

УДК 622.333.012:550.8

**АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРОВАЛОВ
В ОКРЕСТНОСТИ ВЫВЕДЕННОЙ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАХТЫ**

П. Литва

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

Рассмотрен случай провала грунта на участке каменноугольной шахты в Верхнесилезском каменноугольном бассейне (Польша) и дано объяснение причин его возникновения. С целью разработки заключений для принятия решений, связанных со строительством и защитой окружающей среды в районе выведенной из эксплуатации шахты, выполнены расчеты и анализ горнотехнических и геологических условий области, предрасположенной к возникновению провалов.

Провал грунта, неравномерная деформация в областях отработанных участков шахт

DOI: 10.15372/FTPRPI20210207

Добыча каменного угля в странах Евросоюза сокращается с каждым годом. В 2018 г. добыто 74 млн т угля, что на 80 % меньше по сравнению с 1990 г. Согласно данным Евростата за 2018 г., добыча угля осуществлялась в пяти странах-участниках Евросоюза: Польша (63.4 млн т), Чешская Республика (4.5 млн т), Германия (2.8 млн т), Великобритания (2.6 млн т) и Испания (0.5 млн т). Постепенное снижение добычи характерно для Германии, Бельгии, Франции, Великобритании, Испании, Чешской Республики и связано с деуглеродизацией (одно из направлений экологической политики ЕС) и истощением запасов каменного угля [1 – 5].

В Польше объем добычи каменного угля за последние 40 лет и количество шахт существенно уменьшились из-за их реконструкции, что связано с изменением модели функционирования промышленности в результате политических и экономических преобразований, а также экологических аспектов и истощения запасов угля. В 2019 г. объем добытого угля составил 61.5 млн т, в Польше функционировало 20 шахт, 14 из которых подлежали ликвидации. В конце 1990-х годов XX в. остановлена добыча в Нижнесилезском каменноугольном бассейне [6]. В [7] описаны экологические угрозы, связанные с выведением из эксплуатации шахт, расположенных в этом бассейне.

Аналогичная ситуация в Рурском каменноугольном бассейне. После прекращения добычи возникли масштабные проблемы по обеспечению безопасности в районах отработанных месторождений каменного угля, связанные с возникновением равномерных и неравномерных деформаций и выбросов газа из массива пород, особенно из выработок, выходящих на по-

верхность [1]. Подобные случаи наблюдаются в Польше и, возможно, будут наблюдаться в Китае, где высок уровень содержания метана в месторождениях угля [8, 9]. Газ также выделяется из горных отвалов, повышая экологические риски, особенно риск возникновения пожара [10, 11]. Франция столкнулась с аналогичными проблемами и приняла решение разработать новые методы отслеживания угроз [12, 13]. Широкий спектр угроз в районах отработанных месторождений полезных ископаемых рассмотрен в [2].

Горные отвалы пустой породы — предмет рекультивации и повторного использования для извлечения горючих сырых материалов или содержащихся в них элементов. В угольном бассейне Острава-Карвина (Чешская Республика) запущена система управления отвалами [14]. В Польше тоже успешно осуществляется повторное использование горных отвалов, заключающееся в извлечении материалов для дорожного строительства. Вопросы, связанные с изменениями поведения воды в массиве, весьма актуальны для защиты отработанных районов [3]. Явление подъема грунта в связи с оседанием шахты известно давно, а также установлены его причины [15 – 17].

В Польше экологические угрозы определены и идентифицированы. Разработаны методические указания для геологических, горнодобывающих предприятий, административных органов и научных институтов с целью оценки геологических и инженерных условий работ по выводу из эксплуатации и дальнейшему использованию районов ликвидированных горных предприятий. Масштаб проблемы отработанных районов в Верхнесилезском каменноугольном бассейне в контексте включающих в себя угроз описан в [18]. В настоящей работе охарактеризованы и изучены наиболее значимые угрозы, относящиеся к данным районам.

При рассмотрении угроз выделяют некоторые особенности этих районов, вызывающие частичное затруднение: провалы грунта, линейная деформация и остаточное оседание [19]. Возможно, образование провалов грунта вызвано шахтными стволами, которые не закрыли или закрыли не должным образом, а также буровыми скважинами, соединяющими старые горные выработки с поверхностью [20 – 26].

