



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ЦЕЛИКОВ  
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ МОЩНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

**П. В. Гречишкин<sup>1</sup>, О. А. Петрова<sup>2</sup>, Н. Ю. Трошков<sup>1</sup>, Ф. Ф. Баширов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела —  
межотраслевой научный центр “ВНИМИ”,*

*E-mail: kf@vnimi.ru, Сосновый бульвар 1, г. Кемерово 650002, Россия*

<sup>2</sup>*Сибирский государственный индустриальный университет,*

*E-mail: ol\_petrova@mail.ru, пр. Бардина 25, г. Новокузнецк 654041, Россия*

По результатам шахтных геофизических исследований угольных целиков комплексом “ANGEL-M” с функцией “Аппаратуры электрометрической шахтной” и численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород получена эмпирическая зависимость относительной напряженности и вертикальных напряжений в целиках при отработке мощных угольных пластов. С использованием показателя напряженности массива горных пород разрабатываются проектные решения по профилактике геодинамических явлений.

*Шахта, угольный пласт, целик, штрек, очистной забой, численное моделирование, геофизические методы, горное давление, свойства пород*

**GEOMECHANICAL FORECAST OF THE PILLAR CONDITIONS  
IN UNDERGROUND MINING OF THICK COAL SEAMS**

**P. V. Grechishkin<sup>1</sup>, O. A. Petrova<sup>2</sup>, N. Yu. Troshkov<sup>1</sup>, and F. F. Bashirov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Research Institute of Rock Mechanics and Mine Survey – the Inter-branch Research Center “VNIMI”,*

*E-mail: kf@vnimi.ru, Sosnovyy bul’var 1, Kemerovo 650002, Russia*

<sup>2</sup>*Siberian State Industrial University,*

*E-mail: ol\_petrova@mail.ru, pr. Bardina 25, Novokuznetsk 654041, Russia*

Based on the results of mine geophysical surveys of coal pillars using the ANGEL-M system with the function of electrometric mine equipment and numerical modeling of the stress-strain state of a rock mass, an empirical dependence of the relative intensity and vertical stresses in pillars was obtained when mining thick coal seams. Design solutions for the prevention of geodynamic phenomena are developed using the stress index of the rock mass.

*Mine, coal seam, pillar, drift, stoping face, numerical modeling, geophysical methods, rock pressure, rock properties*

В последние 10–15 лет интенсивно развиваются рекомендованные “Методическими указаниями...” [1] и другими документами геофизические и сейсмические методы исследований состояния массива горных пород [2, 3]. Практика использования геофизических методов показала, что оценки природных и техногенных рисков возникновения опасных для персонала событий недостаточно надежны [4–7]. В этой связи предлагается осуществить методический подход синтеза в единой геоинформационной системе сейсмических, деформационных, горно-геологических и горнотехнических данных с результатами вычислительных экспериментов и математического моделирования геомеханических процессов. Реализация этого подхода с ретроспективным статистическим анализом геофизических и геомеханических параметров позволит прогнозировать опасные техногенные события в соответствии с перспективными планами развития горных работ.

Для осуществления предлагаемой научной идеи проведены комплексные шахтные измерения параметров геомеханических процессов с помощью традиционных методов определения деформаций пород в окрестности горных выработок [8], геофизических методов [1] и вычислительных экспериментов [9]. В качестве объекта исследований принята геотехнология слоевой отработки склонных к самовозгоранию высокогазоносных мощных пологих угольных пластов с охраной подготовительных выработок угольными целиками. Ее выбор связан с высокой производительностью комплексно-механизированных очистных забоев при ограничениях по устойчивости выработок, необходимости проведения трудоемких ремонтных и профилактических работ для снижения влияния указанных негативных факторов.

Цель исследований — обоснование геомеханических параметров охраняемых угольными целиками подготовительных выработок для обеспечения их безремонтной эксплуатации и качественной изоляции выработанных пространств соседних выемочных столбов, в том числе на разных слоях. Применялись следующие методы исследования:

— геофизические измерения вынужденного электромагнитного излучения (ВЭМИ) комплексом “ANGEL-M” с функцией “Аппаратуры электрометрической шахтной” (АЭШ);

— численное моделирование напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности очистных и подготовительных выработок.

