

УДК 622.83

**УГЛЫ ОБРУШЕНИЯ НАЛЕГАЮЩИХ ПОРОД
ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТАХ**

**Ван Фэйфэй^{1,2}, Жэнь Цинян¹, Цзянь Сюэлян³,
Чен Бинь¹, Цзинь Хонгхуа¹, Ян Сяньни¹**

¹Чунцинский университет Цзяотун,

E-mail: 1942016362@qq.com, 40074, г. Чунцин, Китай

²Научно-исследовательский институт горного дела,
410012, г. Чанша, Китай

³Центрально-южный университет лесного хозяйства и технологий,
410004, г. Чанша, Китай

На примере железо-цинкового рудника “Chagan Aobao” исследованы и рекомендованы углы обрушения налегающих пород при ведении подземных горных работ. Результаты работы могут использоваться при разработке практического руководства по предотвращению чрезвычайных происшествий и контролю обрушения пород.

Горное дело, характеристические углы, обрушение, подземная добыча

DOI: 10.15372/FTPRPI20220503

В процессе отработки рудного тела системой с открытым очистным пространством формируется большое количество пустот сложной формы [1, 2]. Под воздействием собственного веса, механических напряжений и техногенной деятельности возникают разные виды деформаций подработанного массива горных пород (сдвигание, образование трещин, отделение слоев друг от друга, их изгиб и т. д.). В результате происходит обрушение налегающих пород, которое распространяется до дневной поверхности с образованием провалов, оседаний, мульд сдвижений [3 – 7].

Многие ученые занимаются поиском закономерностей движения налегающих массивов при отработке угольных месторождений. В отличие от угольных месторождений рудные залежи имеют сложные условия залегания, неправильную форму и составную разветвленную структуру [8, 9]. При их отработке выработанные пространства представляются весьма изометрическими. Научная база механизма оседания горных пород и закономерностей сдвижения поверх-

Исследование выполнено при поддержке Главного научно-исследовательского проекта международного и регионального сотрудничества в области научных и технологических инноваций, Национальной программы финансирования главных научно-исследовательских разработок Китая (№ 2016YFC0802206-3), Национального фонда естественных наук Китая (№ 41472262), Инновационно-исследовательской группы Чунцинского университета (№ CXQT19021), Программы по подготовке технического персонала высокого уровня в транспортной отрасли (№ 2018-26).

ностных слоев при отработке рудных месторождений находится на этапе становления, так как многие теоретические проблемы еще не решены. Однако эта тема остается чрезвычайно важной для решения практических задач.

В [10–13] рассмотрено оседание дневной поверхности, изучены углы обрушения и сдвижения. В [14] предложена модель оценки пограничных значений угловых параметров сдвижения массива пород. С ее помощью можно справиться с весьма затруднительной задачей в горнорудных районах: оценить пограничные углы обрушения и сдвижения слоев рыхлых пород по результатам наблюдения за деформациями на традиционной станции мониторинга. С помощью метода конечных элементов в ПО “HyperMesh” разработана трехмерная численная модель, учитывающая сложное строение рудного тела [15]. Она позволяет анализировать закономерности сдвижения налегающих пород после отработки каждого горизонта в свинцово-цинковом руднике “Hongling”, а также определять диапазон их изменения. В [16] в ПО “FLAC3D” по результатам колонкового бурения представлена модель и с помощью сравнительного анализа изучена надежность расчета угла сдвижения породы численным моделированием. Установлено, что результаты, полученные по данной модели в большей степени согласуются с измеренными углами на поздней стадии отработки месторождения. На основе результатов мониторинга горизонтальных и вертикальных сдвижений дневной поверхности за последние шесть лет проанализированы закономерности изменения деформаций пород под влиянием горных выработок [17]. Изучены закономерности оседания земной поверхности, вызванные подземной разработкой, на примере западной области железорудного месторождения “Chengchao” в окрестностях Эчжоу (Китай) [18], где произошли наибольшие сдвижения и деформации.

