

УДК 622.333.012:550.8

**ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЭМПИРИЧЕСКОГО МЕТОДОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН ГОРНОГО УДАРА, ЗАФИКСИРОВАННОГО
В ШАХТЕ ВЕРХНЕСИЛЕЗСКОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА ПОЛЬШИ**

П. Литва, Г. Мерта

*Центральный институт горного дела,
E-mail: plitwa@gig.eu, пл. Гваркова, 1, 40-166, г. Катовице, Польша*

Выполнен анализ причин горного удара, произошедшего в 2019 г. в одной из шахт Верхнесилезского каменноугольного бассейна Польши, в окрестности действующего сплошного забоя при сложных горнотехнических и геологических условиях. В шахте при ведении очистных работ зафиксирован высокий уровень сейсмической активности. Применяемые методы оценки состояния массива пород характеризуются сложностью прогнозирования толчков, приводящих к горному удару или релаксации напряжений. Представлены результаты примененных аналитического и эмпирического методов, обеспечивших возможность определения причин горного удара и выявления принципов дальнейшей работы шахты.

Природные угрозы, производственная безопасность, горный удар, методы прогнозирования горного удара

DOI: 10.15372/FTPRPI20210604

В Польше угроза горных ударов в подземных угольных и меднорудных шахтах существует на протяжении многих лет. Несмотря на значительное снижение объемов добычи угля за последние десятилетия со 110 в 1999 г. до 62 млн т в 2019 г., данная проблема в настоящее время весьма актуальна в шахтах Верхнесилезского каменноугольного бассейна. На рис. 1 представлено расположение данного бассейна на карте Польши.



Рис. 1. Расположение Верхнесилезского каменноугольного бассейна

На рис. 2 показаны объемы добычи и высокоэнергетические толчки за 1980–2019 гг. Отчетливо видно снижение общего объема добычи угля при почти неизменных объемах добычи угля из пластов, предрасположенных к горным ударам и с высокоэнергетической сейсмической активностью, связанной с горными работами (сейсмическая энергия толчков в массивах горных пород $\geq 10^5$ Дж). Такое состояние связано с горными работами, проводимыми с увеличением глубины в сложных регионах, где на угрозу горного удара влияют не только геологические условия (разломы, складчатость, бассейны и т. д.), но и предыдущая горнодобывающая деятельность [1–3].



Рис. 2. Статистика высокоэнергетических толчков при подземной добыче каменного угля, включая разработку пластов, склонных к горным ударам

Влияние горнотехнических и геологических условий, включая глубину добычи, на уровень угрозы горного удара в выработках изучается во всем мире. Случаи горных ударов происходят в глубоких угольных и рудных шахтах, а также в золоторудных шахтах Южной Африки и Индии, в железорудных шахтах России и каменноугольных шахтах Китая [1, 2]. 22 января 2019 г. в области сплошного забоя одной из шахт, расположенных в юго-западной части Верхнесилезского бассейна, произошел толчок сейсмической энергией $9.8 \cdot 10^7$ Дж. Эпицентр толчка зафиксирован на расстоянии ~ 10 м впереди очистной поверхности сплошного забоя и ~ 90 м от сплошного забоя, расположенного вдоль выработок разрабатываемого ранее забоя. На вертикальном разрезе слоев горных пород эпицентр толчка находился выше пласта 703/1 на ~ 100 м (рис. 3). Данный толчок привел к горному удару и групповому несчастному случаю. Выработка была разрушена на участке на расстоянии ~ 100 м перед фронтом сплошного забоя, а также повреждены горные машины, оборудование и кровельная крепь.

Разработка пласта 703/1 осуществлялась в сложных геологических и горнотехнических условиях. Ситуация требовала всестороннего анализа, который был выполнен командой экспертов из Центрального горного института (Катовице), куда были приглашены сторонние эксперты. Большое количество экспертов обуславливалось тем, что в рассматриваемой области присутствовали другие угрозы, например угроза выброса метана. В настоящей работе представлены некоторые результаты расчетов напряженного состояния разрабатываемого массива и деформированного состояния массива горных пород, залегающих выше разрабатываемого пласта, а также заключения о причинах данного сейсмического явления.