Исследования проведены в горно-геологических и горнотехнических условиях шахты “Сибиргинская” ПАО “Южный Кузбасс”. По слоевой системе разработки отрабатывался угольный пласт мощностью 7.16–9.63 м длинными столбами по простиранию. До начала шахтных наблюдений верхний слой пласта был отработан. Осуществлялась подготовка нижнего слоя с оставлением межслоевой угольной пачки мощностью 0.9 м. Пласт сложного строения включает 2–3 пачки угля и 1–2 породных прослоя аргиллитов и алевролитов мощностью 0.01–0.60 м. Предел прочности угля при сжатии 9.26–19.39 МПа, угол падения пласта 3–11°. Непосредственная кровля нижнего слоя представлена обрушенными породами кровли верхнего слоя пласта. Основная труднообрушаемая кровля мощностью 17.5 м включает песчаники с пределом прочности при сжатии до 70 МПа. Уголь пласта весьма склонный к самовозгоранию, с глубины 250 м отнесен к опасным по горным ударам. Глубина ведения горных работ 420–450 м. Экспериментальные исследования выполнялись при подготовке и отработке выемочного столба лавы, работающей по нижнему слою пласта. Длина лавы 180 м.

Схема расположения угольного целика между очистным выработанным пространством верхнего слоя ранее отработанного выемочного столба и выемочным столбом отрабатываемого нижнего слоя представлена на рис. 1а, угольного целика между очистным выработанным пространством верхнего слоя выемочного вышерасположенного столба и выемочным столбом отрабатываемого нижнего слоя — на рис. 1б. Глубина разработки 355 м. По результатам моделирования получены параметры напряженно-деформированного состояния в окрестности этих целиков, на рис. 1 в качестве примера приведены вертикальные напряжения.

Видно, что максимальные вертикальные напряжения до 50 МПа формируются в краевых участках угольного пласта по первому слою. Подготовительные выработки по нижнему слою находятся в зоне разгрузки. С использованием полученных в результате численного моделирования главных напряжений при упругом и упругопластическом состоянии массива горных пород по отношению касательных напряжений на предельных огибающих кругов Мора рассчитано отношение остаточной прочности угля и пород к исходной прочности  $R = \tau_{уп}/\tau_y$  ( $\tau_{уп}$ ,  $\tau_y$  — предельные касательные напряжения огибающей кругов Мора при упругопластическом и упругом деформировании угля или пород).