В Великобритании, где угольные пласты разрабатываются камерно-целиковой системой, выполнено исследование по оценке устойчивости массива горных пород в районе вывода из эксплуатации каменноугольных шахт, расположенных на малой глубине [27]. Установлено, что устойчивость массива снижается со временем из-за происходящих геомеханических и химических явлений, влияющих на изменение свойств пород, включая прочность. Проблема устойчивости старых горных выработок и механизма оседания, который может повлиять на окружающую среду и инфраструктуру на поверхности в районах действующих и закрытых шахт, связана не только с угольными шахтами, но и с рудниками по добыче других полезных ископаемых, особенно на малой глубине. В [27] рассмотрен пример известняковой шахты в Вест-Мидленде (Великобритания).

Другим примером угроз являются карстовые пещеры, расположенные на малых глубинах. Проблема влияния карстовых пещер на окружающую среду и строительные сооружения наблюдается в России, где 16 % от общей площади предрасположено к карстовым явлениям [28, 29]. Проведенное исследование позволило сформулировать заключение о безопасном строительстве и эксплуатации жилых районов и промышленных объектов в таких областях. Представленные в [29] методы дали возможность оценить напряженно-деформированное состояние карстовых зон. Это легло в основу прогнозирования развития карстовых областей. Достоверность прогнозирования во многом зависит от точности геологической оценки формы, размера рассматриваемой карстовой аномалии и свойств окружающего ее массива горных пород.

В [30] с помощью математического моделирования выполнен анализ напряженного состояния массива горных пород под выработанным пространством. Учет зон обрушения и разрушения в области налегающих пород проводится с помощью метода начальных напряжений. В [31] приведены результаты численного моделирования эволюции напряженно-деформированного состояния областей, осложненных карстовой полостью и находящихся под воздействием внешней статической пригрузки и техногенной суффозии.

Цель настоящей работы — рассмотрение причин возникновения провалов грунта вблизи шахтных стволов, выведенных из эксплуатации, с применением трех методов расчета для прогнозирования образования провала в результате обрушения узких выработок, расположенных на малой глубине [22, 32–34]. Выполнен анализ местных геологических и горнотехнических условий.

АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Провал образовался 01.04.1971 г. в районе угледобывающей шахты “G” в районе шахтного ствола “M”, выведенного из эксплуатации. Шахта расположена в северо-восточной части Верхнесилезского каменноугольного бассейна. Разработка угольных пластов в шахте “G” и рядом с ней началась в XIX в. и продолжалась ~200 лет до 1998 г. Первые работы по добыче угля начались в 1823 г. в пластах 615, 616, 620, 621 и 622 мощностью 0.8–1.2 м. Согласно информации, полученной в Архиве измерений и геологической документации Высшего управления горной промышленности в 1971 г., зафиксированы две неравномерные деформации на расстоянии 15 м от выведенного из эксплуатации шахтного ствола “M”. Провал размером 8×6 м образовался рядом со стволом “M” и имел воронкообразную форму глубиной 5 м. На его дне просматривалась открытая буровая скважина. В шахте на глубине 17, 31 и 65 м осуществлялась разработка пластов 615, 616, 620, непосредственно под провалом разработка не проводилась. Деформация произошла над узкой выработкой, соединяющей окоlostвольный двор (выработка расположена непосредственно у ствола) с выработками в пласте 615. Вероятно, данную выработку не закрыли, что способствовало образованию пустот. В этот же год вблизи провала наблюдалось оседание грунта глубиной до 0.2 м прямоугольной формы 8×5 м. Провал размером 0.8×0.6 м и глубиной 2.2 м образовался в юго-восточном углу в результате повторного оседания 01.04.1971 г.

Шахтный ствол “M”, выложенный кирпичной кладкой глубиной 123 м, располагался на высоте +289.60 м над ур. м. В 1938 г. после остановки добычи его закрыли, в 1947 г. засыпали пустой породой. Выработки, составляющие основу шахты и используемые для логистических и транспортных маршрутов, укрепили надежной конструкцией. На некоторых уровнях, начиная от уровня залегания начального пласта 615, тип крепи выработок, ведущих к стволу “M”, неизвестен. Окоlostвольные дворы на отдельных уровнях укреплены такой же кладкой, как и сам ствол. Карта пластов не содержит информацию о процессе вывода из эксплуатации выработок, ведущих к стволу. Вблизи ствола “M” на расстоянии нескольких метров на север разрабатывались следующие пласты:

- пласт 615 залегал на глубине 20 м, разрабатывался горизонтальными выработками до мощности 1 м с обрушением кровли в 1936 г. Выработки, соединяющие выработанное пространство со стволом “M”, располагались на глубине 17 м;
- пласт 616 залегал на глубине 30 м, разрабатывался горизонтальными выработками с обрушением кровли в 1935 г. Конечная мощность пласта неизвестна. Карта показывает, что глубина выработок, соединяющих ствол “M”, составляла 31 м;

- пласт 620 залегал на глубине 60 м, разрабатывался горизонтальными выработками до мощности 1.1 м с обрушением кровли в 1936 г. Карта показывает частичное соединение выработок со стволом “М” на глубине 65 м;

- пласт 622 залегал на глубине 100–110 м, разрабатывался горизонтальными выработками до мощности 0.40–0.45 м с обрушением кровли в 1935–1936 гг. Карта показывает наличие соединяющих выработок со стволом “М”.

