzhkov Yu. A., Shalamanov V. A., and Petrov A. I.** Physical and technical properties of rocks and coals, Moscow, Nedra, 1994, 447 pp. [**Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А., Петров А. И.** Физико-технические свойства горных пород и углей. — М.: Недра, 1994. — 447 с.]
7. **Kuzmin J. O. and Zhukov V. S.** Modern geodynamics and variations of the physical properties of rocks, Moscow, Publisher “Gornaya kniga”, 2012, 263 pp. [**Кузьмин Ю. О., Жуков В. С.** Современная геодинамика и вариации физических свойств пород. — М.: Горная книга, 2012. — 263 с.]
8. **Tsvetkov A. B., Pavlova L. D., and Fryanov V. N.** Detection of regularities in variation in geomechanical behavior of rock mass during multi-roadway preparation and mining of an extraction panel, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 134, pp. 1–5 (012067). – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/134/1/012067/pdf>
9. **Tsvetkov A. B., Pavlova L. D., and Fryanov V. N.** Numerical simulation of geomechanical state of coal massif in the vicinity of underground workings in the superimposed seams, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 134, pp. 1–7 (012005). – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/84/1>
10. **Pavlova L. D. and Fryanov V. N.** Substantiation of the geomechanical parameters of a robotized excavation of coal seams at great depths according to the results of numerical simulation, *Mining Journal*, 2018, no. 2, pp. 48–52. (in Russian) [**Павлова Л. Д., Фрянов В. Н.** Обоснование геомеханических параметров роботизированной выемки угольных пластов на больших глубинах по результатам численного моделирования // *Горный журнал*. — 2018. — № 2. — С. 48 – 52.]
11. **Erzhanov Zh. S.** The theory of rock creep and its applications, Alma-Ata, Nauka, 1964, 173 pp. [**Ержанов Ж. С.** Теория ползучести горных пород и ее приложения. — Алма-Ата: Наука, 1964. — 173 с.]
12. **Certificate** of registration of electronic resource no. 17997. A set of problem-oriented programs for modeling geomechanical processes in a mountain range in underground mining of coal seams, E. S. Kornev, L. D. Pavlova, V. N. Fryanov, Siberian State Industrial University – State Akademiya of Sciences, INIPI RAO, OFER-NiO; Reg. date 01.03.2012. (in Russian) [**Свидетельство** о регистрации электронного ресурса № 17997. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования геомеханических процессов в горном массиве при подземной разработке угольных пластов / Е. С. Корнев, Л. Д. Павлова, В. Н. Фрянов, ФГБОУ ВПО СибГИУ – Гос. академия наук, ИНИПИ РАО, ОФЭРНИО; Дата регистр. 01.03.2012.]

13. **Klishin V. I., Fryanov V. N., Pavlova L. D., and Opruk G. Yu.** Modeling top coal disintegration in thick seams in longwall top coal caving, *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 247–256. [Клишин В. И., Фрянов В. Н., Павлова Л. Д., Опрук Г. Ю. Моделирование дезинтеграции подкровельной толщи при отработке мощного пласта с выпуском угля на забойный конвейер // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 79–88.]
14. **Makarov P. V., Smolin I. Yu., Stephanov Yu. P., Kuznetsov P. V., Trubitsyn A. A., Trubitsyn N. V., Voroshilov S. P., and Voroshilov Ya. S.** Nonlinear mechanics of geomaterials and geomedia, Publishing house “Geo”, Novosibirsk, 2007, 235 pp. [Макаров П. В., Смолин И. Ю., Стефанов Ю. П., Кузнецов П. В., Трубицын А. А., Трубицына Н. В., Ворошилов С. П., Ворошилов Я. С. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. — Новосибирск: изд-во “Гео”, 2007. — 235 с.]
15. **Juncker M., Polisos N., Albert M., and Hooke A.** Roof control in seam workings: trans, translation from German, Moscow, Publishing house “Mining” LLC “Cimmerian Center”, 2012, 624 pp. [Юнкер М., Полисос Н., Альбер М., Хук А. Контроль кровли в пластовых выработках. — М.: Изд-во “Горное дело” ООО “Киммерийский центр”, 2012. — 624 с.]
16. **Korshunov G. I., Loginov A. K., Shik V. M., and Artemiev V. B.** Geomechanics at coal mines, Moscow, Publishing house “Mining” LLC “Cimmerian Center”, 2011, 388 pp. [Коршунов Г. И., Логинов А. К., Шик В. М., Артемьев В. Б. Геомеханика на угольных шахтах. — М.: Изд-во “Горное дело” ООО “Киммерийский центр”, 2011. — 388 с.]
17. **Klishin V. I., Opruk G. Yu., Pavlova L. D., and Fryanov V. N.** Active prefracture methods in top coal caving technologies for thick and gently dipping seams, *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 395–403. [Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Обоснование активных способов предразрушения подкровельной толщи при отработке мощных пологих пластов с выпуском угля // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 75–84.]