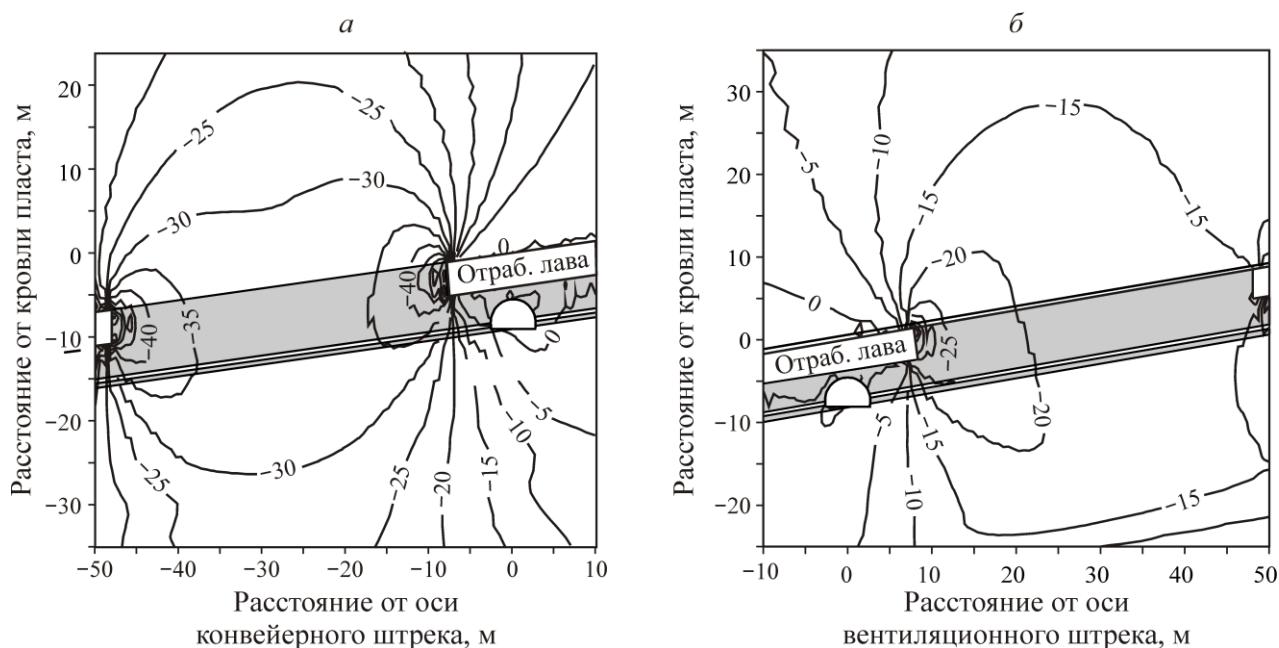


Рис. 1. Изолинии вертикальных напряжений в окрестности угольных целиков и штреков, МПа: *a* — между очистным выработанным пространством верхнего слоя нижерасположенного выемочного столба лавы, ПК 55; *б* — между очистным выработанным пространством верхнего слоя вышерасположенного выемочного столба лавы и выемочным столбом отработываемого нижнего слоя, ПК35 (отраб. лава — отработанная лава)

На основе маршрутного мониторинга состояния боков и кровли пластовых выработок и сравнения с результатами численного моделирования установлено, что при  $R < 0.5$  происходит интенсивный отжим угля с боков выработки и разрушение пород кровли с формированием существенных прогибов решетчатой затяжки, перекрывающей пространство между рядами металлической податливой крепи. При  $0.5 \leq R \leq 0.7$  начинается отслоение породных или угольных блоков без существенной деформации элементов перекрытия межрамного пространства. В случае  $R \geq 0.7$  возможно возникновение трещин при сохранении эксплуатационной устойчивости вмещающего массива выработки.

На рис. 2 показано распределение отношения остаточной прочности угля и пород к исходной прочности в окрестности краевых участков пласта верхнего слоя и надработанных вентиляционного и конвейерного штреков отработываемого столба, пройденных по нижнему слою после отработки верхнего слоя. Видно, что угольный пласт в окрестности штреков разрушается, а в краевой части пласта зона разрушения достигает 5 м в сторону угольного целика у конвейерного штрека и 6 м — у вентиляционного. Опыт ведения очистных работ по первому слою и результаты моделирования подтверждают, что труднообрушающиеся кровли первого слоя образуют зависающие консоли у целиков, по размерам превосходящие величину вторичного шага посадки основной кровли, что и создает повышенное воздействие на угольные целики, в том числе на вмещающий массив выработок, пройденных по нижнему слою. Размеры области разрушения массива в окрестностях вентиляционного и конвейерного штреков показывают, что для обеспечения эксплуатационной устойчивости штреков по нижнему слою необходимо применять рамную крепь.

Параллельно с вычислительным экспериментом проведены шахтные геофизические исследования состояния угольных целиков методом измерения и регистрации параметров вызванного электромагнитного излучения (ВЭМИ) с применением комплекса “ANGEL-M” по методике [2] в горно-геологических и горнотехнических условиях отработываемого выемочного столба

(рис. 1). В качестве основного геофизического параметра для анализа принят показатель относительной напряженности массива горных пород  $F$ , определяемый по отношению амплитуд регистрируемых электромагнитных импульсов в плоскости, перпендикулярной оси выработки. Для этого излучающая и приемная антенны устанавливаются в трех направлениях бок – бок, кровля – почва и вдоль выработки [1 – 3].