Основные усилия ученых направлены на изучение механизма образования и развития оседания дневной поверхности, тогда как изучению углов обрушения и сдвижения на примере эксплуатируемых рудников уделено меньше внимания. В настоящей работе для прогнозирования развития провала на поверхности на поздней стадии отработки рудного тела рассмотрены углы обрушения и сдвижения породных массивов средствами инженерного статистического анализа и метода эмпирической аналогии на примере железо-цинкового рудника “Chagan Aobao”. По фактическим параметрам провала земной поверхности выполнена проверка полученных углов. В результате предложены углы обрушения и сдвижения, которые могут использоваться на практике горных работ при мониторинге параметров провала.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГОРНОРУДНОГО РАЙОНА И ОБЛАСТИ ОСЕДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Геологическая структура рассматриваемого горнорудного района относительно проста и включает формации “Дуобаошан” среднего ордовикского, “Баолиг” нижнего пермского и четвертичного периодов. Формация “Дуобаошан” располагается в середине района и имеет следующий литологический состав: гранатовый и эпидотовый скарн, мрамор и биотитовый роговик. Данная формация рудонесущая, мощность железо-цинкового рудного тела 498 м. Угол простираения формации 35–40° в северо-восточном направлении, угол падения 50–62° в северо-западном направлении. Формация “Баолиг” выделяется на западной и северной частях района. Ее литологический состав включает туфовый сланец, туфовую брекчию и обыкновенный туф. Широко представлен в рассматриваемом районе слой четвертичного периода, в состав которого входит остаточный песчаный грунт с гравием и эоловым песком. Мощность слоя 0.8–25.0 м, на некоторых нижних горизонтах превышает 38 м.

Основная тектоническая структура района представлена разломами F1 и F2, простирающимися в северо-восточном направлении. Разлом F1 расположен в юго-центральной части района, что полностью обуславливает его структуру. Протяженность разлома 800 м, ширина 20–50 м, угол простираения $293–305^\circ$, угол падения $50–80^\circ$. Разлом сдвинутый, породные отдельности и трещины в области разлома относительно развиты. В зоне контакта формации “Дуобаошан” с гранитным массивом образуется зона минерализации с простираением в северо-восточном направлении. Висячий бок состоит из гранатового скарна, в нем выделяются участки рудного тела 1, 1–1, 1–3, 2, 6, 7, 9–11, 13, 23, 31 и 35, лежащий бок — из эпидотового скарна с участками 36–49.

Разлом F2 протяженностью 400 м и шириной 10–30 м расположен на севере средней части района. Угол простираения разлома $315–320^\circ$, угол падения $60–70^\circ$. Разлом сдвинутый, породные отдельности и трещины в области разлома относительно развиты. Имеются локальные залежи магнетита и диорита, которые слишком маломощны для промышленной выемки. Висячий бок состоит из эпидотового скарна, лежащий — из гранитного. Разломы F1 и F2 — постминерализованные образования с развитыми локальными трещинами, без заметной деформации рудного тела. Разломы, простирающиеся в северо-западном направлении, незначительны в масштабе рассматриваемого горнорудного района.

Первые строения на поверхности горнорудного района появились в 2005 г. В конце 2008 г. замечено образование провала, который после 2009 г. постепенно расширялся с ходом отработки месторождения. Согласно данным эксплуатации рудника, первая осадка поверхности зафиксирована в июне 2008 г. после обрушения кровли на отм. 1158 м. К маю 2019 г. в ходе эксплуатации рудника область провала имела почти эллиптическую конусообразную форму с длиной на уровне поверхности ~ 275 м с юга на север и шириной ~ 210 м. Площадь провала на уровне поверхности составляла ~ 54 тыс. м^2 , на нижнем горизонте — 7800 м^2 при максимальной глубине 135 м. Объем провала оценивается в 2.7 млн м^3 . Подъем уровня поверхности в районе провала находился на 1170–1220 м. На северной части провала уровень поверхности низкий, на северо-восточной и северо-западной частях — высокий.

На расстоянии ~ 170 м к юго-востоку от провала расположены основной и вспомогательные шахтные стволы, промышленная зона, генераторная, сигнальная вышка, диспетчерская и другие сооружения. С юга и запада от провала сооружений не возведено, однако склон провала относительно неустойчив. С севера от провала проходит дорога для вывоза рудной массы из рудника, на северо-востоке залегают окисные месторождения. При отработке рудного тела провал будет расширяться по направлению подвигания фронта выемки по простираению висячего бока, а также может увеличиваться в северо-западном направлении.

ИНЖЕНЕРНЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Угол сдвижения обычно используется для определения области деформации осадки. Сам угол находится с помощью данных высокоточного мониторинга деформации в процессе эксплуатации рудника. Область обрушения имеет явные локальные характеристики, позволяющие достаточно просто ее определить и рассчитать угол обрушения. При анализе статистических данных реализации способа добычи с обрушением, приводящем к оседанию дневной поверхности, получено большее количество данных по углу обрушения (рис. 1). Прослеживается закономерность: чем меньше глубина провала, тем больше углы обрушения.