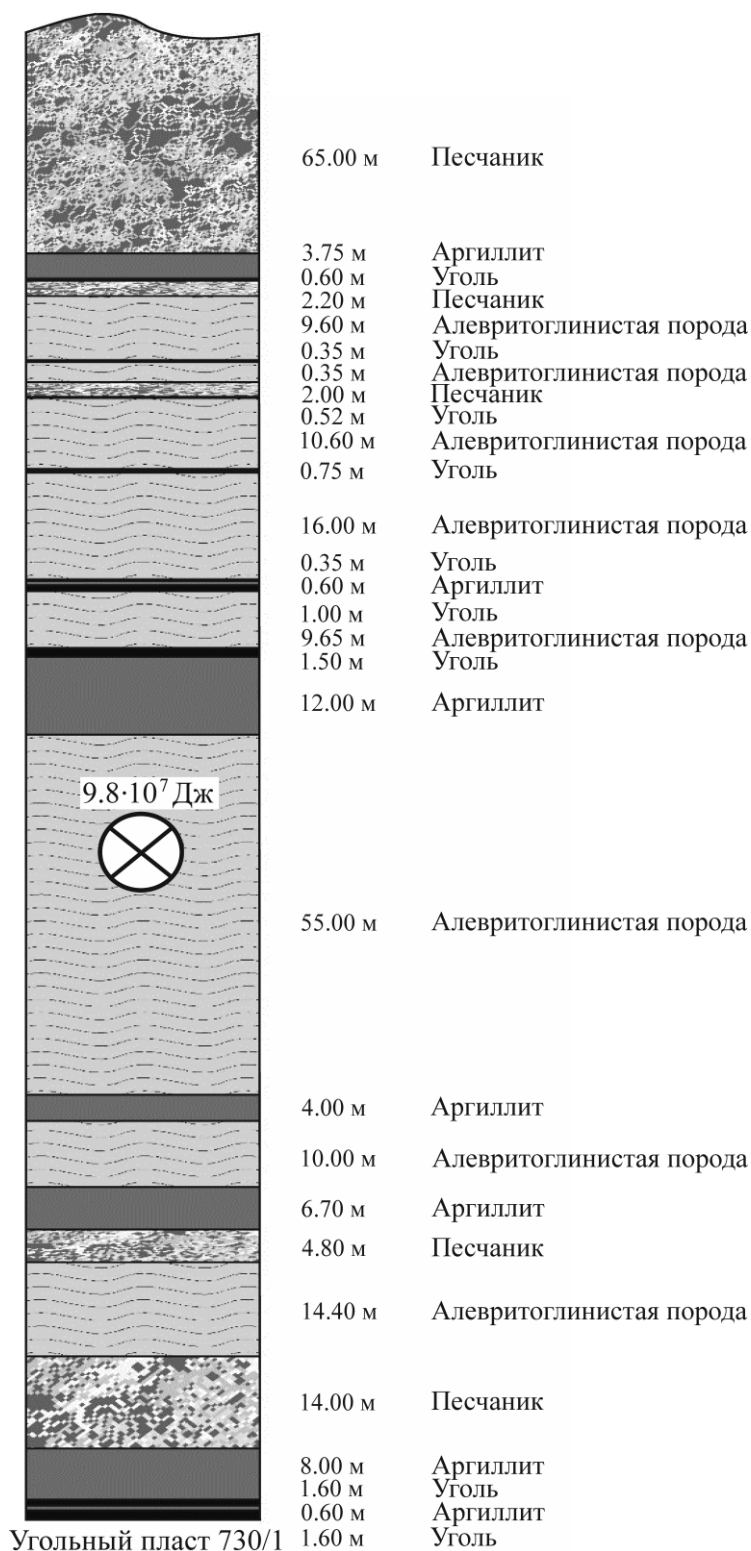


Рис. 3. Геологический профиль с указанием возможного расположения эпицентра толчка

Использованные аналитические методы позволили оценить сейсмическую угрозу, в том числе угрозу горного удара, определить условия дальнейшей эксплуатации забоя. В области рассматриваемого сплошного забоя, заново введенного в эксплуатацию с учетом правил, определенных экспертами, не выявлено горных ударов или релаксации напряжений.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Разработка пласта 703/1 сплошным забоем IV осуществлялась системой поперечного обрушения. В рассматриваемой области пласт 703/1 частично разделен на два слоя: нижний мощностью 1.08–1.50 м и верхний мощностью 0.5–1.0 м, между ними слой аргиллита мощностью 0.30–0.46 м. Мощность пласта 703/1 составляет 2.40–2.96 м, глубина залегания 1003–1126 м. Непосредственная кровля представлена слоем аргиллита с включением песчаника, подошва — аргиллитом с разной степенью включений песка, который локально переходит в песчаник. К северу от забоя имеется разрыв *K* с высотой падения 80 м. Ось бассейна проходит через область сплошного забоя IV в пласте 703/1.