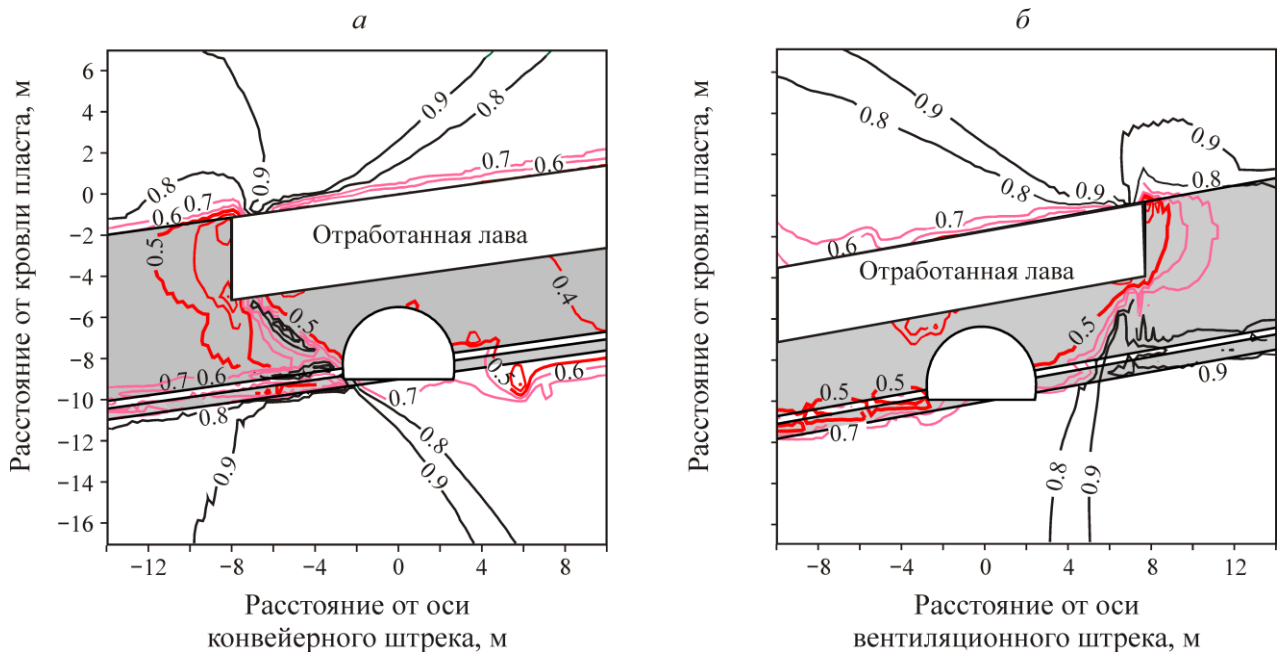


Рис. 2. Изолинии отношения остаточной прочности угля и пород к исходной в окрестности угольных целиков и штреков по нижнему слою  $R$ : *a* — в окрестности конвейерного штрека; *б* — в окрестности вентиляционного штрека, ПК35

По величине показателя напряженности  $F$  выявлены следующие критерии для определения состояния массива горных пород [1]:

$F \geq 1.0$  — уголь или порода разгружены, трещиноватые;

$F = 0.2 - 1.0$  — уголь или порода находятся в плотном слабонапряженном (неудароопасном состоянии);

$F = 0.13 - 0.19$  — соответствует пограничному уровню напряжений (переход от категории неопасно к категории опасно);

$F = 0.07 - 0.12$  — высокий уровень напряжений, соответствующий категории опасно.

Результаты измерений аппаратурой “ANGEL-M” АЭШ-1 показателя напряженности  $F$  в окрестности штреков выемочного столба представлены на рис. 3. Согласно рис. 3 и критерию относительной напряженности  $F$  краевая часть целика в окрестности штреков разрушена на 5–6 м, зона устойчивого монолитного состояния в пласте распространяется далее зоны разрушения на расстояние до 12–14 м. Данные на рис. 3 могут быть получены только после проведения горных выработок. Однако в горной практике необходимо осуществлять оценку напряженного состояния массива (НДС) горных пород до начала подготовки запасов к выемке, т. е. на стадии разработки проектной документации. Для этого рекомендуется использовать эмпирические зависимости показателя  $F$  от основных геомеханических параметров, установленных в процессе вычислительного эксперимента. По результатам шахтного и вычислительного экспериментов, проведенных в одинаковых горно-геологических и горнотехнических условиях, составлена исходная таблица.