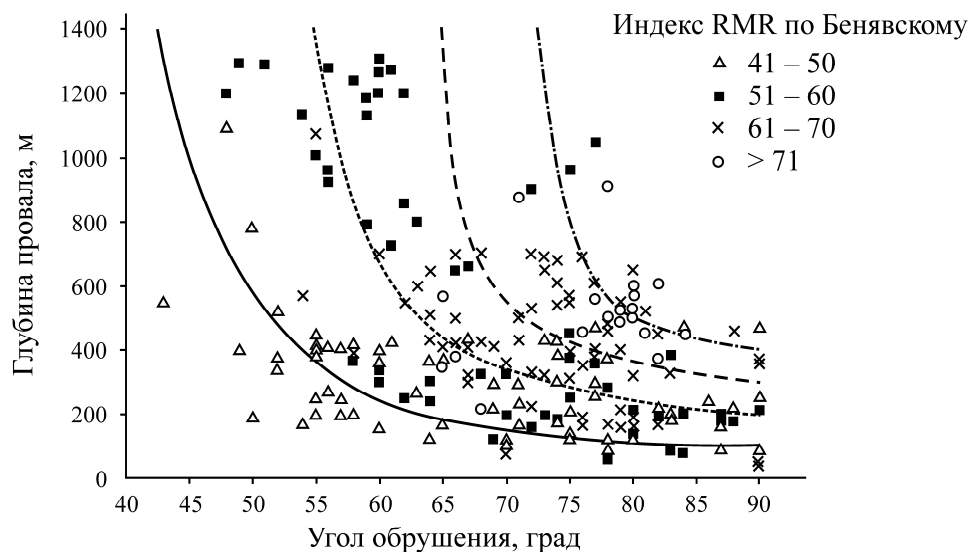


Рис. 1. Статистическое соотношение между глубиной провала и углом обрушения

Форма точек на рис. 1 отражает различия геологических условий в породном массиве через индекс RMR. Кривые аппроксимации показывают соотношение между углом обрушения и глубиной провала в соответствующих геологических условиях. С одной стороны, данное соотношение зависит от индекса RMR, что ярко выражено при его низких значениях. При высоких индексах RMR (более 71) диапазон изменения угла обрушения относительно мал ($72.5-90.0^\circ$). С другой — при низком индексе RMR (41–50) высота провала значительно влияет на угол обрушения, который изменяется в диапазоне $42.5-90.0^\circ$. Результаты статистического анализа показали, что при существенной прочности породы, когда высота провала достигает 600 м, ее влияние на угол обрушения уменьшается. То есть после достижения такой высоты провала угол обрушения уменьшается с ростом глубины добычи с меньшей интенсивностью. На рис. 2 показано статистическое соотношение между средним углом обрушения и индексом RMR.

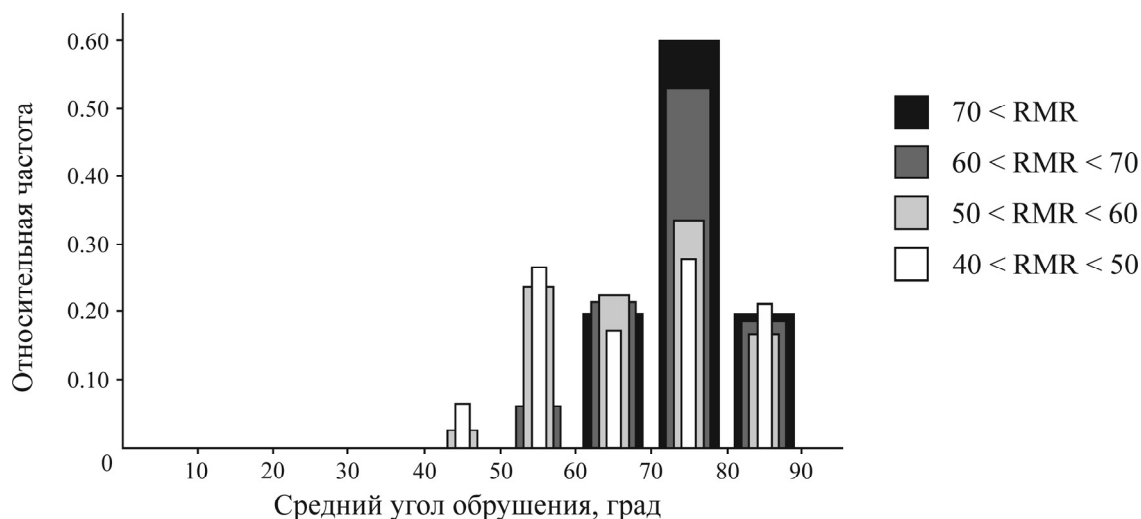


Рис. 2. Статистическое распределение угла обрушения относительно индекса RMR

В 23 случаях, когда индекс RMR превышает 70, угол обрушения находится в диапазоне $65-85^\circ$ со средним значением 77° . Данные результаты могут использоваться для определения угла обрушения применительно к железо-цинковому руднику “Chagan Aobao”. Получены

средние значения угла обрушения для отм. 950 м (текущая отметка проведения горных работ) и отм. 854 м (завершающая стадия проведения горных работ) по профилю линии 45, которые сравнивались со статистическими значениями.