В области сплошного забоя IV расположены границы ранее разрабатываемых пластов: пласт 706, залегающий ниже, на расстоянии ~43 м; пласт 624, залегающий выше, на расстоянии ~300 м; пласт 620/1-2, залегающий выше, на расстоянии ~460 м. Контур сплошного забоя проходит между выработками забоя III и разрывом *K*. Разработка пласта 703/1 сплошным забоем IV началась 09.07.2018 г. С момента начала разработки пласта 703 до момента горного удара, произошедшего 22.01.2019 г., пройденное расстояние составило 526 м. На рис. 4 представлена область рассматриваемого забоя с отметками высокоэнергетических толчков, зафиксированных во время последовательной разработки сплошных забоев.

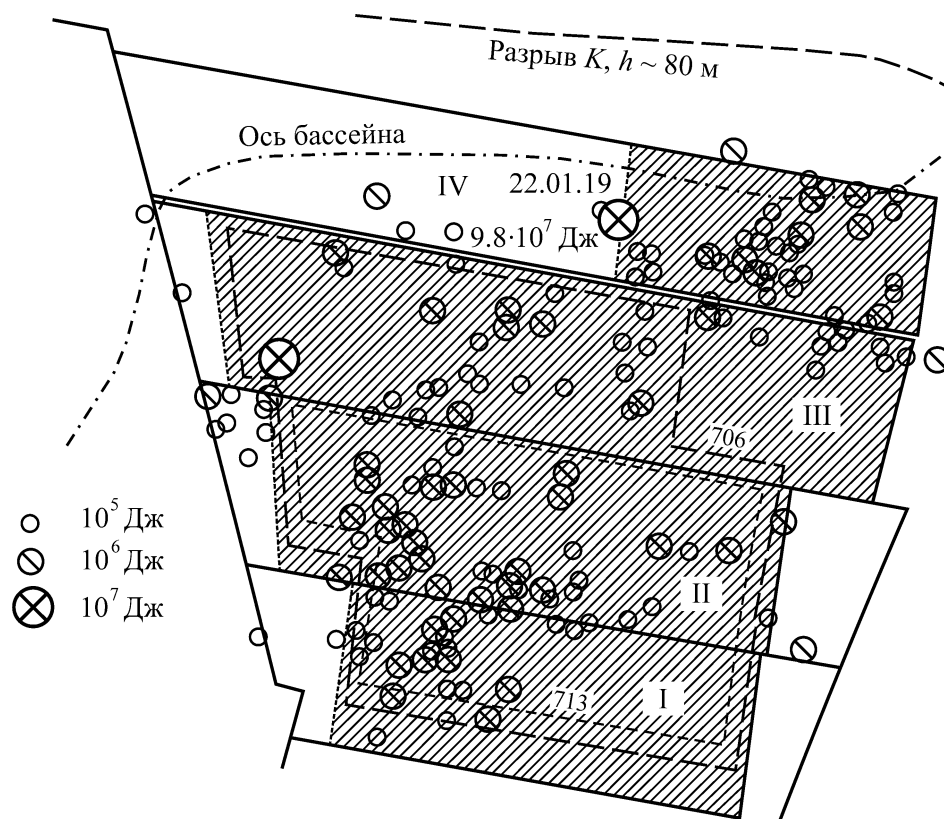


Рис. 4. Распределение толчков с энергией более $1 \cdot 10^5$ Дж, зафиксированных при разработке пласта 703/1 сплошными забоями I, II, III и IV

В ходе разработки пласта 703/1 отмечалась высокая сейсмическая активность. Собранные данные сведены в таблицу.

Число N и энергия A сейсмических толчков при разработке пласта 703/1

Сплошной забой	Количество толчков различных энергетических классов, Дж							ΣN	ΣA , Дж
	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8		
I	3	102	90	11	8	0	0	214	$4.6 \cdot 10^7$
II	3	97	442	42	36	0	0	620	$2.2 \cdot 10^8$
III	0	34	138	8	1	1	0	182	$2.2 \cdot 10^7$
IV*	273	1193	416	42	14	1	0	1939	$1.1 \cdot 10^8$

IV* — до момента горного удара.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ СПЛОШНОГО ЗАБОЯ IV

Методика расчета. Оценка влияния границ разработки на механическое состояние массива наиболее точно отражается результатами прямых измерений. На практике такие попытки осуществлялись с помощью геомеханических методов, измерения гальванической деформации углерода на фронте сплошного забоя, отклонения непосредственной кровли или с помощью целевой гидроизоляции [4, 5]. Использование ряда геофизических измерений, определение профиля и наблюдение за сейсмической активностью позволили разработать надежные зависимости повышения напряжений в массиве горных пород в окрестностях ранее пройденной выработки. Большое количество измерений [6] дало возможность обобщить полученные результаты для выявления средних условий пространственно-временного распределения скоростей продольных сейсмических волн, распространяющихся в пласте. Такие сейсмические волны связаны с границами выработок и разработкой с последующей закладкой. В [6] представлены соотношения, связывающие скорость и скоростные аномалии сейсмических волн с давлением на заданной глубине, даны оценки приращения напряжения в массиве пород в условиях Верхнесилезского каменноугольного бассейна, сформулированы количественные критерии.

