

УДК 622.8

**ВЛИЯНИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
НА ГЛУБИНУ КАРСТОВОГО ПРОВАЛА И РАЗРАБОТКА ЕГО МОДЕЛИ
НА ПРИМЕРЕ УГОЛЬНЫХ ШАХТ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ИНДИИ**

П. Саху¹, Р. Д. Лоханд², М. Прадхан¹, Р. Жад¹

*¹Национальный технологический институт,
492010, г. Райпур, Чхаттисгарх, Индия*

*²Национальный технологический институт Висвесварая,
E-mail: riteshlokhande@gmail.com, 440010, г. Нагпур, Индия*

Выполнены исследования влияния геотехнических параметров на потенциальные разрушения угольных шахт в Центральной Индии. По результатам полевых исследований осуществлен детальный параметрический анализ глубины провала относительно каждого параметра. Для изучения совокупного влияния всех параметров и расчета глубины провала в различных условиях разработана его модель на основе статистического подхода.

Подземная добыча угля, неглубокое залегание, геотехнические параметры, карстовый провал

DOI: 10.15372/FTPRPI20210206

Осадка грунта из-за обрушения налегающей породы в ходе подземной добычи может иметь форму различных деформаций, впадин и трещин поверхности, а также приводить к образованию провала [1]. Провалы могут происходить при соотношении высоты налегающего слоя к высоте забоя $H/t < 4/5$. При H/t между 5/11 и 10/11 вероятность образования провала значительно сокращается. При $H/t > 10/11$ (менее 10 % горной выработки) обрушение кровли не приводит к провалу на поверхности [2].

Карстовый провал — опасное явление в областях с высокой плотностью населения и развитой инфраструктурой. Риск провала усугубляется внезапностью данного явления. Процесс карстового провала происходит в налегающей геологической породе и распространяется вертикально по направлению к поверхности с боковой стороны через коренную породу [3]. Обрушение развивается последовательно во времени и начинается с повышения давления кровли, продолжается разрушением панелей и завершается образованием подземной полости. Провалы возникают неожиданно вследствие обрушения кровли и приводят к серьезным последствиям, влияя на окружающую среду и инфраструктуру (рис. 1) [4]. Вероятность карстового провала из-за подземной добычи — актуальная проблема для некоторых рудников Индии и за рубежом. По всему миру фиксируется множество провалов в результате подземной добычи угля.



Рис. 1. Влияние провала на инфраструктуру

Развитие напряжений растяжения весьма значимо в области кровли, где образуются высокие напряжения сжатия в верхней части целиков, разрушающие начальное равновесное или напряженное состояние [5]. Разработаны подходы для прогнозирования характеристик полости, которая достигнет поверхности до момента самоблокирования [6]. В [3] представлены контролирующие меры для предотвращения осадки в виде воронки и провала на поверхности для действующих и заброшенных угольных шахт. При этом для действующих предложены методы частичной добычи для нулевой осадки. В [7] выполнено детальное параметрическое исследование для разработки модели оценки риска провала. В [8] описана эмпирическая модель провала в условиях подземной добычи на малой глубине при наличии дефектов. В [9] рассмотрены заброшенные угольные шахты в Южной Корее для разработки соотношения между факторами осадки. В [10] представлен подход к выбору и оценке параметров, связанных с образованием подземных полостей в результате естественных и искусственных сил. В [11] предложена теория оценки многокомпонентных точек излома для различных типов осадки. В [12, 13] дана модель прогноза на основе параметров, приводящих к появлению провала, а также PHSR-модель для оценки риска провала. В [14] описан подход для прогнозирования вероятности образования провала.

Обрушение кровли во время подземной добычи — серьезная проблема безопасности рабочих и оборудования. В условиях слабой налегающей породы добыча на небольшой глубине способна изменить ее состояние, из-за которого начинается обрушение и возникает полость под поверхностью, приводящая к провалу. В Центральной Индии карстовые провалы весьма распространены в областях расположения угольных шахт, поэтому возникла необходимость изучения геотехнических параметров, прямо или косвенно влияющих на их образование.

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В Центральной Индии в регионах Сохагпур, Корба, Бишрампур, а также Мадхья Прадеш и штате Чхаттисгарх выполнены полевые исследования в шахтах, расположенных в областях Джамуна Котма, Корба и Бишрампур, принадлежащих акционерной компании “South Eastern Coalfields”, являющейся подразделением АК “Coal India”. Это позволило определить значения параметров и тип геологических нарушений, наиболее предрасположенных к провалу. Все провалы возникли при разработке пласта или целика. С позиций геотехнических и геологических условий рассмотрен 41 провал. Высота забоя имела диапазон 1.7–3.0 м, глубина — 15.10–58.05 м.