В табл. 1 представлены индексы RMR, полученные с помощью данных каталога бурения по соответствующим значениям мощности для отм. 950 и 854 м на примере рассматриваемых горных работ. Видно, что средневзвешенный индекс RMR рудной породы над отм. 950 и 854 м отражает среднюю массу рудного тела в диапазоне высоты провала.

ТАБЛИЦА 1. Мощность и индекс RMR (по профилю линии 45) рудного тела и налегающей породы

Период	Порода	Начальная высота, м	Завершающая высота, м	Мощность, м	RMR
Текущая стадия, отм. 950 м	Туф	950	1089	139	57.56
	Скарн	1089	1201	112	59.19
Завершающая стадия, отм. 854 м	Скарн	854	900	46	59.19
	Туф	900	1089	189	57.56
	Скарн	1089	1201	112	59.19

В настоящий момент при добыче на отм. 950 м высота провала составляет 251 м. Исходя из линии тренда (рис. 1), угол обрушения равен 80° . Очевидно, по линии тренда и углу обрушения ~ 75 при достижении отм. 854 м высота провала будет 347 м. Согласно статистическому распределению (рис. 2), углы обрушения на отм. 950 и 854 м составляют $\sim 75^\circ$. Это близко к статистическим результатам на рис. 1.

МЕТОД ЛОБШИРА

После отработки нижнего рудного тела значение угла обрушения налегающих пород тесно связано с их структурными, прочностными и мощностными характеристиками в каждой области. С учетом этого аспекта Лобшир применил расчетную схему для разработки эмпирической модели оценки угла обрушения в верхней области оседания поверхности (рис. 3).

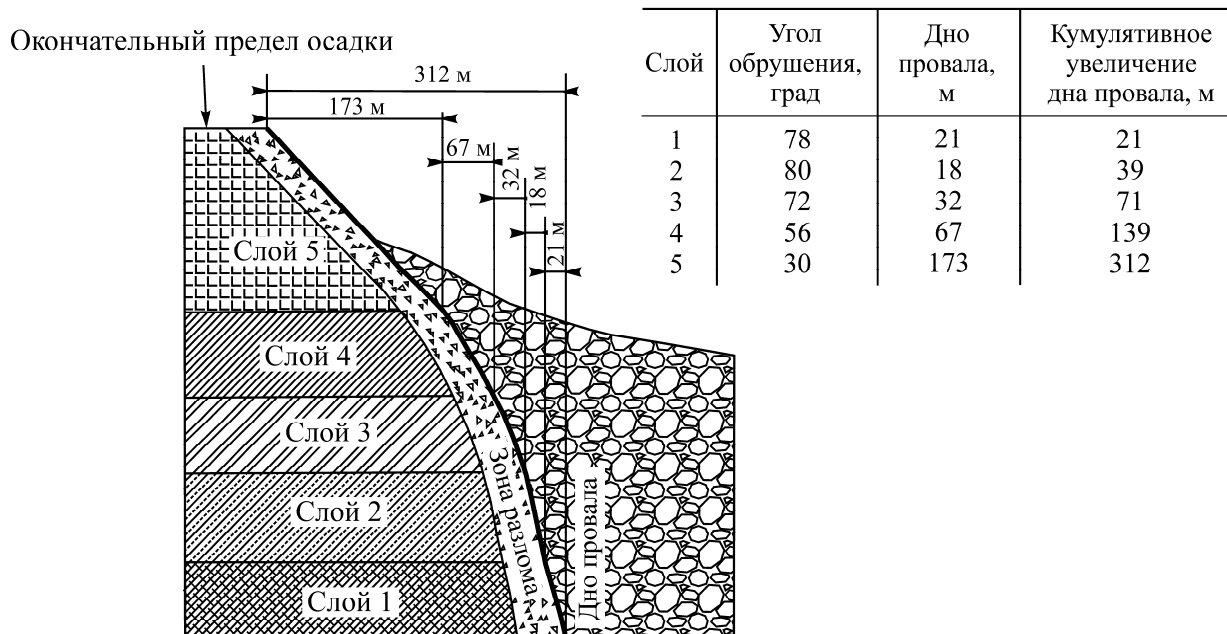


Рис. 3. Расчетная схема по методу Лобшира

Метод заключается в разделении налегающей породы на несколько слоев по прочностным характеристикам. Прочность каждого слоя определяет его угол обрушения, а мощность — размер образующегося провала. Угол обрушения и мощность каждого слоя по отдельности позволяют найти общий угол обрушения и размер провала для всего массива налегающих пород. Согласно схеме, процесс расчета выполняется снизу вверх. Угол обрушения при заданной мощности, рассчитанной по границам выработанного пространства, равен 78° и образует 21 м провала по горизонтали. По аналогии углы обрушения для слоев налегающих пород 2, 3, 4 и 5 составляют 80° , 72° , 56° и 30° соответственно. Общая ширина провала от границы области добычи 312 м.