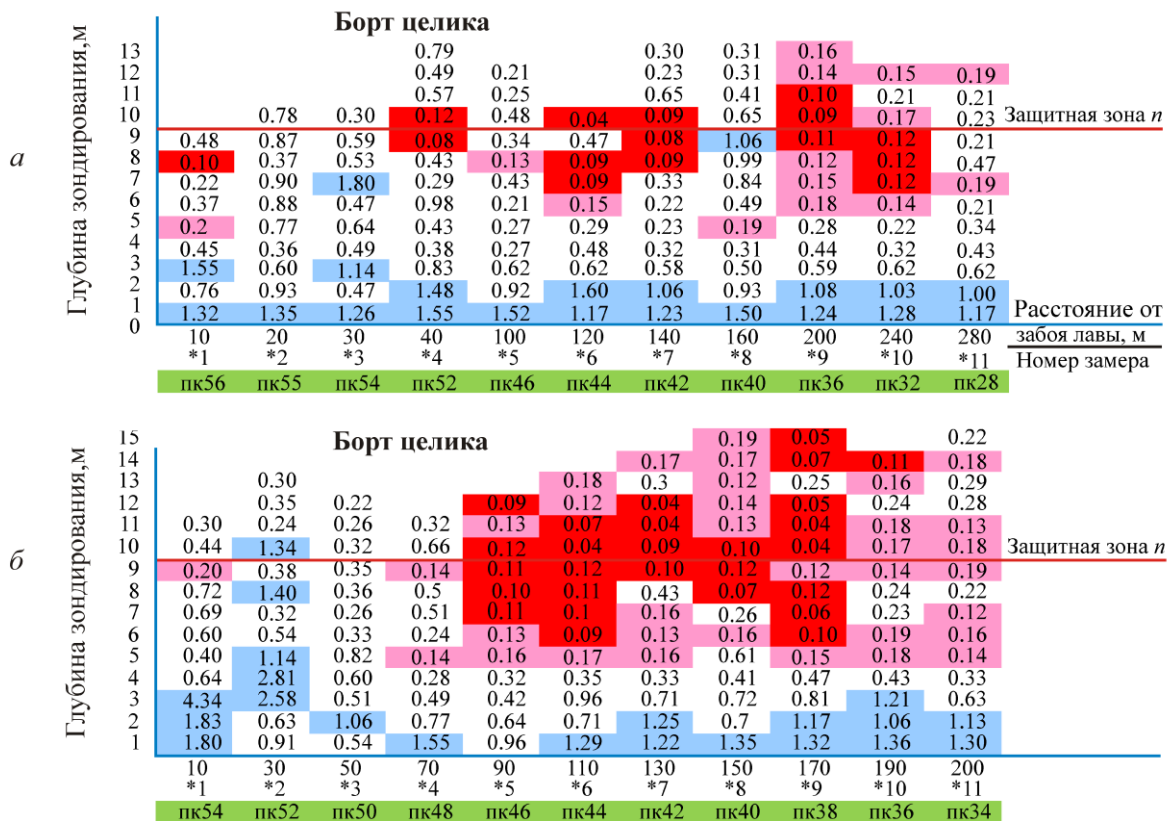


Рис. 3. Результаты геофизических исследований состояния угольных межлавных целиков методом ВЭМИ между выработками обрабатываемого выемочного столба и очистными выработанными пространствами верхнего слоя: *а* — вышележащего выемочного столба; *б* — нижележащего

Сравнение результатов численного моделирования геомеханических параметров и шахтных измерений относительного показателя *F* на ПК35

Расстояние от бока штрека, м	Вычисленные параметры НДС			Показатель напряженности <i>F</i>
	напряжение, МПа		отношение остаточной прочности к исходной	
	вертикальное	горизонтальное		
Целик у вентиляционного штрека, ПК 35				
1	-2.02	-0.6	0.54	1.36
2	-2.55	-0.93	0.6	1.06
3	-4.1	-1.63	0.82	1.21
4	-6.78	-1.75	0.92	0.43
5	-11.04	-1.82	0.85	0.18
6	-16.27	-1.4	0.88	0.16
7	-20.43	-3.12	0.85	0.23
8	-23.01	-5.66	0.82	0.24
9	-24.04	-4.89	0.84	0.14
10	-24.33	-6.52	0.82	0.17
11	-24.22	-9.18	0.85	0.18
12	-23.87	-5.98	0.8	0.24
13	-23.13	-6.88	0.87	0.16
Целик у конвейерного штрека, ПК 35				
1	-2.99	-2.63	0.7	1.24
2	-4.41	-5.94	0.63	1.08
3	-7.01	-8.67	0.57	0.59
4	-12.4	-10.34	0.52	0.44
5	-21.31	-10.75	0.49	0.28
6	-30.24	-11.37	0.51	0.18
7	-34.41	-12.33	0.54	0.15
8	-35.92	-13.43	0.55	0.12
9	-36.32	-14.43	0.55	0.11
10	-36.22	-15.27	0.56	0.09
11	-35.92	-15.99	0.57	0.10
12	-39.07	-16.6	0.59	0.14
13	-38.57	-17.3	0.59	0.16

На рис. 4 показаны зависимости основных геомеханических параметров массива и относительного показателя  $F$ . Видно, что при удалении точек в угольном целике от боков выработки геомеханические параметры существенно изменяются. Для количественной оценки связи относительного показателя  $F$  и геомеханических параметров построены эмпирические зависимости.