Карстовые провалы наиболее распространены в регионе Джумана Котма. Шахты расположены по направлению двух основных разломов и имеют много зон образования трещин. Рассмотрено образование полости вдоль трещины из-за низкой прочности песчаника на сдвиг вследствие эффекта выветривания на малой глубине. Наблюдалось просачивание воды до 50 мл/мин. Провалы исследованы относительно плоскости разлома и расположения пород [15]. Данные полевых исследований и лабораторных испытаний приведены в таблице (m — высота забоя; H — глубина разработки; γ/s — отношение породы к грунту; σ_c — прочность на сжатие; σ_t — прочность на растяжение; ν — весовая плотность; k — коэффициент сыпучести; p_f — наличие нарушений; p_w — наличие воды; z — глубина провала).

Геотехнические и физико-механические параметры в области карстовых провалов

Метод добычи, разработка	m , м	H , м	γ/s	σ_c , МПа	σ_t , МПа	ν , кН/м ³	k	p_f	p_w	z , м
Пласт	2.8	32.80	9.75	5.47	0.36	19.05	1.41	+	+	5.0
	2.8	47.61	0.84	5.81	0.42	17.57	1.36	+	—	12.0
Целик	2.6	27.95	8.16	5.30	0.41	18.83	1.45	+	+	1.4
	2.6	27.95	8.16	5.30	0.41	18.83	1.45	+	+	1.8
	2.6	27.95	8.16	5.30	0.41	18.83	1.45	+	+	2.5
	2.6	27.95	8.16	5.30	0.41	18.83	1.45	+	+	2.5
	2.6	27.95	8.16	5.30	0.41	18.83	1.45	+	+	5.0
	2.6	27.95	8.16	5.30	0.41	18.83	1.45	+	+	2.5
	2.6	27.95	8.16	5.30	0.41	18.83	1.45	—	—	2.8
Пласт	2.3	23.08	5.26	5.84	0.42	19.45	1.41	+	+	9.0
Целик	2.8	38.60	11.65	9.00	0.71	20.90	1.40	—	+	4.0
	2.8	38.60	11.65	9.00	0.71	20.90	1.40	—	—	4.3
	2.8	38.60	11.65	9.00	0.71	20.90	1.40	—	—	3.0
	2.8	38.60	11.65	9.00	0.71	20.90	1.40	—	—	3.5
	2.8	38.60	11.65	9.00	0.71	20.90	1.40	—	—	2.5
	2.8	38.60	11.65	9.00	0.71	20.90	1.40	—	—	4.7
	2.8	38.60	11.65	9.00	0.71	20.90	1.40	—	—	3.3
	2.8	38.60	11.65	9.00	0.71	20.90	1.40	—	—	2.5
Пласт	2.5	49.59	12.35	6.09	2.40	23.37	1.46	+	+	2.0
	2.5	49.59	12.35	6.09	2.40	23.37	1.46	+	—	2.0
	2.5	49.59	12.35	6.09	2.40	23.37	1.46	—	—	2.0
	2.0	48.20	15.26	6.42	0.93	22.93	1.48	+	+	1.7
	3.0	29.00	2.17	6.20	0.89	22.90	1.49	+	—	2.5
	3.0	29.00	2.17	6.20	0.89	22.90	1.49	+	—	2.8
	3.0	29.00	2.17	6.20	0.89	22.90	1.49	+	—	2.5
	3.0	29.00	2.17	6.20	0.89	22.90	1.49	+	—	3.5
	1.8	15.10	0.65	3.10	0.28	16.40	1.31	+	+	12.0
Целик	1.7	58.05	24.57	3.24	0.36	17.69	1.49	—	—	3.0
	1.7	58.05	24.57	3.24	0.36	17.69	1.49	—	+	3.0
Пласт	2.7	41.87	12.97	3.35	0.26	23.47	1.45	—	—	3.0
	2.7	41.87	12.97	3.35	0.26	23.47	1.45	—	—	2.0
	2.7	41.87	12.97	3.35	0.26	23.47	1.45	—	—	2.5
	2.7	41.87	12.97	3.35	0.26	23.47	1.45	—	—	4.5
	2.7	41.87	12.97	3.35	0.26	23.47	1.45	—	—	3.0
	2.7	41.87	12.97	3.35	0.26	23.47	1.45	—	—	4.0
	2.7	41.87	12.97	3.35	0.26	23.47	1.45	—	—	8.5
	2.7	36.45	17.22	4.06	0.47	20.24	1.34	—	+	4.8
	2.7	36.45	17.22	4.06	0.47	20.24	1.34	—	+	6.8
	2.7	21.23	4.94	3.14	0.24	23.49	1.44	—	—	6.0
	2.7	58.05	24.57	3.24	0.36	17.69	1.49	—	—	2.5
	1.8	46.20	14.40	7.23	1.00	17.97	1.40	—	+	7.0

ВЛИЯНИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КАРСТОВЫЙ ПРОВАЛ

Параметры, значительно влияющие на образование провала, обозначим как ключевые. Некоторые из них взяты из литературных источников, доминирующие параметры в локальных условиях получены в ходе полевых испытаний. Ключевые параметры, скоррелированные относительно глубины провала в условиях “разработка пласта – разработка целика, наличие или отсутствие нарушений и водяных слоев”, следующие: глубина отработки; высота забоя; отношение объема породы к объему грунта; прочность налегающей породы на сжатие и растяжение; весовая плотность налегающей породы; коэффициент сыпучести. Выполнен анализ зависимости глубины провала от каждого параметра независимо друг от друга методом статистической регрессии. Анализ проведен до разработки модели.

К геотехническим параметрам относятся: глубина отработки, высота забоя, отношение объема породы к объему грунта в налегающей толще. При значительной глубине нарушений налегающей породы из-за горных работ в выработке требуется больше времени, чтобы достигнуть поверхности, тогда как при малой глубине нарушение налегающей породы сразу отражается на поверхности. При большой глубине вероятность образования провала меньше по сравнению с малой [12]. Глубина отработки — доминирующий параметр при оценке возникновения провалов на земле [3, 6–9, 12, 13, 16–23]. Дан параметрический анализ зависимости глубины провала от глубины отработки. Толщина налегающей породы менялась с 15.10 до 58.05 м (рис. 2а). Чем меньше глубина отработки, тем больше глубина возникающих провалов. Коэффициент детерминации R^2 между глубиной отработки и глубиной провала составил 0.57, т. е. чем меньше доля высоты отработки, тем меньше степень осадки породы.

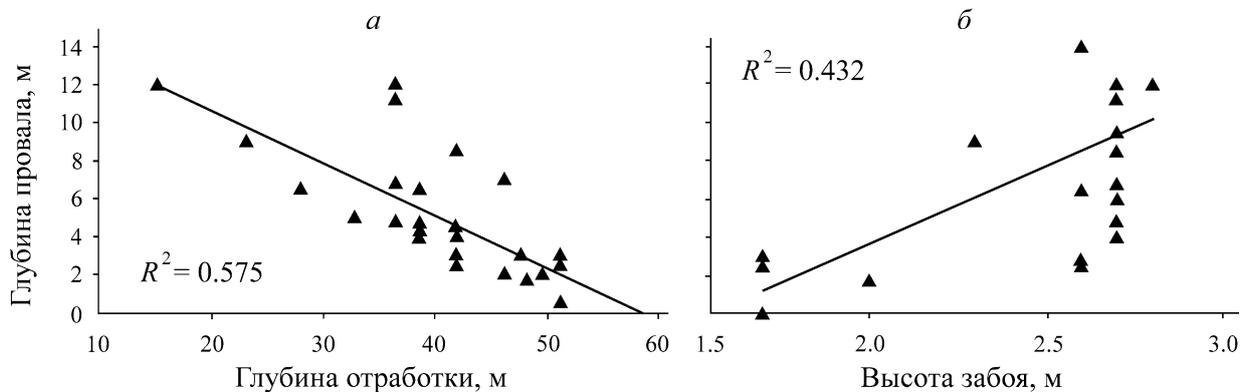


Рис. 2. Влияние глубины отработки (а) и высоты забоя (б) на глубину провала

Высота забоя — важный фактор образования провала на поверхности. В [3, 6, 8, 20, 23, 24] различаются мнения по поводу влияния высоты забоя на магнитуду карстового провала. Для параметрического анализа зависимости глубины провала от высоты забоя последняя менялась с 1.7 до 2.8 м (рис. 2б). Показано, что с увеличением высоты забоя увеличивается глубина провала. Коэффициент детерминации R^2 между высотой забоя и глубиной провала составил 0.43.