Для каждого слоя на рис. 4 приведен расчетный график угла обрушения, учитывающий индекс MRMR и поддерживающее воздействие обрушенных пород (закладки) блока на окружающий массив. При относительно малом индексе MRMR влияние закладки блока на угол обрушения достаточно велико и наоборот (рис. 4). Если индекс MRMR составляет 80, то при закладке блока изменение угла обрушения будет происходить в диапазоне $80-90^\circ$. Если MRMR равен 10, то угол обрушения для заполненного и незаполненного блока изменяется от 15° до 90° , показывая значительную разницу.

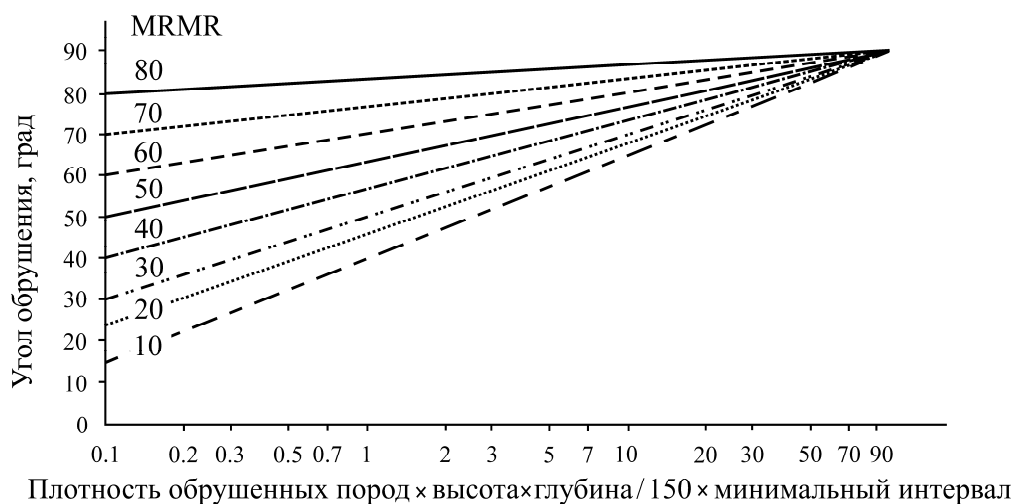


Рис. 4. Расчетный график угла обрушения по методу Лобшира

Метод Лобшира позволяет выполнить статистический анализ на фактическом провале. Согласно выполненному расчету, совокупный индекс MRMR налегающей породы над отм. 950 м рудника “Chagan Aobao” составил 58.29. Соответствующий угол обрушения находится в диапазоне $60-90^\circ$ (рис. 4) и связан с высотой провала. Результаты данной совокупной оценки очевидным образом близки к результатам инженерного статистического анализа.

Метод Лобшира может применяться для оценки угла оседания дневной поверхности для железо-цинкового рудника “Chagan Aobao”. Налегающие породы над отм. 950 м распределены по слоям в соответствии со значением индекса MRMR. Для каждого слоя рассчитан угол обрушения и его вклад в развитие размеров образованного провала.

На рис. 5 представлена полученная по методу Лобшира расчетная модель оседания дневной поверхности и угла обрушения после разработки залежи. В качестве примера рассмотрен участок, проходящий по 45-й линии. Согласно индексу RMR, полученному на основании анализа кернов, налегающая порода над отм. 950 м разделена на два слоя. Показана мощность каждого слоя, индекс MRMR равен индексу RMR.

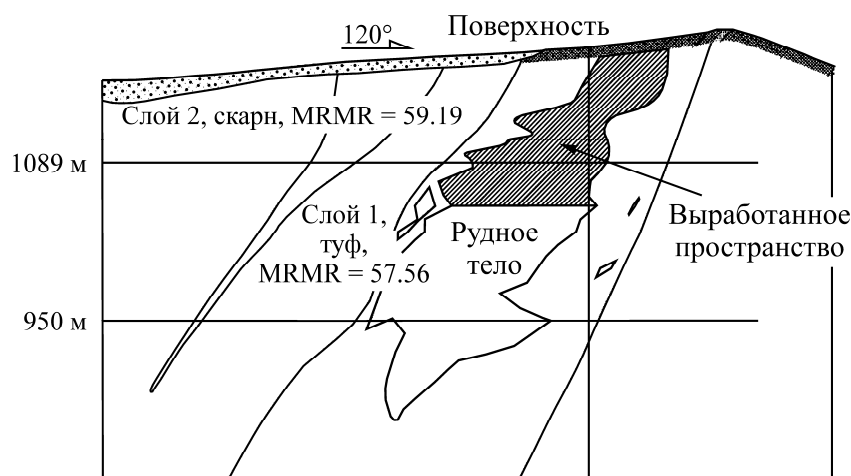


Рис. 5. Модель расчета оседания дневной поверхности и угла обрушения на отм. 950 м по профилю 45-й линии