В Центральном горном институте Польши разработан метод оценки распределения напряжений, вызванных отдельными структурными элементами массива, находящимися под влиянием добычи. В его рамках эмпирические данные могут использоваться с учетом следующих предположений:

- начальное состояние обусловлено естественным уровнем напряжений в нетронутом массиве горных пород;
- в систему расчета вводятся геометрические параметры элементов, нарушающих начальное состояние;
- каждому элементу дается характеристика влияния на состояние напряжения;
- суммирование влияния отдельных элементов выполняется на основе суперпозиции.

В ходе аналитических расчетов учитывалось влияние разрыва K . Наличие областей разрыва в окрестностях горных выработок существенно влияет на масштаб добычи, а также повышает сейсмическую активность [7–10]. Из-за недостатка данных, связанных с влиянием тектонических нарушений на распределение напряжений в пласте 703/1, выполнены расчеты методом оценки аномальной скорости продольной сейсмической волны [8]. Метод разработан согласно доступным результатам геофизических изысканий, проведенных в различных областях Верхнесилезского каменноугольного бассейна.

На основе анализа полученных результатов установлено влияние разрывов в зависимости от высоты падения, угла наклона плоскости разрыва и глубины пересечения с угольным пластом. Кроме влияния границ выработок и разрывов, метод прогноза учитывает геологическое нарушение в виде разделения пласта 703/1, линия которого проходит через область сплошного забоя IV. Влияние характеристик этих элементов адаптировано на основе данных, взятых из других шахт и областей Верхнесилезского бассейна [7, 9].

Результаты прогнозирования. Основные факторы распределения вертикальных напряжений в пласте 703/1 сплошного забоя IV — глубина пласта, влияние выработок сплошного забоя III, область разрыва *K* и линия разделения пласта. Границы выработок в пласте 706 проходят только под выработками забоя III. В окрестностях сплошного забоя IV находятся границы ранее пройденных выработок в пластах 620 и 624, расположенных выше более чем на 300 м. Данные границы не влияют на распределение напряжения в пласте 703/1. Пласт 703/1 залегает на глубине ~1100 м, естественные вертикальные напряжения в данной области составляют ~28 МПа. Такие вертикальные напряжения характерны для всей области забоя IV, которая будет разрабатываться в будущем. Вертикальные напряжения, превышающие 40 МПа, появляются в области горизонтальной выработки, расположенной вдоль выработки забоя III по всей длине (рис. 5).

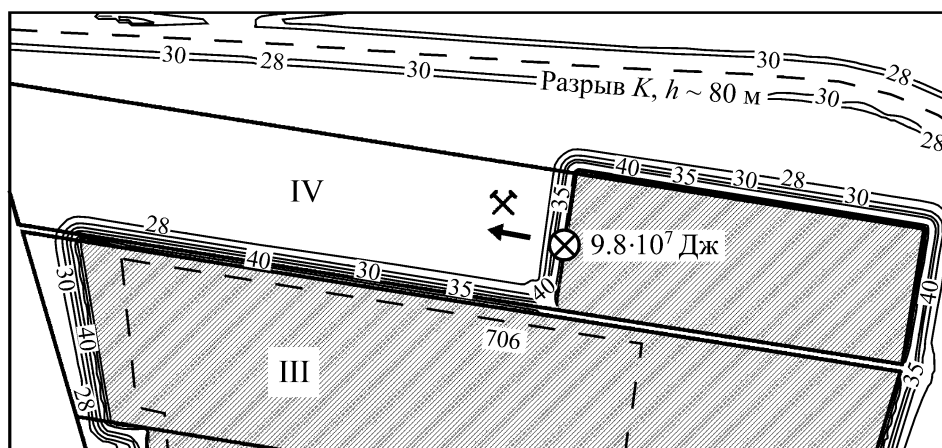


Рис. 5. Прогноз распределения вертикальных напряжений (МПа) в пласте 703/1 в забое IV — параметры фронта в день возникновения горного удара

Прогноз распределения напряжений в пласте 703/1 показывает, что впереди фронта сплошного забоя, где зафиксирован горный удар, существуют области повышенных вертикальных напряжений, чьи значения могут превышать 40 МПа. Влияние разрыва *K* и линии разделения пласта на напряженное состояние массива очевидно, но не оно стало определяющим фактором возникновения горного удара в окрестностях забоя IV. В оставшейся части забоя IV не выявлено областей концентрации аномально высоких напряжений, способных привести к горному удару.

