

РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 551-622

ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ МАССИВОВ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ГОРНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

В. Н. Тюпин¹, В. Н. Анисимов²

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
E-mail: tyupinvn@mail.ru, ул. Победы, 85, 308015, г. Белгород, Россия

²Институт динамики геосфер РАН, E-mail: vicnican@ya.ru,
Ленинский проспект, 38, к. 1, 119334, г. Москва, Россия

Обосновывается необходимость учета анизотропии на примере разработки сложноструктурных массивов железистых кварцитов Курской магнитной аномалии с целью повышения показателей горно-технологических и взрывных работ, получения регулируемого грансостава, уменьшения выхода негабарита, снижения энергетических затрат на измельчение, повышения показателей выхода полезных компонентов в концентрат и снижения потерь с учетом требований и условий рационального недропользования. Проанализировано влияние анизотропии I–III порядка на результаты дробления массива железистых кварцитов взрывом. Приведены теоретические формулы расчета радиуса зоны регулируемого дробления в зависимости от геолого-геофизических особенностей массива и практические результаты, полученные при взрывании на карьерах Курской магнитной аномалии.

Горные работы, направление отбойки, пространственное положение элементов массива, ось шарнира складки, ядро, крыло складки, антиклинальные, синклинальные складки, направление слоистости, угол падения, регулируемый грансостав, выход негабарита

DOI: 10.15372/FTPRPI20180107

Как показывают исследования железистых кварцитов Курской магнитной аномалии (КМА), одним из важнейших свойств сложноструктурных массивов помимо блочности, трещиноватости, прочностных и упругих характеристик является их анизотропия. Особенно важное значение имеет анизотропия при обосновании разработки железорудных месторождений взрывными воздействиями с учетом их генезиса, геолого-геофизических особенностей, требований и условий рационального недропользования для корректировки технологических параметров и параметров буровзрывных работ (БВР) как на действующих, так и вновь проектируемых железорудных предприятиях [1]. Вопросы влияния блочно-иерархического строения горного массива, включая анизотропию различных порядков, на процессы горного производства изучались в [2–6].

Учет геолого-геофизических особенностей массива горных пород при проектировании параметров подготовительных технологических работ и БВР дает возможность правильно выбрать направление развития фронта горных работ на основе требований и условий рационального недропользования. Это позволяет сформировать пространственное положение вновь образованной свободной поверхности блоков, направление отбойки с учетом основных геоструктурных элементов массива: осей шарниров антиклинальных и синклинальных складок, ядер и крыльев складок, направления слоистости и угла падения осей и крыльев складок. Данный методологический подход значительно повышает горно-технологические показатели и результаты взрывной рудоподготовки, уменьшает выход негабарита, снижает энергетические затраты на измельчение и потери в хвостах обогащения, повышает показатели выхода полезных компонентов в концентрат [6, 7]. Особую роль среди геолого-геофизических особенностей массивов играет анизотропия.

Известно, что анизотропия скальных пород массивов прежде всего связана с их генезисом, что особенно характерно для месторождений железистых кварцитов Курской магнитной аномалии с ярко выраженной слоистостью, блочностью и трещиноватостью, приуроченной к основным структурным элементам массива, таким как оси шарниров складок, ядра и крылья складок (рис. 1).

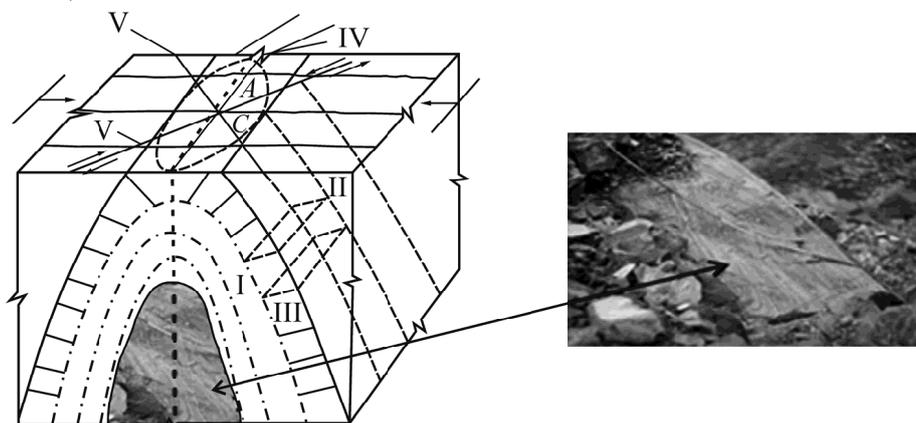


Рис. 1. Элементы приосевой зоны ядра складки и ориентация естественных трещин по отношению к оси шарнира складки: *A* — ось шарнира антиклинальной складки; *C* — ось шарнира синклинальной складки; I–V — порядок анизотропии