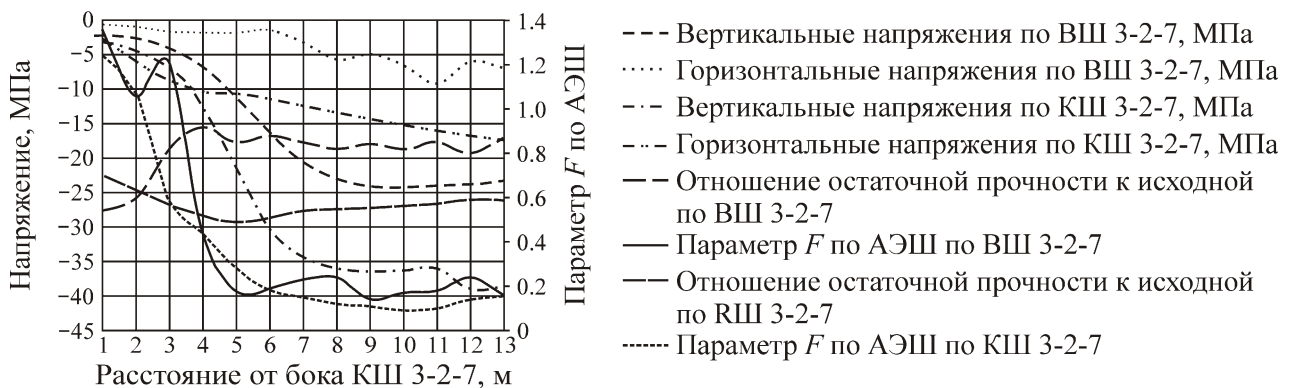


Рис. 4. Изменение основных геомеханических параметров массива и показателя  $F$

Установлено, что наиболее тесно показатель  $F$  коррелирует с величинами вертикальных напряжений (рис. 5). Полученную зависимость предлагается использовать при проектировании документации для ведения горных работ при слоевой отработке мощных угольных пластов.

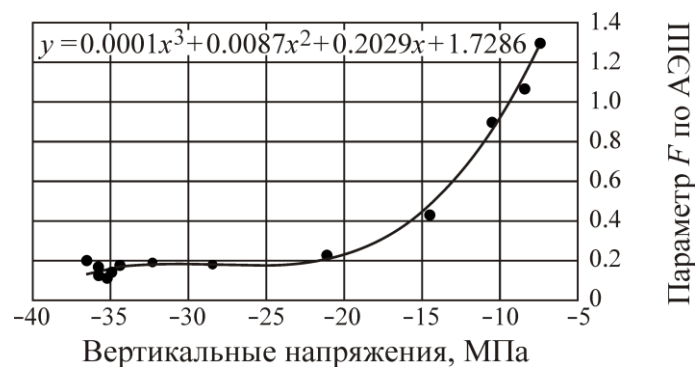


Рис. 5. Зависимость относительного показателя  $F$  от вертикальных напряжений

## ВЫВОДЫ

Установлена корреляционная зависимость относительного показателя напряженности массива горных пород, определяемого по результатам геофизических исследований методом вынужденной электромагнитной эмиссии комплексом “ANGEL-M” с функцией “Аппаратуры электрометрической шахтной” состояния угольных целиков и вертикальных напряжений в угольных целиках при отработке мощных угольных пластов. Рекомендуемый методический подход прогноза геодинамических явлений в краевых участках удароопасных угольных пластов и целиков на стадии разработки проектной документации включает численное моделирование геомеханических процессов в соответствии с пространственно-временным расположением системы очистных и подготовительных выработок, определение относительного показателя по корреляционной зависимости и разработку проектных решений по профилактике геодинамических явлений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Guidelines** for the creation of rock mass control systems and forecasting rock bumps as elements of a multifunctional safety system for coal mines, St. Petersburg VNIMI, 2012, 82 pp. [**Методические указания** по созданию систем контроля горного массива и прогноза горных ударов как элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт. — СПб.: ВНИМИ, 2012. — 82 с.]