В оси бассейна, проходящей через окрестности забоя IV, могут быть области аномальных напряжений, возникших в результате складчатой структуры месторождения и окружающих горных пород. На практике только с помощью локальных измерений можно определить степень влияния указанных неоднородностей массива на изменение распределения напряжений, поэтому влияние таких областей не учитывалось при прогнозировании напряженного состояния.

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЕВ КРОВЛИ

Для оценки влияния разработки пласта 703/1 на степень деформации массива, расположенного выше пласта, аналитически рассчитано распределение вертикальных смещений и деформации слоев. Для оценки сейсмической угрозы необходимо правильно определить степень деформации слоев, а также области их складчатости, направленной по разным векторам. Расчеты деформированного состояния массива осуществлены по оригинальной программе, в основе которой лежит теория из [11, 12]. С помощью [13] возможно использование данной теории для расчета деформаций внутри массива пород.

В профиле пород, расположенных выше пласта 703/1, находятся компактные слои большой мощности, склонные к колебаниям. Разработка угольных пластов в такой среде обычно приводит к высокоэнергетическим сейсмическим толчкам. Оценка деформированного состояния налегающих слоев выполнена по следующим горизонтам:

- горизонт I — основной слой песчаного сланца, залегающий на расстоянии ~62 м выше кровли пласта 703/1;
- горизонт II — подошва слоя песчаника, залегающего на расстоянии ~210 м выше кровли пласта 703/1;
- горизонт III — слой песчаника над пластом 623, залегающий на расстоянии ~370 м выше пласта 703/1.

Расчеты деформированного состояния массива горных пород на выбранных горизонтах проведены для трех стадий разработки сплошного забоя IV:

- стадия 1 — до начала разработки сплошного забоя IV;
- стадия 2 — конец октября 2018 г., когда зафиксирована повышенная активность массива, граничащего с выработкой;
- стадия 3 — горный удар 22.01.2019 г.

Горизонт I. До начала разработки пласта 703/1 сплошным забоем IV слои массива пород, залегающие выше пласта на расстоянии ~65 м, были повреждены и деформированы в результате разработки пластов 713, 706 и 703/1, вследствие чего возникла значительная осадка массива. Вертикальные смещения выше области забоя IV составляли 0.25–1.50 м. Наибольшие вертикальные смещения (~3.5 м) выявлены над выработками забоя II (рис. 6а). В результате разработки забоя IV (стадия 2) произошло небольшое увеличение уже сформированной осадки. Над выработками забоя IV образовалась область, в которой оседания были равны 1.5 м (рис. 6б). На стадии 3 наблюдалось дальнейшее увеличение осадки с одновременным увеличением вертикальных смещений над выработкой до ~2 м (рис. 6в). На рис. 7 показана пространственная картина оседания рассматриваемого слоя на стадии 3 в день возникновения горного удара. Следует отметить явление многовекторного изгиба над областью разработки. Для наглядного представления результатов масштаб вертикальной оси значительно увеличен.

Так как пласт 703/1 находится в процессе разработки, заметны изменения распределения кривизны деформации на горизонте I. До запуска разработки пласта 703/1 забоем IV распределение кривизны деформаций на северной стороне выработок забоя III было обычным. Значения кривизны деформации песчаника на горизонте I лежат в диапазоне 0.01–0.05 км⁻¹. Отметим, что до начала разработки сплошного забоя IV не было областей многовекторных деформаций над пластом (горизонт I).