В 1966–1981 гг. из пласта 816 уголь добывался с обрушением кровли при высоте 2 м на глубине 440–470 м. Геотехнические работы, проводимые в 2015 г. вблизи образованного в 1971 г. провала (~10 м), показали наличие насыпей из песка, камня, раздробленной породы, кирпича и аргиллита. Глубина насыпей достигала 0.3–2.1 м, ниже присутствовали угленосные образования, сформированные в песчанике, глине и угле. Угли найдены на глубине 2.3–4.0 м, их толщина 0.7–1.6 м. В угленосной кровле эти образования имели форму пустой породы в виде песка с песчаником толщиной 0.9–1.7 м. Их подошва залегала на глубине 1.2–3.1 м. Прочность на сжатие слоев, расположенных ниже антропогенных, составляла <5 МПа. В 2018 г. геологические изыскания выявили на глубине 0.8–1.8 м нестроительные насыпи из кирпича и шлака. Слой глины толщиной 0.5–1.5 м обнаружен в южной части местности со слоем выветренного песчаника, залегающего ниже, в северной эти слои обнаружены под нестроительными насыпями. Ниже залегал угольный пласт 612 мощностью 0.6–1.4 м, перекрытый слоем аргиллита.

Важно отметить, что на глубине до 6 м находятся несвязные между собой образования, в частности насыпи. В геологическом профиле угленосных пород наблюдается аргиллит, мадстоун, песчаник и уголь. Аргиллит и мадстоун водонепроницаемы и пластичны, что сокращает образование полостей, приводящих к формированию неравномерных деформаций. Песчаники характеризуются широким диапазоном прочностных свойств. Следовательно, обрушение данного слоя менее вероятно, что повышает угрозу образования и распространения полостей в массиве пород. Зависимость механических свойств осадочных пород Верхнесилезского каменноугольного бассейна от глубины их залегания доказана лабораторными испытаниями.

В [35] представлено детальное распределение прочности на сжатие песчаных и глинистых пород для отдельной стратиграфической группы угленосных пород. Прочность песчаника и глины на сжатие линейно повышается с увеличением глубины. Песчаник обладает большим градиентом увеличения прочности. На основе [36] определены факторы, влияющие на образование провалов грунта в горнодобывающих районах. Они включают в себя свойства массива плотных и налегающих пород. Отмечается, что в случае наличия песчаника с большой прочностью область образования трещин может достигать высоты, превышающей мощность пласта в 50 раз. Факторы, приводящие к смещению массива по направлению к полостям (горные выработки), могут меняться при наличии воды, механической суффозии и процесса добычи на малых глубинах. В общем случае порода угленосной кровли представляет собой выветрелую плотную породу с параметрами, близкими к грунту, т. е. несвязную налегающую породу.

Анализ листов бурения шахтного ствола “М” без указания даты бурения показал, что в профиле буровой скважины присутствовал слой грунта и следующие угленосные образования: песчанистый сланец (2.4 м), уголь (0.5 м), песчанистый сланец (2.6 м), песчаник (2.0 м), серый сланец (6.05 м), угольный пласт 615 (1.0 м), серебристо-серый сланец (13.4 м), угольный пласт 616 (0.75 м), нарост серого сланца (0.4 м), угольный пласт 616 (0.2 м), сланец с наростом песчаника (1.2 м), песчаник с наростом сланца (5.5 м), песчаник (9.2 м), песчаник с наростом

сланца (1.05 м), сланец (7.6 м), черный сланец (0.25 м), сланец (8.15 м), черный сланец (0.45 м), угольный пласт 620 (1.1 м) и почва на глубине 64.3 м. Анализ более поздней документации, включая ситуационную и высотную карту, позволил определить мощность налегающих слоев угленосных образований в районе провала, произошедшего 01.04.1971 г. на глубине ~2 м. Предполагается, что налегающая порода состояла из слоев антропогенной природы (камней, дробленой породы, остатков шлака и кирпича) и глины.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Согласно методу Чудека – Олазовского [22], если область обрушения, образованная за полостью, достигает несвязной налегающей породы, на поверхности произойдет оседание грунта (рис. 1). Если область образования трещин, сформировавшаяся над областью обрушения, проникает в несвязную налегающую породу, вероятность образования провала сокращается. Высота области обрушения:

$$w_z = w \frac{4(k_r + 1) - \pi(k_r - 1)}{2\pi(k_r - 1)}, \quad (1)$$

где k_r — коэффициент разрыхления породы; w — высота выработки.