Определенное по профилю 45-й линии горизонтальное приращение первого слоя, состоящего из туфа, равно 16.5 м; второго слоя (по топографической карте рудника) — 30.1 м. Горизонтальное приращение второго слоя получено вычитанием горизонтального приращения первого слоя. Результаты расчета угла обрушения на разных участках по глубине для момента завершения горных работ на отм. 950 м. представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Статистический расчет угла обрушения по слоям

Номер слоя	Порода	Мощность, м	MRMR	Угол обрушения, град	Горизонтальное приращение, м	Кумулятивное горизонтальное приращение, м
1	Туф	139	57.56	83	16.5	16.5
2	Скарн	112	59.19	82	13.6	30.1
Средний угол обрушения				82.5	—	—

Начиная от отм. 950 м, границы обрушения лежачего бока расширяются на 30.1 м. Угол обрушения составляет 82.5°, что немного превышает результаты инженерного статистического анализа оседания дневной поверхности (80°).

МЕТОД ЭМПИРИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

На углы обрушения и сдвижения влияет много факторов, поэтому формулы для их расчета могут задаваться только для определенных условий. При изменчивых условиях разработки месторождений невозможно одновременно рассчитать эти углы для каждого влияющего фактора. На рудниках с простыми условиями углы могут быть сначала рассчитаны по эмпирическим формулам, а затем откорректированы в соответствии с фактической ситуацией на руднике. Для рудников со сложными условиями использование эмпирических формул затруднено. В этом случае рекомендуется использовать метод аналогии для выбора требуемых данных из уже измеренных значений угла сдвижения того рудника, условия которого наиболее близки к рассматриваемому. Исходя из вторичных условий, значения полученных по методу аналогии углов сдвижения и обрушения могут быть увеличены или уменьшены соответственно.

Согласно данным по эксплуатации рудника, мощность рудного тела находится в диапазоне 0.64–69.07 м (среднее 49.22 м). Угол падения рудного тела изменяется в пределах 35–75°. По экспериментальным исследованиям механических параметров породы и инженерной оценке геологического качества горного массива коэффициент крепости f составляет от 6 до 10.

В 1974 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте горной геомеханики и маркшейдерского дела разработан метод определения параметров сдвижения пород, утвержденный Министерством угольной промышленности СССР. Метод включен в нормативный документ для определения угла сдвижения на угольных шахтах СССР. В настоящей работе выполнено сравнение существующей горнотехнической ситуации на железо-цинковом руднике “Chagan Aobao” с данными по углам обрушения и сдвижения, полученными при разработке рудных месторождений системами с обрушением в СССР, и предложены безопасные значения.

Детальные углы обрушения и сдвижения для шахт СССР представлены в табл. 3. Принимая во внимание фактическое состояние рудного массива на железо-цинковом руднике “Chagan Aobao”, ниже представлены рекомендуемые углы обрушения и сдвижения налегающего породного массива, полученные путем сравнения значений из табл. 3. Рекомендуемый угол обрушения висячего бока составил 70–75°, лежащего — 70–75°, угол обрушения по простиранию — 75–80°. Рекомендуемый угол сдвижения висячего бока 55–60°, лежащего — 55–60°, угол обрушения по простиранию — 70–75°.

ТАБЛИЦА 3. Углы обрушения и сдвижения рудного тела при его отработки методом обрушения, град

Система разработки	Угол падения рудного тела, град	Мощность рудного тела, м	Коэффициент крепости	Угол обрушения			Угол сдвижения		
				Висячий бок	Лежащий бок	По простиранию	Висячий бок	Лежащий бок	По простиранию
Без открытой отработки верхнего этажа									
Этажное и подэтажное обрушение	45–90	10–60	> 10	75–80	75–80	80–85	60–65	65–70	75–80
	45–90	5–60	6–10	70–75	70–75	75–80	55–60	55–60	70–75
	45–90	5–60	2–5	60–65	60–65	70–75	45–50	45–50	65–70
С открытой отработкой верхнего этажа									
Подэтажное обрушение	45–90	10–60	> 13	65–70	70–75	80–85	50–55	60–65	75–80
	45–90	10–60	6–10	60–65	60–65	75–80	45–50	55–60	70–75
Этажное и подэтажное обрушение	45–90	10–60	6–10	55–60	60–65	75–80	40–45	50–55	70–75
	45–90	10–60	2–5	45–50	55–60	65–70	35–40	45–50	60–65