Грунт как верхний слой земной поверхности также весьма значим при ведении горных работ. Образование трещин и разделение пластов пород способствует изменению их проницаемости и пористости. Наличие прочной породы в непосредственной кровле и почве способно предотвратить провал благодаря останавливающему действию. В [7, 23] для разработки моделей карстового провала используется отношение объема породы к объему грунта (r/s). Провал включает в себя трещины и разрушение коренной породы на участках заполнения трещин

грунтом [25]. Выполнен параметрический анализ зависимости глубины провала от отношения r/s . На рис. 3 отношение r/s менялось от 0.84 до 24.57. С увеличением отношения r/s глубина провала уменьшалась. Коэффициент детерминации R^2 между отношением r/s и глубиной провала составил 0.61.

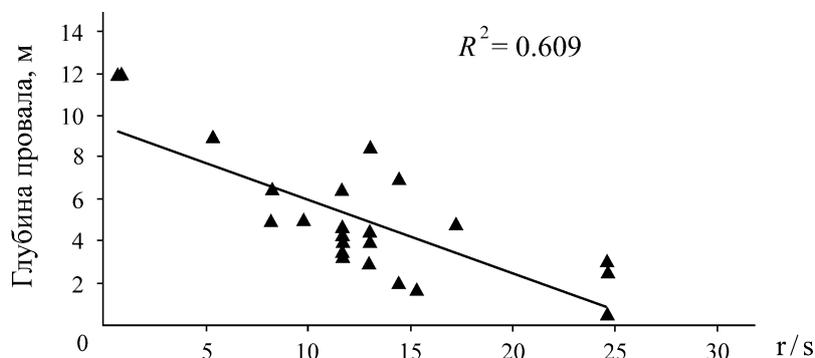


Рис. 3. Влияние отношения объема породы к объему грунта r/s на глубину провала

В условиях подземной добычи прочность непосредственной кровли — важный фактор, который рассчитывается на основе прочности на сжатие. Порода кровли должна выдерживать нагрузку налегающих слоев, так как при обрушении увеличивается вероятность образования провала [26]. Данный параметр важен и с точки зрения прочности налегающей породы [7, 10, 11, 20, 23, 24]. Согласно [10], твердая порода обладает повышенной прочностью и сопротивляется выветриванию и образованию трещин в массиве, в то время как порода с низкой прочностью легко разрушается. Нарушение прочности в одной области приводит к ослаблению кровли в смежных областях, вызывая образование трещин и снижение прочности на растяжение. Это способствует протеканию воды между блоками в ослабленных областях [27]. В процессе добычи угля разрушение кровли сопровождается развитием напряжений сдвига и растяжения [10, 11, 23, 24, 28].

При низкой прочности на сжатие налегающей породы глубина провала достаточно высока ввиду низкой крепости породы (рис. 4а). С увеличением прочности глубина провала уменьшается. Коэффициент детерминации R^2 между прочностью налегающей породы на сжатие при нагрузке и глубиной провала составил 0.60. При увеличении прочности на растяжение глубина провала уменьшается (рис. 4б). Коэффициент детерминации R^2 между прочностью налегающей породы на растяжение при нагрузке и глубиной провала составил 0.64.

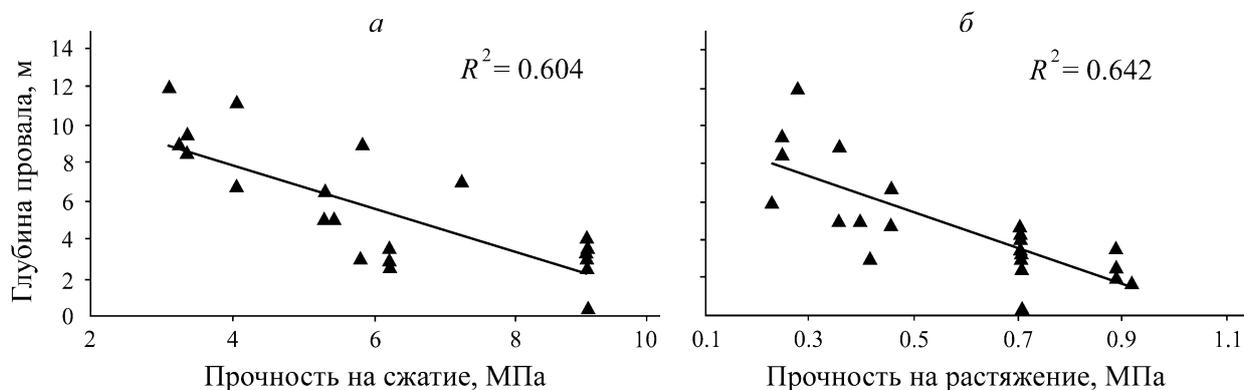


Рис. 4. Влияние прочности налегающей породы на сжатие (а) и растяжение (б) при нагрузке на глубину провала