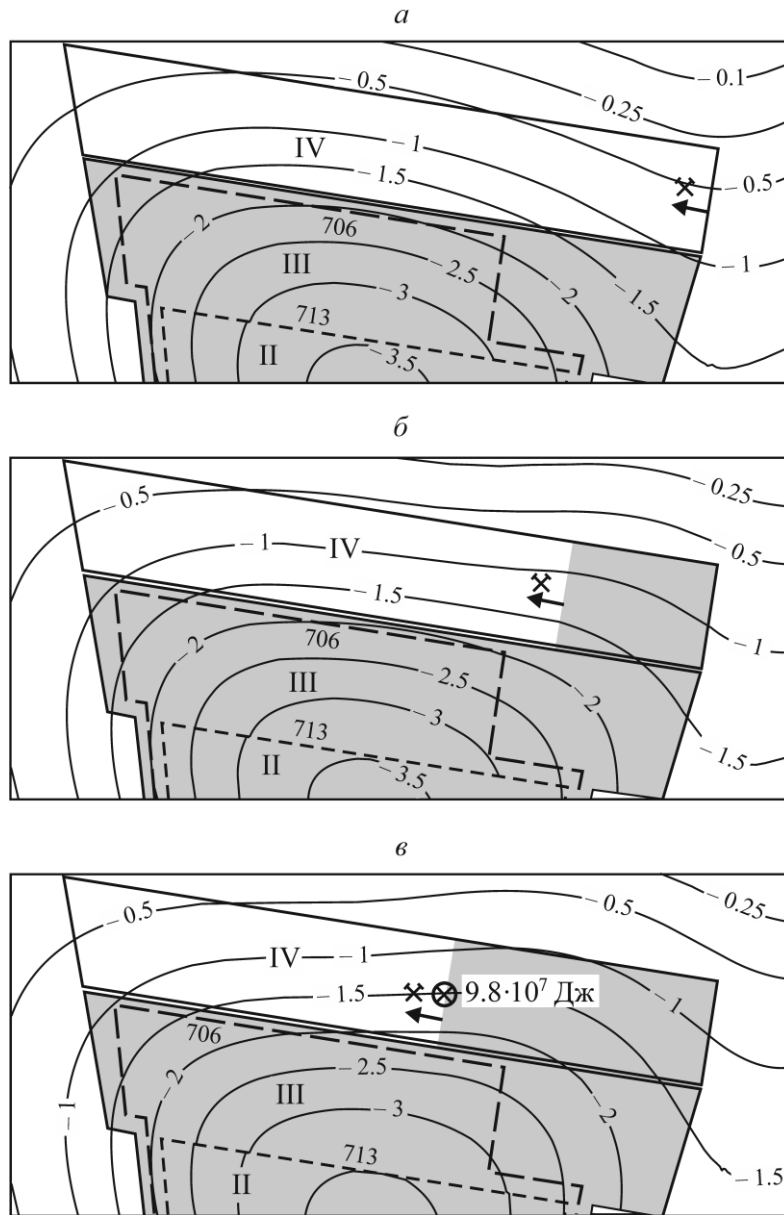


Рис. 6. Распределение вертикальных смещений на горизонте I: а — стадия 1; б — стадия 2; в — стадия 3

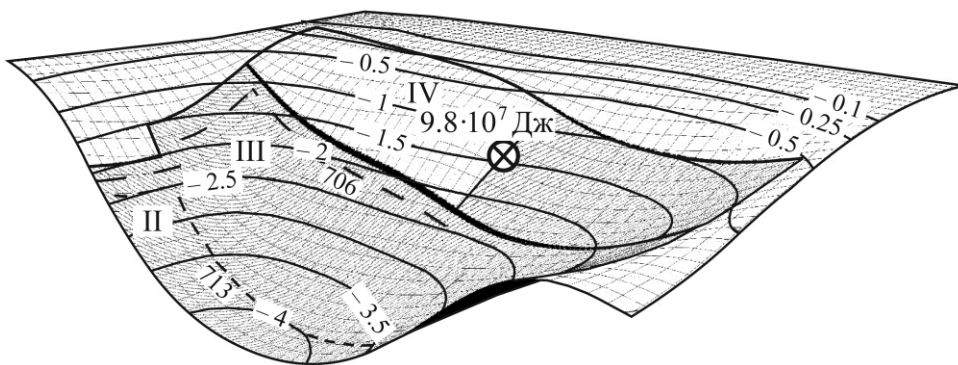


Рис. 7. Распределение вертикальных смещений (горизонт I, стадия 3)

Начало и процесс разработки пласта 703/1 забоем IV привели к изменениям деформированного состояния массива пород на горизонте I. В ходе очистных работ в забое IV над выработками образовался многовекторный изгиб и нарушилась устоявшаяся структура кривизны деформации (рис. 8). Значительного повышения кривизны деформации не наблюдалось, максимальные значения не превышали 0.05 км^{-1} .