Анизотропия скальных пород может быть обусловлена тектоническими процессами, например подвижкой плит земной коры, а также наличием разломов различного порядка. Выделяется несколько порядков анизотропии [8]:

- анизотропия, связанная с залеганием горных пород в виде синклиналей, антиклиналей, серии линейных складок (I порядок);
- анизотропия, вызванная макротрещиноватостью и слоистостью скального массива горных пород (II порядок);
- петрографическая анизотропия, которая проявляется в анизотропии образцов горных пород, обусловленная микротрещиноватостью (III порядок) [9–11];
- анизотропия кристаллов, связанная с упорядоченным строением кристаллической решетки (IV порядок).

Типичные представители анизотропных пород — сложноструктурные массивы железистых кварцитов месторождений КМА, которые представляют собой ярко выраженные слоистые структуры с пространственным чередованием осей шарниров антиклинальных и синклинальных складок различного порядка, трещиноватых, блочных, крыльев складок и плотных прочных ядер. Все эти элементы структур предполагают наличие анизотропных свойств массива.

С целью повышения эффективности БВР и последующего технологического передела при проектировании параметров БВР сложноструктурных массивов железистых кварцитов необходимо учитывать анизотропию I – III порядка.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Опыт ведения взрывных работ показывает, что анизотропия II – III порядка (макро- и микротрещиноватость) определяет радиус зоны разрушения массива, а значит, расстояние между скважинами, величину ЛСПП (линия сопротивления по подошве); анизотропия I порядка — направление отбойки, т. е. расположение линии одновременно взрывааемых скважин относительно оси шарниров складок или пространственное положение вновь образованной при взрыве свободной поверхности (рис. 2).

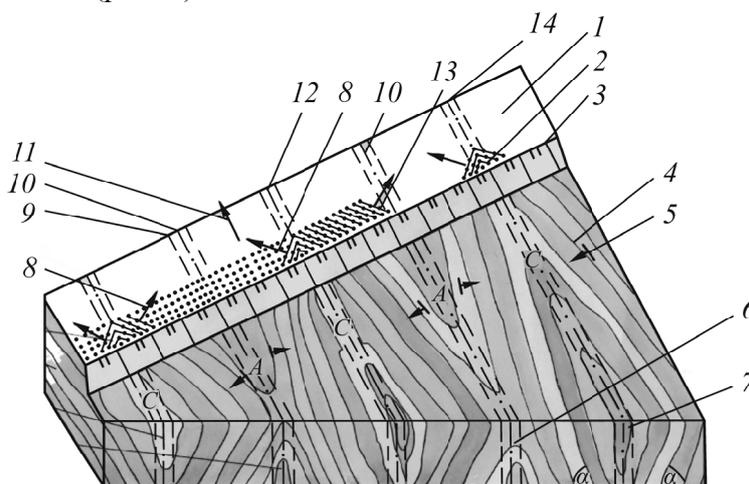


Рис. 2. Геологическая блок-схема сложноструктурного массива железистых кварцитов с пространственным расположением взрывных скважин и мест заложения врубов: 1 — взрываемый блок; 2, 13 — линия коммутации одновременно взрывааемых зарядов ВВ; 3 — линия формирования откоса уступа; 4 — направление простирания слоев складок; 5 — направление угла падения крыльев складок; 6, 7 — ядро синклиальной и антиклиальной складки; 8 — направление распространения разрушающей волны деформаций; 9, 14 — приосевые зоны складок; 10, 12 — оси шарниров синклиальной и антиклиальной складки; 11 — направление развития фронта горных работ; А — ось шарнира антиклиальной складки; С — ось шарнира синклиальной складки

Исследования на месторождениях КМА, начатые еще в начале 80-х годов прошлого столетия, показали, что правильный учет анизотропии при разработке и проектировании параметров горно-технологических и взрывных работ существенно влияет на повышение эффективности дробления руды с раскрытием зерен основных породообразующих минералов. Это происходит за счет использования зависимости направления сдвиговых напряжений от направления линии простирания и падения слоев рудного массива, которые неразрывно связаны с пространственным положением и чередованием осей шарниров антиклинальных и синклинальных складок различного порядка (рис. 2) [1, 6, 7]. Это позволило разработать методику проектирования параметров БВР и оценки влияния взрывного воздействия на показатели измельчения и обогащения железистых кварцитов [6].