Согласно национальным стандартам Польши, охраняемые объекты инфраструктуры по степени значимости и чувствительности к деформации поверхности разделены на четыре категории. Строения, располагающиеся в горнорудных и промышленных районах, классифицируются как гражданские и относятся к третьей категории. Допустимое значение горизонтальной деформации для данной категории составляет ≤ 2 мм/м. Для разных категорий охраняемых объектов инфраструктуры приняты следующие углы сдвижения породы:

Категория охраняемого объекта	I	II	III	IV
Угол сдвижения, град	45	58	62	66

Рекомендуемый угол сдвижения массива пород на рассматриваемом руднике 62° . Для рудника “Chagan Aobao” он выбран на основе значений угла сдвижения при полном погашении всех запасов месторождения (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Угол сдвижения породного массива при полной отработке месторождения, град

Тип массива	Коэффициент крепости f	Угол падения породного массива или рудного тела α_n	Угол сдвижения		
			Висячий бок	Лежащий бок	По простиранию
Слоистое рудное тело	< 5	0 – 30	55 – 45	55	55
		31 – 45	45 – 40	55	55
		46 – 60	40	$(\alpha_n - 5)^*$	55
		61 – 80	40 – 45	50	55
		81 – 90	45 – 50	50	55
	> 5	0 – 30	60 – 50	δ	$55 + 1.5f$
		31 – 45	50 – 45	δ	$55 + 1.5f$
		46 – 60	45 – 40	α_n	$55 + 1.5f$
		61 – 80	40	α_n	$55 + 1.5f$
		81 – 90	40 – 50	α_n^{**}	$55 + 1.5f$
Сплошное рудное тело	$5 < f < 10$	0 – 30	65	65	70
		31 – 50	60	65	70
		51 – 80	65	65	70
		81 – 90	65	65	70

* Не более 50° , ** не более 65°

Рудный массив по структурным характеристикам можно разделить на два типа. В слоистом массиве прослеживается структура напластования месторождения и распределение ослабления характерно для всей плоскости. Первоначально сдвижение массива пород происходит в виде изгиба. В этом процессе соотношение между сдвижением, значением коэффициента крепости по М. М. Протодяконову f и углом падения рудного тела явно выражено. Процесс сдвижения неслоистого массива развивается крайне стремительно и обычно проявляется в виде обрушения. В этом случае угол сдвижения породного массива является крутым, а соотношение между коэффициентом крепости f и углом падения рудного тела неочевидно.

Учитывая данные нескольких рудников с полной отработкой месторождения, рекомендованный угол сдвижения висячего бока составляет 60° , лежащего — 65° , угол сдвижения по простиранию — 70° . Эти значения согласуются с техническим проектом, выполненным компанией Inner Mongolia Xingye group Rongguan Mine Co., Ltd, в котором представлено обоснование рекомендованных значений угла сдвижения.

В табл. 5 приведены рекомендованные значения угла обрушения и угла сдвижения рудного и породного массива, полученные всеми рассмотренными методами. Учитывая текущее состояние провала, измерение его параметров и результаты трехмерного моделирования, фактические значения угла обрушения составили: 67° для верхних горизонтов, 74° для нижних и 81° по простиранию. Результаты полевых исследований в значительной степени близки к рекомендованным значениям. Выявлено, что углы обрушения и сдвижения налегающих пород, полученные методами Лобшира и эмпирической аналогии, являются корректными. Эти значения лежат в основе определения геометрических границ области сдвижения пород, а также параметров возможного провала на поверхности на завершающей стадии отработки месторождения.

ТАБЛИЦА 5. Итоговые результаты оценки угла обрушения и угла сдвижения, град

Метод определения	Угол обрушения			Угол сдвижения		
	Лежащий бок	Висячий бок	По простиранию	Лежащий бок	Висячий бок	По простиранию
Инженерный статистический анализ	75–80	75–80	75–80	/	/	/
Метод Лобшира	82	/	/	/	/	/
Опыт СССР	70–75	70–75	75–80	55–60	55–60	70–75
Опыт Польши	—	—	—	62	62	62
Эмпирический угол сдвижения	—	—	—	65	60	70
Окончательные значения	75	70	80	60	55	65

ВЫВОДЫ

Для железо-цинкового рудника “Chagan Aobao” с помощью инженерного статистического анализа и метода эмпирической аналогии обоснованы и рекомендованы значения углов обрушения и сдвижения налегающей породы при подземной добыче минерального сырья.