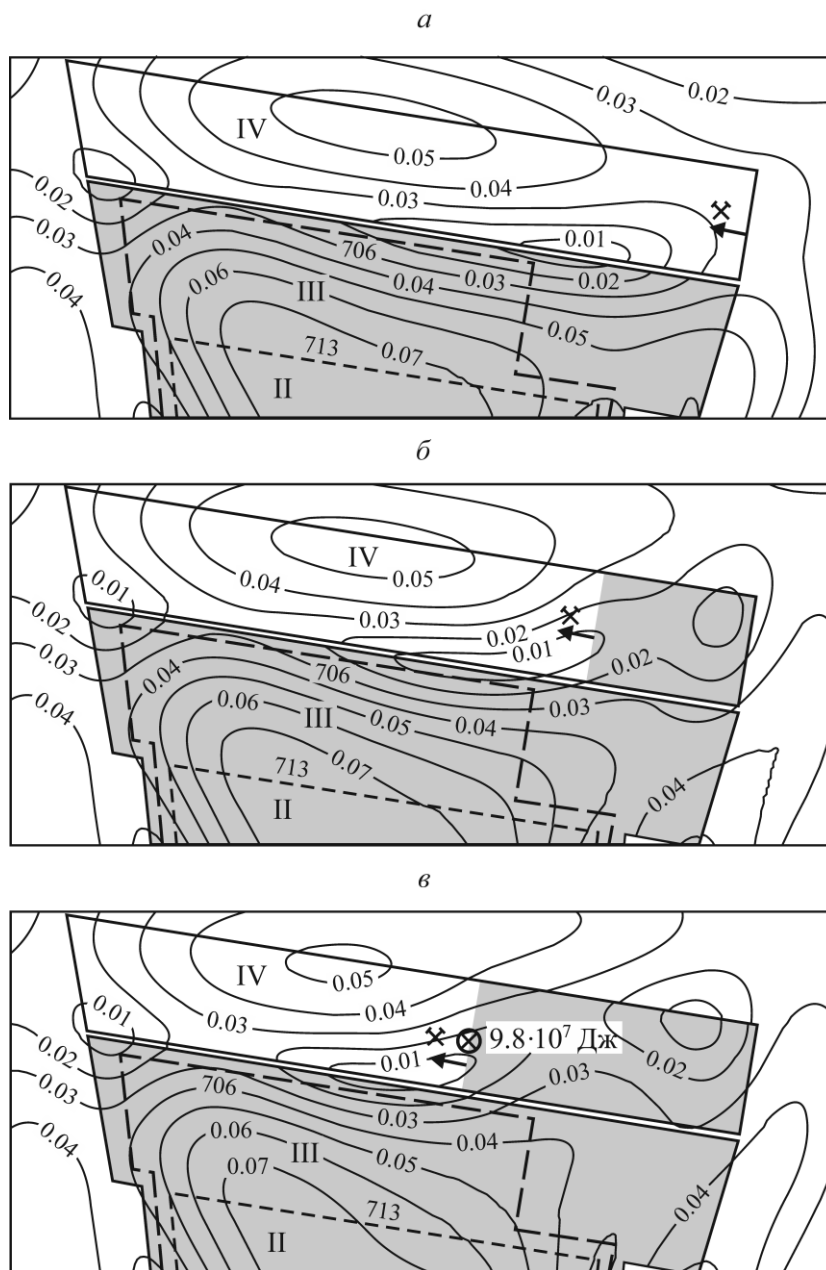


Рис. 8. Распределение кривизны деформации на горизонте I: а — стадия 1; б — стадия 2; в — стадия 3

Горизонт II. До момента начала разработки пласта 703/1 на горизонте II сформировался сплошной массив со значительным диапазоном осадки. Основной фактор осадки — разработка пластов 713, 706 и 703/1 ниже горизонта. Вертикальные смещения над областью забоя IV составили 0.7–1.5 м. Ход разработки забоя IV мало повлиял на изменения данного диапазона.

Повышение вертикального смещения слоя песчаника (горизонт II) до ~ 1.7 м наблюдалось над южной частью сплошного забоя IV, причиной небольшого изменения послужило значительное расстояние между пластом 703/1 и слоем песчаника (~ 200 м).

При анализе распределения кривизны деформации массива на горизонте II необходимо учесть, что его состояние характеризуется малой деформацией. Данный слой находится на значительном расстоянии над пластами, где ведется добыча угля. Значения кривизны деформации не превышают 0.018 км^{-1} . Разработка пласта забоем IV не привела к существенным изменениям распределения кривизны деформации массива на этом горизонте.

Горизонт III. Вертикальные смещения слоя песчаника на горизонте III возникли в результате разработки угольных пластов 713, 706, 703/1 и 624. Максимальные вертикальные смещения (~ 3 м) зафиксированы в области над выработками забоя III. Над забоем IV вертикальные смещения лежат в диапазоне 1.6–2.8 м (состояние до ввода в работу забоя IV). Последующая разработка забоя IV мало повлияла на увеличение вертикальных смещений слоя песчаника на горизонте III. Замечено, что смещения рассматриваемого слоя над выработками забоя III немного увеличились. В области над окрестностями забоя IV данные изменения незначительны.