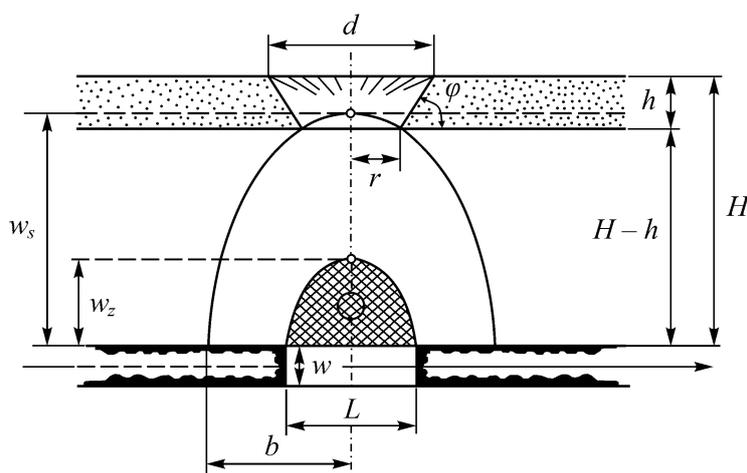


Рис. 1. Области обрушения и образования трещин около пустот в массиве пород на малой глубине: L — ширина полости; w_z — высота области обрушения; w_s — высота области образования трещин; b — полуось трещины; φ — угол внутреннего трения

Вероятность образования провала по первому расчету рассчитывается как

$$z = \frac{H - h}{w},$$

здесь H — глубина выработки; h — мощность налегающей породы. Показатель z соответствует вероятности образования провала по соотношению $P(z) = 1.31 - 0.036z + 0.00019z^2$, т. е. при $z < 10$ $P = 1$, при $z > 50$ $P = 0$.

Метод Януса – Яруза основан на схожих предположениях, что и метод Чудека – Олазовского. Высота области обрушения выражается как

$$h_{z \max} = w \left[\frac{6}{\pi(k_r - 1)} + \frac{1}{4} \right]. \quad (2)$$

Метод предполагает, что оседание грунта произойдет при условии

$$\frac{c}{2} \geq g_g + \frac{w}{2},$$

где c — длина вертикальной оси арки давления; g_g — мощность плотной породы, залегающей над полостью (рис. 2).

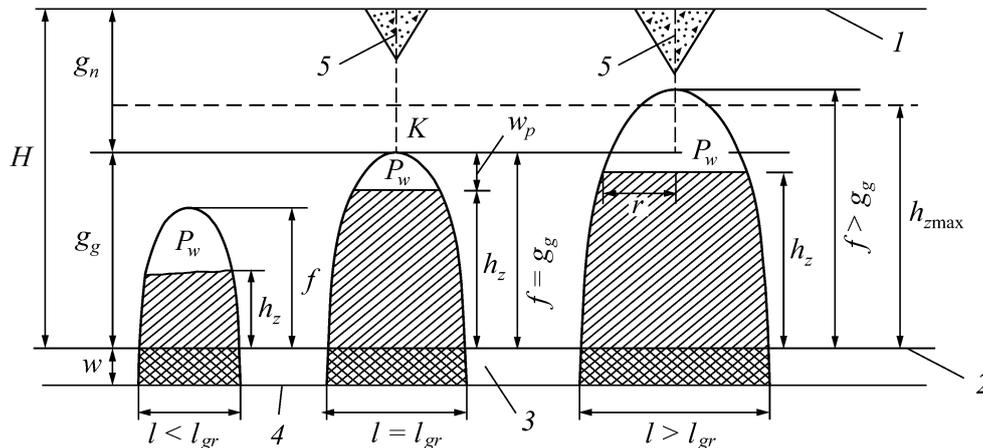


Рис. 2. Механизм изменения массива пород над первичной полостью в случае малой мощности прочных пород: 1 — поверхность; 2 — кровля; 3 — месторождение (пласт); 4 — почва; 5 — воронка; $f = c - w/2$ — высота арки давления; w_p — высота вторичной полости; l — ширина выработки; l_{gr} — пограничная ширина выработки; g_n — мощность налегающей породы [37]

Предполагается, что отношение оси эллипса области образования трещин рассчитывается как $n = 0.5(m - 2)$, где m — коэффициент, обратный коэффициенту Пуассона. Область обрушения достигает значения, выраженного формулой (2), при минимальном достижении ширины полости:

$$l_{gr} = \left(g_g + \frac{w}{2} \right) \frac{2}{n}.$$

Для определенного значения соотношения l/l_{gr} вероятность образования провала указана в таблице.