Весьма важным является определение размера (радиуса) зоны регулируемого дробления с учетом анизотропии в различных направлениях: вдоль и вкrest напластования (слоистости), а также под различными углами. В пределах радиуса зоны регулируемого дробления размер крупных кусков после взрыва не превышает кондиционного.

Теоретически формула расчета радиуса зоны регулируемого дробления вдоль и вкост напластования получена в [12] и с учетом исследований [13, 14] имеет вид

$$R = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho d_0 c \nu}{\sigma_1 \Phi^{0.5} (1-\nu)} \left(1 - \frac{\mu\nu}{1-\nu}\right) \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}, \quad (1)$$

где D, ρ, d_0 — скорость детонации, плотность заряжения и диаметр заряда ВВ; c, ν, μ — скорость продольной волны, коэффициент Пуассона отдельности массива, коэффициент трения между отдельностями; d_1, d_2, Φ — размер кондиционного куска, размер отдельности, показатель трещиноватости горного массива; σ_1 — предел прочности на разрыв.

Для расчета R в различных направлениях численные значения параметров c, ν, σ_1, d_2 находят экспериментально параллельно и перпендикулярно напластованию. Последующие аналитические исследования позволили вывести формулу для определения R с учетом различного угла наклона к плоскости напластования β в анизотропном массиве:

$$R = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho d_0 c \nu}{\sigma_1 \Phi^{0.5} (1-\nu)} \left(1 - \frac{\mu\nu}{1-\nu}\right) (1 + \cos \beta)^{0.5} \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}. \quad (2)$$

Здесь значения параметров c, ν, σ_1, d_2 рассчитаны как средние, независимо от ориентировки напластования. Генеральные радиусы получены при $\beta = 0, 90, 180, 270^\circ$.

Однако физико-технический анализ показывает, что при взрывании скважины в анизотропном массиве в секторах с углами наклона к напластованию $30-60, 120-150, 210-240, 300-330^\circ$ отдельности массива кроме сжимающих нагрузок будут воспринимать и сдвиговые. Теоретические исследования [13, 14] дали формулу для определения радиуса зоны регулируемого дробления при действии сдвиговых нагрузок:

$$R = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho d_0 c}{\sigma_2 \Phi^{0.5}} \left(1 - \frac{\mu\nu}{1-\nu}\right) \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}, \quad (3)$$

где σ_2 — предел прочности образца породы на сдвиг.

Формулы (1)–(3) включают в себя показатели анизотропии III порядка: предел прочности на растяжение, предел прочности на сдвиг, скорость продольной волны в отдельности, коэффициент Пуассона; параметры анизотропии II порядка: размер отдельности, показатель трещиноватости массива. Именно показатели II–III определяют расстояние между одновременно взрывающимися скважинами в ряду и расстояние между короткозамедленно взрывающимися рядами скважин. Согласно математическому анализу, зона дробления взрывом в анизотропном трещиноватом массиве имеет некруговую форму.

Найдем численно радиус зоны регулируемого дробления анизотропного массива железистых кварцитов в различных направлениях: по формуле (2) при $0, 180$ и $90, 270^\circ$, по формуле (3) в секторе $30-60^\circ$. Параметры для расчета по формулам (1)–(3): $D = 3.6 \cdot 10^3$ м/с, ВВ граммонит М-21, $\rho = 0.85 \cdot 10^3$ кг/м³, $d_0 = 0.25$ м, $\mu = 0.45$, $d_1 = 0.4$ м. Пользуясь экспериментальными данными [11], принимаем для железистых кварцитов $\sigma_1 = 13 \cdot 10^6$ Па, $c = 5 \cdot 10^3$ м/с, $\nu = 0.24$, $d_2 = 0.375$ м, $\sigma_2 = 26 \cdot 10^6$ Па, $\Phi = 80$. Учитывая данные [9] и исследования [10], предел прочности породы на сдвиг в 2 раза больше, чем на растяжение.

Численные расчеты по формуле (2) при углах наклона к плоскости напластования $0, 180^\circ$ дают $R = 3.21$ м, при углах $90, 270^\circ$ — $R = 2.27$ м. Расчеты по формуле (3) в секторах $30-60^\circ, 120-150^\circ$ и т. д., где определяющими являются сдвиговые нагрузки, дают $R = 3.13$ м.