Плотность породы — физико-механический параметр при прогнозировании карстового провала. Обычно полость образуется при низкой плотности, если же она образуется при высокой плотности, то не заполняется. Заполнение полости происходит из-за эффекта сыпучести. Наличие трещин и разломов — начало ослабления областей, где начинается сдвигение массива [7, 22, 23]. При низкой плотности глубина провала имеет высокие значения из-за слабой налегающей породы, с увеличением плотности глубина провала уменьшается (рис. 5а). Коэффициент детерминации R^2 между плотностью налегающей породы и глубиной провала составил 0.642.

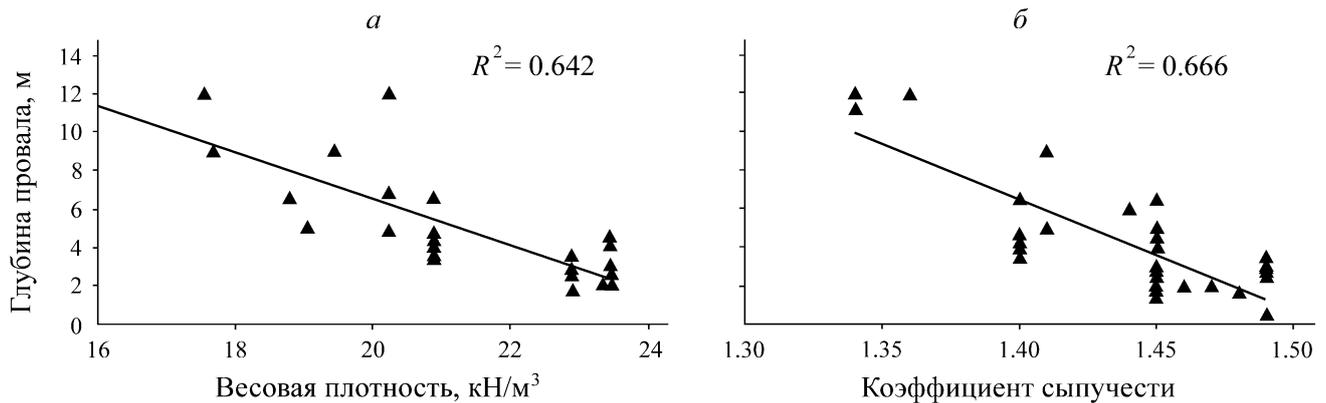


Рис. 5. Влияние весовой плотности (а) и коэффициента сыпучести (б) на глубину провала

Коэффициент сыпучести особенно важен при добыче на малой глубине. При разработке целиков в налегающей породе возникают полости. Когда они достигают поверхности, образуется провал. Если полости образуются медленно и достижение ими поверхности занимает продолжительное время, коэффициент сыпучести имеет высокое значение, так как разрушение породы распространяется, занимая бóльший объем. Чем меньше интенсивность образования полости, тем меньше интенсивность образования провала [8]. С увеличением коэффициента сыпучести глубина провала уменьшается (рис. 5б). Коэффициент детерминации R^2 между фактором сыпучести и глубиной провала составил 0.666.

МОДЕЛЬ КАРСТОВОГО ПРОВАЛА И ЕЕ ПРОВЕРКА

Анализ статистической регрессии каждого параметра показал, что по отдельности они не описывают явление провала в полной мере. Проведен анализ множественной регрессии для определения влияния всех геотехнических параметров на глубину провала z , в ходе которого рассмотрены такие условия, как разработка пласта и разработка целика, наличие и отсутствие нарушений и водоносных слоев в одном масштабе. Далее в модель включались геотехнические параметры: высота забоя m , глубина выработки H , отношение объема пород к объему грунта, прочность налегающей породы на сжатие σ_c и растяжение σ_t , весовая плотность ν и коэффициент сыпучести k . Для разработки модели использованы данные геотехнических параметров полевых исследований и данные, полученные в лабораторных испытаниях образцов (таблица). На рис. 6 показан эскиз модели провала для понимания концепции оценки его глубины [23].