Физические свойства слоев, формирующих массив горных пород

Порода	Объемный вес породы γ , МН/м ³	Прочность на растяжение R_r , МПа	Коэффициент разрыхления породы в области обрушения k_r	Толщина слоя h , м
Налегающая порода	0.027	0.00	1.00	2.0
Сланец	0.025	0.20	1.10	2.4
Уголь	0.015	0.15	1.10	0.5
Песчаный сланец	0.025	0.20	1.10	2.6
Песчаник	0.025	0.30	1.20	2.0
Серый сланец	0.025	0.15	1.15	6.05
Уголь	0.015	0.20	1.20	1.0

Согласно теории арки давления Салустовича, на основе решения Хубера, арка давления возникает тогда, когда горизонтальные напряжения превышают прочность пород кровли на растяжение. Если данное условие не выполняется, выработка характеризуется как устойчивая. В [32, 34] определена область снятия напряжений, способная смещаться в сторону выработки (рис. 3):

$$P_e = S_1 - \frac{wl}{2} + 2S_2,$$

здесь w, l — высота и ширина выработки; $S_1 = \pi ab / 8$ — верхняя половина эллипса трещины (область снятия напряжений);

$$S_2 = \frac{1}{2} \int_0^k \left[\frac{b}{2} \cos t \frac{a}{2} \cos t - \frac{a}{2} \sin t \frac{b}{2} (-\sin t) \right] dt - \frac{wl}{8} = \frac{abk - wl}{8},$$

$k = \pi\alpha / 180^\circ$, $k = \pi / 180^\circ \arctan w/l$ — показатель угла арки α . Итак:

$$P_e = \frac{ab(\pi + 2k) - 6wl}{8}.$$

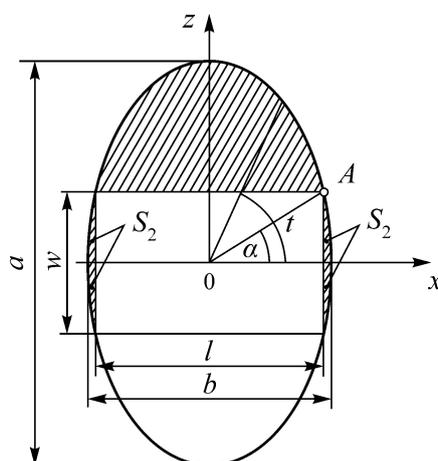


Рис. 3. Область снятия напряжений вокруг выработки в массиве пород

Введены показатели $P_1 = P_e k_r$ и $P_2 = P_e + wl$ (k_r — коэффициент разрыхления породы).

Выделяют следующие возможные случаи:

- $P_1 = P_2$, полость самоустановится и плотно заполнится породой в области снятия напряжений;
- $P_1 < P_2$, на участке вершины области снятия напряжений образуется вторичная полость, объем которой характеризуется разницей полей $P_2 - P_1$. Когда область снятия напряжений достигнет налегающей породы, образуется провал.

Метод на основе арки давления является циклическим на дальнейшей стадии расчетов, предполагая возможность смещения очередных вторичных полостей в массиве пород по направлению к поверхности. Расчеты выполнены в собственной разработанной программе [33].

Цель анализа — определение с помощью описанных выше методов степени риска образования провала над узкой выработкой, соединяющей выработки в пласте 615 с двором ствола “М”, укрепленного кирпичной кладкой. Как указывалось, провал образовался над выработкой 01.04.1971 г. Для анализа предполагалось, что высота выработки 2 м, ее ширина 3 м, глубина кровли выработки 14.55 м, обратный коэффициент Пуассона $m = 6$.

Литологический профиль массива соответствует профилю ствола “М” с учетом повышения мощности налегающих пород до 2 м (рис. 4). Принятый угол внутреннего трения в породах кровли 25° . Предполагалось, что в выработке отсутствовала крепь или она потеряла несущую способность. Согласно [35], свойства породы приняты в общем случае с понижением параметров прочности из-за малой глубины месторождения для обеспечения некоторого запаса уровня безопасности в повторяющемся прогнозе.