Установлено, что углы, полученные при помощи инженерного статистического анализа, в основном зависят от значения индекса MRMR. В рамках метода Лобшира на значение углов существенное влияние оказывают прочность и мощность налегающих пород.

Применительно к условиям рудника “Chagan Aobao” рекомендуются следующие значения углов, град: угол обрушения висячего бока — 70, угол обрушения лежащего бока — 75, угол обрушения по простиранию — 80, угол сдвижения висячего бока — 55, угол сдвижения лежащего бока — 60, угол сдвижения по простиранию — 65.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brady B. H. G. and Brown E. T. Rock mechanics for underground mining, Springer, 2006. — 628 p.
2. Cai M. F. Theory and practice of mining design optimization and ground pressure control in metal mines, Beijing, Science Press, 2010.
3. Jiang F. F., Li X. D., Wan B. et al. Analysis of the influence of post membrane cementation filling on strata movement in the two-step drift Stope, Min. Res. Development., 2016, Vol. 36, No. 10. — P. 94–98.
4. Jiao A., Xu M. G., Wang P. et al. Analysis of impacts of change of rock stratum movement angle on combined mining on economic performance on Chengchao iron mine, Industrial Miner. Proc., 2016, Vol. 45, No. 7. — P. 42–45.
5. Ren W. Z., Bai S. W., Sun G. F. et al. Research on deformation and subsidence characters of ground and surrounding rock induced by underground mining thick covering terrain by model test, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2005, Vol. 24, No. 21. — P. 3935–3941.
6. Cheng G. W., Chen C. X., Shen Q. et al. The mechanism of rock movement caused by underground mining in Chengchao iron, Rock Soil Mech., 2014, Vol. 35, No. 5. — P. 1421–1429.
7. Huang P. L. Study on rock movement caused by underground mining in tectonic stress-mines, Wuhan, Institute of rock and soil mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008.

8. **Huang P. L., Chen C. X., Xiao G. F. et al.** Study of rock movement caused by underground mining in mines with complicated geological conditions, *Rock Soil Mech.*, 2009, Vol. 30, No. 10. — P. 3020–3024.
9. **Huang P. L. and Chen C. X.** Model test study on rock movement caused by open-underground combined mining, *Rock Soil Mech.*, 2008, Vol. 29, No. 5. — P. 1310–1314.
10. **Chen L. W., Bai S. W., and Li Y. F.** Model test study on deformation and subsidence of ground surface and surrounding rock caused by exploiting inclining mine near surface, *Rock Soil Mech.*, 2006, Vol. 27, No. 6. — P. 885–889.
11. **He Y. G., Yan R. G., and Zeng Z. Q.** Law of mining surface movement by the effect of tectonic stress, *Min. Metall. Eng.*, 2000, Vol. 20, No. 3. — P. 12–14.
12. **Cao Y., Yan R. G., He Y. G. et al.** Macroscopic destroy of tectonic stress type surface movement, *Min. Metall. Eng.*, 2002, Vol. 22, No. 2. — P. 31–33.
13. **Fang J. Q., Peng Z. B., and Yan R. G.** The law of tectonic stress mining ground surface subsidence and its engineering treatment method, *J. Central South University Technol. (Natural Sci.)*, 2004, Vol. 35, No. 3. — P. 506–510.
14. **Jiang K. G., Wang L., Jiang C. et al.** Angle parameter estimation of surface movement basin boundary based on weighted iterative least squares, *J. Hefei University Technol. (Natural Sci.)*, 2019, Vol. 42, No. 8. — P. 1131–1136.
15. **Tong D. Z. and Wang J.** Delineation of strata movement zone in hongling lead-zinc mine based on numerical simulation, *Nonferrous Met. (Mine Section)*, 2019, Vol. 71, No. 5. — P. 10–13.
16. **Hu S. H., Guo G. L., and Gong Y. Q.** Determination of strata displacement angle based on numerical simulation of complete borehole column, *Met. Mine*, 2019, Vol. 8. — P. 54–57.
17. **Xia K. Z., Liu X. M., Chen C. X., Fu H., Zhang H., Zhang J., and Wu Y.** Surface deformation in west area of Chengchao iron mine induced by underground mining, *Chinese J. Rock Mech. Eng.*, 2014, Vol. 8. — P. 1572–1588.
18. **Long L. L., Chen C. X., Xia K. Z. et al.** Research on the surface subsidence laws during underground mining in the west of Chengchao iron mine, *Mining Res. Development*, 2016, Vol. 36, No. 7. — P. 47–52.

Поступила в редакцию 07/IV 2020

После доработки 22/VI 2022

Принята к публикации 21/IX 2022