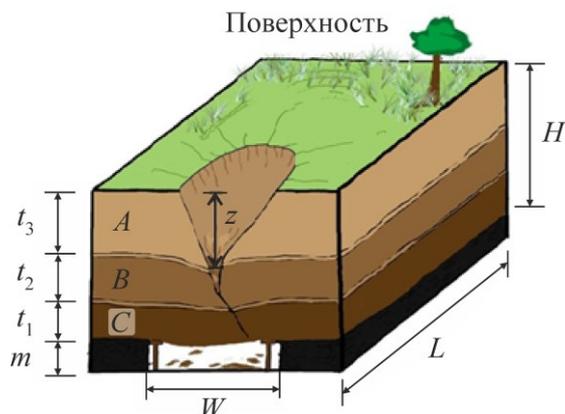


Рис. 6. Эскиз модели провала и его глубины: W, L — ширина и длина выработки; t_1, t_2, t_3 — толщина слоев налегающей мягкой породы A и твердых пород B, C над выработкой

Модель глубины провала разработана на основе анализа собранных данных. Уравнение множественной регрессии имеет вид

$$K = a + c_1M_1 + c_2M_2 + c_3M_3 + c_4M_4 + c_5M_5 + c_6M_6 + c_7M_7, \quad (1)$$

где $a = 67.984$, $c_1 = -2.063$, $c_2 = 0.150$, $c_3 = -0.376$, $c_4 = -0.042$, $c_5 = -0.357$, $c_6 = -1.158$, $c_7 = -39.413$ — постоянные. После подстановки уравнения (1) для глубины провала получено выражение

$$z = a - c_1m + c_2H - c_3 \frac{t_1 + t_2}{t_3} - c_4\nu - c_5\sigma_c - c_6\sigma_t - c_7K, \quad (2)$$

для которого скорректированное значение R^2 составило 0.687, фактическое — 0.741, что является статистически значимым при уровне значимости 1% (коэффициент Пирсона). В ходе анализа вариации AB выявлено, что постоянные a, c_2, c_3 и c_7 также статистически значимы при уровне значимости 1%.

Гистограмма возможной ошибки модели определения глубины провала представлена на рис. 7а. Для наибольшей эффективности модели ошибка должна быть случайной, т. е. подчиняться закону нормального распределения со средним значением, равным нулю, и постоянной вариацией [29]. Необходимо изучить поведение модели в условиях фактических доступных данных. На рис. 7б показана зависимость между измеренными и фактическими значениями. Значение R^2 составляет 0.741, т. е. уравнение (2) может использоваться для расчета глубины провала.

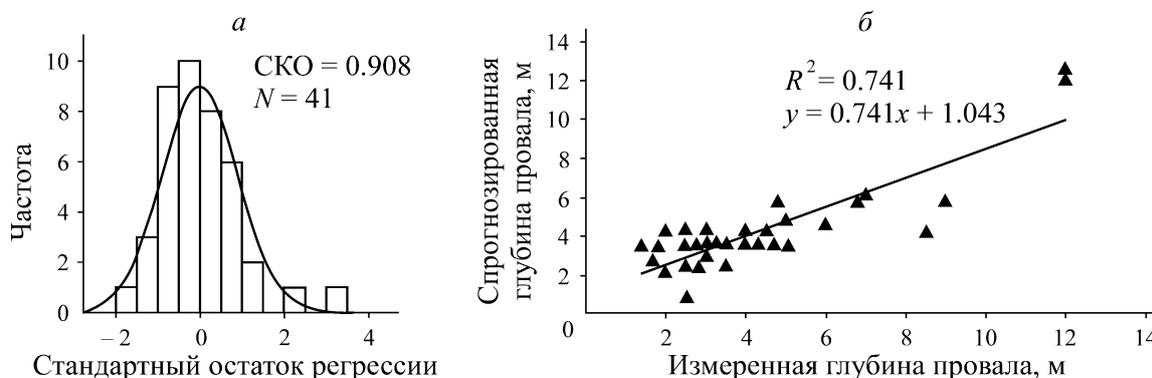


Рис. 7. Анализ стандартных остатков модели глубины провала (а) и корреляция между спрогнозированными и измеренными значениями глубины провала (б): СКО — среднеквадратическая ошибка; N — объем выборки