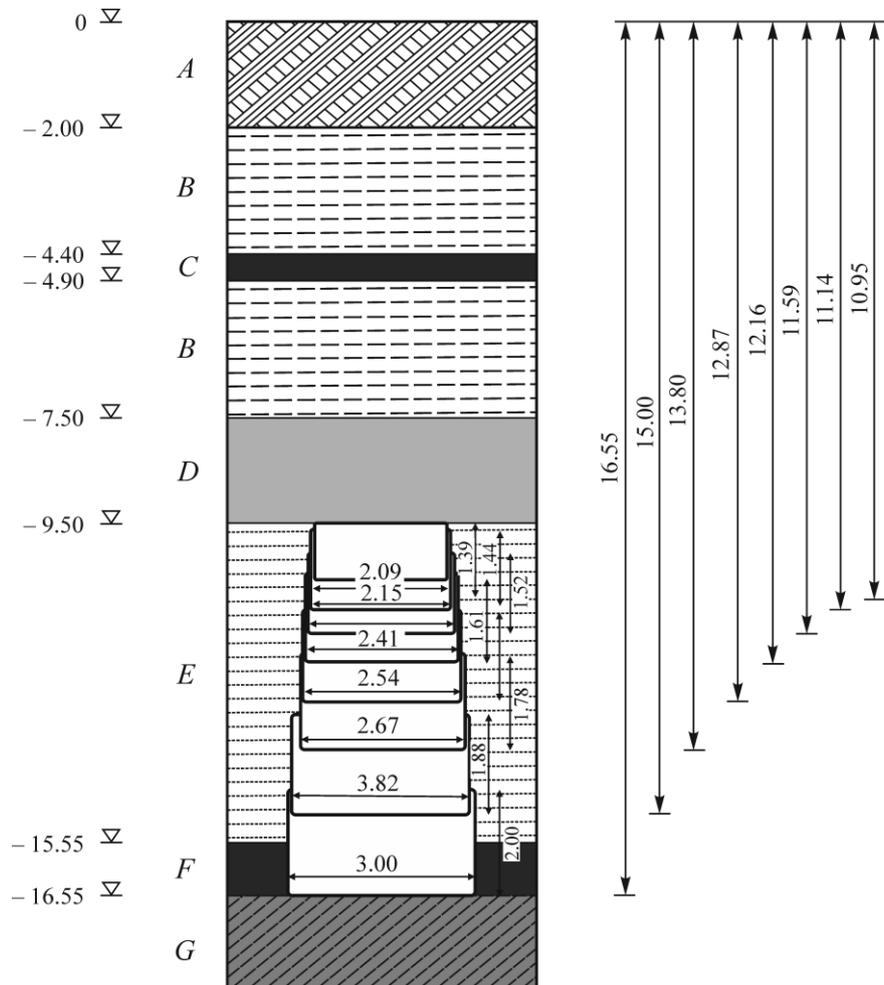


Рис. 4. Графическое отображение результатов расчета на основе метода арки давления: *A* — налегающая порода; *B* — песчанистый сланец; *C* — угольный пласт 612; *D* — песчаник; *E* — серый сланец; *F* — угольный пласт 615; *G* — серебристо-серый сланец

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Высота области обрушения w_z , согласно (1), составила 17.25 м. Это означает, что область обрушения достигла рыхлых налегающих пород, что привело к образованию оседания грунта. Показатель z составил 6.28, вероятность образования провала — 1, т. е. провал неизбежен.

Высота области обрушения $h_{z_{max}}$, рассчитанная по (2), составила 26 м, пограничная ширина полости $l_{gr} = 13.55$ м, отношение ширины выработки к пограничной ширине $l/l_{gr} = 0.22$, что соответствует вероятности образования провала 0.15, т. е. возможность появления провала невелика.

При использовании метода на основе теории арки давления расчеты выполнены с помощью компьютерной программы с некоторыми предположениями. На рис. 4 результаты расчетов представлены графически с целью показать основную первичную полость (выработка № 1) и каждую последующую вторичную (№ 3, 5, 7, 9, 11, 13 и 14). Этот метод выявил образование вторичной полости в массиве на глубине ~ 11 м начиная от подошвы. Полость устойчива. Таким образом, каждый метод показал различные результаты.