2. **Yakovlev D. V. and Mulev S. N.** Experience of using multifunctional geophysical equipment Angel-M in the coal and ore industries, *Ugol*, 2014, no. 10 (1063), pp. 14–19. [**Яковлев Д. В., Мулев С. Н.** Опыт применения многофункциональной геофизической аппаратуры Ангел-М в угольной и рудной промышленности // *Уголь*. — 2014. — № 10 (1063). — С. 14–19.]
3. **Panin S. F., Mulev S. N., and Shtirts V. A.** Improvement of the technology for forecasting the rock burst hazardous state of the massif using the hardware complex “ANGEL-M” in the conditions of the Tashtagol and Sheregesh mines, *Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources*, 2014, no. 1, pp. 369–376. [**Панин С. Ф., Мулев С. Н., Штирц В. А.** Совершенствование технологии прогноза удароопасного состояния массива с использованием аппаратурного комплекса “ANGEL-M” в условиях Таштагольского и Шерегешского рудников // *Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. — 2014. — № 1. — С. 368–375.]
4. **Varyakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K., Babkin A. I., and Tsayukov A. A.** Seismic-geomechanical forecast of the state of the water-protective layer at potash mines, *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 981–992. [**Барях А. А., Санфиоров И. А., Федосеев А. К., Бабкин А. И., Цаюков А. А.** Сейсмогеомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 6. — С. 10–22.]
5. **Kalinin S. I., Pudov E. Yu., and Kuzin E. G.** Prospects for the use of GPR for determining the state of the roof of mine workings, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 215–219. [**Калинин С. И., Пудов Е. Ю., Кузин Е. Г.** Перспективы применения георадиолокации для определения состояния кровли шахтовых выработок // *ГИАБ*. — 2015. — № 1. — С. 215–219.]
6. **Kavardakov A. A., Kuzin E. G., and Pudov E. Yu.** Experience of using GPR in the conditions of the Kotinskaya mine to assess the state of preparatory mine workings, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2016, no. 12, pp. 166–173. [**Кавардаков А. А., Кузин Е. Г., Пудов Е. Ю.** Опыт применения георадиолокации в условиях шахты Котинская для оценки состояния подготовительных горных выработок // *ГИАБ*. — 2016. — № 12. — С. 166–173.]
7. **Zakharov V. N., Nazarova L. A., Protasov M. I., Nazarov L. A., Panov A. V., and Averin A. P.** Assessment of horizontal external stresses in the Vorkuta mine field using seismic tomography data, *Journal of Mining Science*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 993–1000. [**Захаров В. Н., Назарова Л. А., Протасов М. И., Назаров Л. А., Панов А. В., Аверин А. П.** Оценка горизонтальных компонент внешнего поля напряжений шахты “Воркутинская” по данным сейсмической томографии // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 6. — С. 23–31.]
8. **Kuznetsov G. N., Ardashev N. A., and Filatov N. A.** Methods and tools for solving problems of mining geomechanics, Moscow, Nedra, 1987, pp. 248. [**Кузнецов Г. Н., Ардашев Н. А., Филатов Н. А.** Методы и средства решения задач горной геомеханики. — М.: Недра, 1987. — 248 с.]
9. **Certificate** of registration of an electronic resource no. 21123. A complex of problem-oriented programs for modeling the formation and distribution of hazardous zones in a gas-bearing geomass, V. N. Fryanov, O. A. Petrova, T. V. Petrova, FGOBU VPO Siberian State Industrial University–State Academy of Sciences, INIPI RAO, OFERNiO; Register date 08.03.2015. [**Свидетельство** о регистрации электронного ресурса № 21123. Комплекс проблемно-ориентированных программ для моделирования формирования и распределения опасных зон в газоносном геомассиве / В. Н. Фрянов, О. А. Петрова, Т. В. Петрова, ФГБОУ ВПО Сиб. гос. индустр. ун-т.–Гос. акад. наук, ИНИПИ РАО, ОФЭРНiO; Дата регистр. 03.08.2015.]