В [30] для оценки эффективности модели применялся коэффициент корреляции между рассчитанными и спрогнозированными значениями. Анализ вариации AB модели прогнозирования глубины провала показал, что наблюдаемое значение F составило 13.56, тогда как критическое $F_{0.01;7;40}$ равнялось 3.12, т. е. наблюдаемое значение в 4 раза превышает значение из таблицы AB при значимости 1 %. Это доказывает корректность модели по прогнозированию глубины провала. В общем случае значение F должно быть больше критического F из таблицы AB [30].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сложно сделать вывод об отдельных параметрах на основе параметрического анализа, так как согласованность данных, собранных при полевых исследованиях, может меняться в зависимости от геологических условий в налегающей породе. Геотехнические параметры показывают более низкое значение R^2 по сравнению с геологическими. Это не означает, что геотехнические параметры имеют меньшее влияние, чем другие. Для изучения значимости геотехнических параметров выполнен анализ вариации (F -тест). Фактор сыпучести и отношение объема породы к объему грунта имеют наивысшую значимость:

Коэффициент сыпучести	0.000
Отношение объема породы к объему грунта	0.000
Глубина отработки, м	0.001
Прочность на сжатие, МПа	0.016
Высота забоя, м	0.036
Прочность на растяжение, МПа	0.050
Плотность, кН/м ³	0.763

ВЫВОДЫ

Для изучения влияния каждого параметра на глубину провала выполнен параметрический анализ между всеми геотехническими параметрами и глубиной провала. Установлено, что коэффициент детерминации геометрических параметров менее 0.5, тогда как механических превышает 0.6. Параметрический анализ выявил, что механические параметры больше влияют на глубину провала по сравнению с геометрическими. Разработанная модель провала позволяет определить его глубину при подземной добыче угля. Коэффициент детерминации множественной регрессии составил 0.741. Определена важность всех геотехнических параметров на основе анализа вариации, при этом фактор сыпучести и отношение объема породы к объему грунта имеют наивысшую значимость.

Авторы выражают благодарность главе Департамента горного дела и главам Национального технологического института, Национального технологического института Висвесварая и АК “South Eastern Coalfields” за предоставленную помощь и разрешение на проведение исследований, а также признательны профессорам Мерфи, Дхабаду и доктору Сингху за ценный вклад в изучение проблемы карстовых провалов. При этом заключения авторов могут не совпадать с мнением упомянутых организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Peng, Centofanti Syd S., Luo K., Ma Yi., Su W. M., and Zhong W. L.** Subsidence and structural damages above abandoned coal mines, Society for Min., Metal. and Exploration, 1992. — 7 p.
2. **Matheson G. M. and Eckert-Clift A. D.** Characteristics of chimney subsidence and sink hole development from abandoned underground coal mines along the Colorado Front Range, Proc. of the 2nd Workshop on Surface Subsidence due to Underground Mining, West Virginia University, Morgantown, WV, 1986. — P. 204–214.
3. **Lokhande R. D., Prakash A., Singh K.B. and Singh K.K.K.,** Subsidence control measures in coal mines: A Review, J. of Scientific and Industrial Res., 2005, Vol. 64. — P. 323–332.
4. **Anon,** <http://whyfiles.org/2013/sinkholes-when-the-groundcollapses>, Accessed on 23 September 2017.
5. **Karfakis Mario G.** Mechanism of chimney subsidence over abandoned coal mines, Proc. of the 6th Int. Conf. on Ground Control in Min., 1987. — P. 195–203.
6. **Singh K. B. and Dhar B. B.** Sinkhole subsidence due to mining, Int. J. of Geotech. and Geol. Eng., 1997, Vol. 15. — P. 327–341.
7. **Singh K. B.** Pot-hole subsidence in son-mahanadi master coal basin, J. Eng. Geol., 2007, Vol. 89. — P. 88–97.
8. **Tajdus K. and Sroka A.** Analytic and numerical of sinkhole prognosis, 7 Altbergbau Kolloquium, Freiberg, 2007.
9. **Lee Dong-Kil, Mojtabai Navid, Lee Hyun-Bock, and Song Won-Kyung.** Assessment of the influencing factors on subsidence at abandoned coal mines in South Korea, Environ Earth Sci., 2013, Vol. 68. — P. 647–654.
10. **Nazarov L. A., Nazarova L. A., Khana G. N., and Vandamme M.** Estimation of depth and dimension of underground void in soil by subsidence trough configuration based on inverse problem solution, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50, No. 3. — P. 411–416.
11. **Sedlak V.** Mathematical testing the edges of subsidence in undermined areas, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50, No. 3. — P. 465–474.
12. **Lokhande R. D., Murthy V. M. S. R., and Singh K. B.** Pot-hole subsidence in underground coal mining: some Indian experience, Int. J. of Geotech. and Geol. Eng., 2013, Vol. 31. — P. 793–799.
13. **Lokhande R. D., Murthy V. M. S. R., and Venkateswarlu V.** Assessment of pot-hole subsidence risk for Indian coal mines, Int. J. of Min. Sci. and Technol., 2015, Vol. 25. — P. 185–192.
14. **Strzalkowski P.** Proposal of predicting formation of sinkholes with an exemplary application, J. Min. Sci., 2017, Vol. 53, No. 1. — P. 53–58.
15. **Sahu P. and Lokhande R. D.** An investigations of variations of sinkhole depth with respect to the height of extraction in some of the underground coal mines at SECL, India, Academic J. of Sci., 2016, Vol. 06, Issue 1. — P. 153–161.
16. **Sahu P. and Lokhande R. D.** An investigation of sinkhole subsidence and its preventive measures in underground coal mining, Procedia Earth and Planetary Sci., 2015, Vol. 11. — P. 63–75.
17. **Dyne L. A.** The prediction and occurrence of chimney subsidence in South western Pennsylvania, Thesis of Master of Sci. in Min. and Miner. Eng., Blacksburg, Virginia, 1998. — P. 5–8.
18. **Lokhande R. D., Prakash A., and Singh K. B.** Validation of prediction subsidence movements for a stowed panel, J. Mine Tech., 2008, Vol. 29. — P. 21–27.
19. **Prakash A., Lokhande R. D., and Singh K. B.** Impact of rainfall on residual subsidence in old coal mine working, J. of Environmental Sci. and Eng., 2010, Vol. 52, Issue 1. — P. 75–80.