Следует отметить, что эксплуатация выработки осуществлялась в 1930-е годы и участок, где произошел провал, расположен на предохранительном целике шахтного ствола “М”, поэтому был изолирован от влияния процесса разработки пластов 600-й группы в течение всей эксплуатации ствола. Провал образовался в 1971 г., и дата образования провала не соответствует периоду добычи на данном участке, которая могла бы нарушить равновесное состояние массива. В рамках настоящей работы идея, объясняющая причину образования провала результатом механической суффозией, вполне вероятна. В рыхлых налегающих породах могла возникнуть полость через систему трещин, возникших в результате добычи, которая проводилась после вывода из эксплуатации ствола “М”, т. е. при разработке пласта 816 (1966–1981 гг.) с обрушением кровли при высоте 2 м на глубине 440–470 м. Показатели того, что полость, в направлении которой смещался массив налегающих пород, является первичной или вторичной, отсутствуют. Также в районе провала оставлен участок буровой скважины, который мог создать условия для явления механической суффозии.

ВЫВОДЫ

Описаны причины возникновения провала грунта в области проведения горных работ в выведенной из эксплуатации шахты “G” Верхнесилезского каменноугольного бассейна. Для анализа использовались три метода расчета. Расчеты, выполненные с учетом геологических и горнотехнических условий, включая свойства пород, позволили сформулировать наиболее вероятную причину образования провала. Активность первичных и вторичных полостей в массиве возникает вследствие движения дождевых вод, особенно в районах, выходящих на поверхность буровых скважин и горных выработок, т. е. движение воды способствует механической суффозии. Полученные результаты могут играть важную роль при принятии решений для строительства в данной области с учетом возникновения аварийных ситуаций при горнодобывающих работах на малой глубине. К областям повышенной опасности относятся участки буровых скважин и горных выработок, выходящих на поверхность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kretschmann J., et al.** From mining to post-mining: The sustainable development strategy of the German hard coal mining industry, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2017, Vol. 50, 012024.
2. **Salmon R., Franck C., Hadadou R., Lombard A., and Thiery S.** New guidelines for post mining risks management in France, Int. Conf. on Mine Closure (Mine CLosure 2018), 2018, Leipzig, Germany. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01960312/document>.
3. **Didier C.** Postmining management in France: situation and perspectives. Risk Analysis, Wiley, 2009, Vol. 29, No. 10. — P. 1347–1354.
4. **Bell F. G., Stacey T. R., and Genske D. D.** Mining subsidence and its effect on the environment: some differing examples, J. Env. Geol., 2000, Vol. 40. — P. 135–152.

5. **Whittaker B. N. and Reddish D. J.** Subsidence: occurrence, prediction and control, *Developments in Geotech. Eng.*, Elsevier, Amsterdam, 1989.
6. **Kosmaty J.** Wałbrzych post-mining land 15 years after coal extraction was ended, *Górnictwo i Geologia*, Publishing Silesian University of Technology in Gliwice, Poland, 2011, Vol. 6, No. 1. — P. 131–148.
7. **Kowalski A.** Mining exploitation and surface protection — experience from the Wałbrzych MINES, The Central Mining Institute, Katowice, Poland, 2000.
8. **Wrona P., Róžański Z., and Pach G.** Closed coal mine shaft as a source of carbon dioxide emissions, *Environmental Earth Sci.*, 2016, Vol. 75. — P. 1139. DOI: 10.1007/s12665-016-5977-7.
9. **Bian Z., Inyang H. I., Daniels J. L., and Otto F.** Environmental issues from coal mining and their solutions, *J. Min. Sci. and Technol. (China)*, 2010, Vol. 20, No. 2. — P. 215–223.
10. **Krishna A. K., Mohan K. R., Murthy N. N., et al.** Assessment of heavy metal contamination in soils around chromite mining areas, Nuggihalli, Karnataka, India, *Environmental Earth Sci.*, 2013, Vol. 70. — P. 699–708. DOI: 10.1007/s12665-012-2153-6.
11. **Hansel G. and Schulz D.** Gestaltung, bodenentwicklung und begrünung von bergeshalden des steinkohlenbergbaus, *Geol. Jahrbuch, Reihe A*, 1996, 199, 144.
12. **Besnard K. and Pokryszka Z.** Gases emission monitoring in a post-mining context, *Symp. Post Mining*, 2005, Nancy, France. pp. NC. ineris-00972521. <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972521>.
13. **Lagny C.** The emissions of gases from abandoned mines: role of atmospheric pressure changes and air temperature on the surface, *Environmental Earth Sci.*, 2014, Vol. 71. — P. 923–929.
14. **Korolev I.** Coal middlings recycling a route for inceasing the yield of sellable concentrate, *Inżynieria Mineralna*, 2018, Vol. 1, No. 41. — P. 159–164.
15. **Głowacki T. and Milczarek W.** Surface deformation of the secondary former mining areas, *J. Archives of Min. Sci.*, 2018, Vol. 20. — P. 39–55.
16. **Kaszowska O.** Impact of underground mining on surface of terrain, *Wydawnictwo Górnośląskiej Wyższej Szkoły Pedagogicznej, Mysłowice*, 2007, Vol. 11, No. 1. — P. 52–57.
17. **Kołodziejczyk P., Musioł S., and Wesolowski M.** Possibility of surface uplift forecasting caused by flooding of old mine cavities and workings, *Przegląd Górniczy*, 2007, Vol. 63, No. 9. — P. 6–11.
18. **Dobak P., Draęowski A., Frankowski Z., Frolik A., Kaczyński R., Kotyrba A., Pinińska J., Rybicki S., and Woźniak H.** Principles for documenting geological and engineering conditions for the purposes of mine closure, 2009. <https://www.pgi.gov.pl/docman-tree-all/publikacje-2/ksiazki/naukowe-i-metodyczne/252-zasady-dokumentowania-warunkow-geologicznych-dla-celow-likwidacji-kopalni/file.html>.
19. **Kowalski A.** Deformation of surface in mining areas of hard coal mines, The Central Mining Institute, Katowice, Poland, 2020.
20. **Augarde C. E., Lyamin A. V., and Sloan S. W.** Prediction of undrained sinkhole collapse, *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.*, 2003, Vol. 129, No. 3. — P. 197–205.
21. **Singh K. B. and Dhar B. B.** Sinkhole subsidence due to mining, *J. Geotech. and Geol. Eng.*, 1997, Vol. 15, No. 4. — P. 327–341.
22. **Chudek M., Janusz W., and Zych J.** Study on diagnosis and prognosis of the formation of discontinuous deformation due to underground mining, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo*, Gliwice, 1988. — 141 p.
23. **Chudek M.** Rock mass mechanics with basics of environment management in mining and post-mining areas, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice, 2010.
24. **Malinowska A. A. and Matonóg A.** Sinkhole hazard mapping with the use of spatial analysis and analytical hierarchy process in the light of mining-geological factors, *Acta Geodyn. Geomater*, 2017, Vol. 14, No. 2 (186). — P. 159–172.