Основной фактор, влияющий на деформацию слоя песчаника на горизонте III, — разработка пласта 624. Пласт расположен ниже рассматриваемого горизонта на расстоянии ~ 30 м. Следовательно, влияние его разработки на деформацию горизонта наибольшее. Распределение кривизны деформации показывает наличие областей многовекторного изгиба слоя песчаника. Наибольшие значения кривизны деформации ($\sim 0.12 \text{ км}^{-1}$) обнаружены в области нарушения границы линии разработки пласта 624. Влияние процесса добычи угля в забое IV на слой песчаника на горизонте III незначительно. Результаты расчетов не показали влияния подвигания забоя IV на изменение распределения кривизны деформации в данном слое песчаника.

ВЫВОДЫ

Анализ изменения кривизны изолинии деформаций массива на горизонте II показал, что эти деформации невелики, поскольку горизонт расположен на значительном удалении от очистных забоев. Влияние разработки забоя IV на деформацию слоя песчаника на горизонте III также практически незначительно.

Разработка забоя IV стала причиной существенных изменений деформированного состояния породного массива на горизонте I. Над выработками забоя IV отчетливо наблюдался прогиб кровли.

Анализ деформированного состояния позволил выявить причину возникновения сейсмического толчка с энергией $9.8 \cdot 10^7$ Дж: разрушение слоя алевритоглинистых пород мощностью ~ 55 м, залегающего над кровлей пласта 703/1 на горизонте I.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chen Xuehua, Li Weiqing, and Yan Xianyang.** Analysis on rock burst danger when fully-mechanized caving coal face passed fault ith deep mining, Special Issue Article: The First Int. Symp. Mine Safety Sci. Eng., Safety Sci., 2012, Vol. 50, Issue 4. — P. 645–648.
2. **Zhijie Wen, Xiao Wang, Yunliang Tan, Hualei Zhang, Wanpeng Huang, and Qinghai Li.** A study of rockburst hazard evaluation method in coal mine, Hindawl Publishing Corporation Shock and Vibration, 2015, Article ID 8740868. — 9 p.

3. **Zorychta A. and Litwa P.** Geomechaniczne modele górotworu tąpiącego. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej — Seria z Perlikiem, Kraków, W pracy zbiorowej pod redakcją A. Zorychty, 2003, No. 7.
4. **Amadei B. and Stephansson O.** Rock stress and its measurement, Chapman and Hall, Springer Netherlands, 1997. DOI: 10.1007/978-94-011-5346-1.
5. **Makówka J.** Method of determining the triaxial stress state in the rock mass with directed hydrofracturing, Arch. Min. Sci., 2015, Vol. 60, No. 3. — P. 729–741.
6. **Dubiński J.** Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górnictwymi w kopalniach węgla kamiennego, Prace GIG, Seria Dodatkowa, Katowice, 1989.
7. **Drzewiecki J. and Frejowski A.** Ocena skuteczności prowadzenia eksploatacji w aspekcie zaburzeń tektonicznych i sedymentacyjnych. Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, 2010, No. 4/3. — P. 86–98.
8. **Kompleksowa** metoda oceny skłonności do tępów górotworu w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, M. Bukowska (ed.), Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice, 2009.
9. **Myszkowski J. and Frejowski A.** Prowadzenie robót górnictwowych w warunkach występowania zagrożeń naturalnych powiązanych ze strefami uskokowymi, Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, 2011, No. 1/1. — P. 64–71.
10. **Drzewiecki J. and Piernikarczyk A.** Ocena skuteczności prowadzenia eksploatacji w aspekcie zaburzeń tektonicznych i sedymentacyjnych, Prace naukowe GIG, Kwartalnik Górnictwo i Środowisko, 2010, No. 4/3. — P. 86–97.
11. **Kowalski A.** Deformacje powierzchni na terenach górnictwowych kopalń węgla kamiennego. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice, 2020.
12. **Szpetkowski S.** Prognozowanie wpływów eksploatacji złóż pokładowych na górotwór i powierzchnię terenu, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice, 1995.
13. **Kowalski A.** Zmienność parametru zasięgu wpływów głównych w górotworze, Ochrona Terenów Górniczych, 1985, No. 72/2.

Поступила в редакцию 15/I 2021

После доработки 15/VI 2021

Принята к публикации 11/XI 2021