20. **Singh R., Mandal P. K., Singh A. K., Kumar R., and Sinha A.** Optimum underground extraction of coal at shallow cover beneath surface / subsurface objects: Indian Practices, *J. Rock Mech. and Rock Eng.*, 2008, Vol. 41, Issue 3. — P. 421–444.
21. **Swift G.** Relationship between joint movement and mining subsidence, *Bull Eng. Geol. Environ*, 2014, Vol. 73. — P. 163–176.
22. **Strzalkowski P. and Tomiczek K.** Analytical and numerical method assessing the risk of sinkholes formation in mining areas, *Int. J. of Min. Sci. and Technol.*, 2015, Vol. 25, Issue 1. — P. 85–89.
23. **Lokhande R. D., Murthy V. M. S. R., and Singh K. B.** Predictive models for pot-hole depth in underground coal mining-some Indian experiences, *Arabian J. of Geosciences*, 2014, Vol. 7. — P. 4697–4705.
24. **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. of Rock Mech. Min. Sci.*, 2017, Vol. 91. — P. 59–71.
25. **Waltham Tony, Bell Fred G., and Culshaw Martin.** Sinkholes and subsidence karst and cavernous rocks in engineering and construction, 2005.
26. **Abbasnejad A., Abbasnejad B., Derakhshani R., and Hemmati Sarapardeh A.** Qanat hazard in Iranian urban areas: explanation and remedies, *Environ Earth Sci.*, 2016, Vol. 75. — P. 1306.
27. **Varnes D. J.** Landslide hazard zonation: A review of principles and practice, *Natural Hazards*, UNESCO, Paris, 1984. — 63 p.
28. **Singh K. B.** Pot-hole subsidence in underground coal mining, *Some Indian Experiences*, 2013, Vol. 31, Issue 2. — P. 793–799.
29. **Montgomery D. C., Peck E. A., and Vining G. G.** Introduction to linear regression analysis, Wiley, New York, 2003.
30. **Roy S., Adhikari G. R., Renaldy T. A., and Jha A. K.** Development of multiple regression and neural network models for assessment of blasting dust at a large surface coal mine, *J. Environ Sci. Technol.*, 2011, Vol. 4, Issue 3. — P. 284–301.

*Поступила в редакцию 10/X 2018
После доработки 08/XII 2020
Принята к публикации 15/III 2021*