25. **Ścigala R. and Szafulera K.** Linear discontinuous deformations created on the surface as an effect of underground mining and local geological conditions — case study, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2019. — P. 1 – 10. DOI: 10.1007/s10064-019-01681-1.
26. **Chudek M., Strzalkowski P., and Ścigala R.** Duration of post-mining deformations of the land surface depending on geological and mining conditions, *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, 2000, 3. — P. 38–42.
27. **Salmi E. F., Nazem M., and Karakus M.** The effect of rock mass gradual deterioration on the mechanism of post-mining subsidence over shallow abandoned coal mines, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2017, Vol. 91. — P. 59–71.
28. **Baryakh A. A., Stazhevsky S. B., and Khan G. N.** Karst genesis and man-made environment, *J. Min. Sci.*, 2010, Vol. 46, No. 3. — P. 225–233.
29. **Baryakh A. A., Rusin E. P., Stazhevsky S. B. et al.** Stress-strain state of karst areas, *J. Min. Sci.*, 2009, Vol. 45, No. 6. — P. 517–524.
30. **Серяков В. М.** К расчету напряженно-деформированного состояния массива горных пород над выработанным пространством // ФТПРПИ. — 2009. — № 5. — С. 13–20.
31. **Барях А. А., Стажевский С. Б., Хан Г. Н.** Карстогенез и техногенные факторы // ФТПРПИ. — 2010. — № 3. — С. 12–22.
32. **Strzalkowski P.** Mathematical model of forecasting the formation of sinkhole using Salustowicz’s theory, *Archives of Min. Sci.*, 2018, Vol. 1. — P. 63 – 71. DOI: 10.1515/amsc-2015-0005.
33. **Strzalkowski P.** The proposal of predicting formation of sinkholes with an exemplary application, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 53. — P. 53–58.
34. **Strzalkowski P.** Sinkhole formation hazard assessment, *Environmental Earth Sci.*, 2019, Vol. 78, No. 9. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8002-5>.
35. **Kidybiński A.** Basics of mining geotechnics, Wydawnictwo “Śląsk”, Katowice, 1986.
36. **Chudek M., Arkuszewski J., and Ołaszowski W.** Discontinuous deformations in mining areas, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo*, Gliwice, 1980. — 610 p.
37. **Janusz W. and Jarosz A.** Discontinuous deformations of the land surface caused by shallow underground mining exploitation, *Conf. Construction in Areas with High Deformations*, Katowice, 1976.

Поступила в редакцию 03/VIII 2020

После доработки 13/III 2021

Принята к публикации 15/III 2021