Геометрические построения показали, что зона регулируемого дробления в анизотропной среде принимает неравностороннюю шестигранную форму. Для уменьшения зоны нерегулируемого дробления необходимо линию (плоскость) одновременно взрывааемых зарядов ВВ располагать под углом $30-60^\circ$ к оси шарнира синклиальной или антиклиальной складки (рис. 2).

Теоретические исследования и промышленное использование результатов по отбойке анизотропных массивов в условиях Лебединского и Стойленского карьеров подтвердили, что наиболее рационально располагать группу одновременно взрывааемых скважин по линии под углом $45-60^\circ$ к оси шарнира синклиальной или антиклиальной складки [1, 6, 7] (рис. 2). Врубы на взрывааемых блоках предпочтительно размещать в зоне синклиальных складок, при наличии на блоке двух и более складок врубы инициируются одновременно, а потоки разрушающих волн деформаций аккумулируются в области ядра антиклиальной складки (рис. 2). Расстояние между скважинами в ряду и между рядами одновременно взрывааемых скважин должно выбираться в соответствии с примерно шестигранной формой разрушения анизотропного массива и быть равным $(3-4)R$.

В таблице приведены результаты замеров гранулометрического состава после взрыва в блоке № 28 на Стойленском карьере на различных участках 1–5 отбитой горной массы. После проведения взрывов отмечена хорошая проработка подошвы и оптимальный гранулометрический состав [1, 6].

Гранулометрический состав горной массы на различных участках 1–5 взорванного блока, %

Размер фракций, мм	Выход фракций в зонах блока № 28, гор. – 10 м					Выход фракций в среднем
	1	2	3	4	5	
< 250	67	70	73	64	60	69
250–400	23	22	13	27	25	22
400–500	10	8	4	9	15	9
> 500	—	—	—	—	—	—

Все эти приемы и операции в совокупности позволяют обеспечить повышение производительности и снижение энергозатрат на $15-20\%$ при последующем технологическом переделе взорванной горной массы, а также снизить потери полезных компонентов.

Рассмотренные способы и параметры взрывания с учетом геолого-геофизической информации применены в условиях региона КМА на Лебединском и Стойленском ГОКах. Общий объем горной массы по всем взорванным экспериментальным блокам составил более 600 тыс. м^3 .

ВЫВОДЫ

Эффективное взрывное воздействие на сложноструктурные массивы железистых кварцитов основывается на условии создания разрушающей волны деформаций группой одновременно взрывааемых скважин в плоскости, расположенной под углом $45-60^\circ$ к оси шарнира синклиальной или антиклиальной складки. При наличии на блоке двух и более складок врубы в синклиналах инициируются одновременно.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при работах, связанных с обеспечением условий и требований рационального недропользования, геоэкологической безопасности при проектировании и корректировке планов развития горных работ и параметров БВР на разрабатываемых железорудных месторождениях. Это также актуально для плани-

руемых к разработке открытым и подземным способом перспективных железорудных и других сложноструктурных месторождений твердых полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анисимов В. Н.** Обоснование разработки железорудных месторождений взрывными воздействиями с учетом геолого-геофизических особенностей и условий рационального недропользования // ГИАБ. — 2015. — № 9. — Вып. 33. — С. 1–23.
2. **Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Пороховский Н. Н., Гришин А. Н. и др.** О влиянии массового взрыва в карьере строительного камня на формирование спектра сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 74–89.
3. **Першин Г. Д., Уляков М. С.** Повышение выхода блоков высокопрочного камня на месторождениях со сложным залеганием природных трещин в массиве // ФТПРПИ. — 2015. — № 2. — С. 118–123.
4. **Гзогян Т. Н., Гзогян С. Р.** Железистые кварциты Кимканского месторождения и их обогащение // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 118–123.
5. **Юсупов Т. С., Уракаев Ф. Х., Исупов В. П.** Прогноз структурно-химических изменений минералов при механических воздействиях в процессах измельчения // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 161–168.
6. **Анисимов В. Н.** Методика проектирования параметров БВР и оценки влияния взрывного воздействия на показатели измельчения и обогащения железистых кварцитов с учетом процесса их взрывомагнитной деструкции // ГИАБ. — 2012. — № 5. — С. 213–223.
7. **Анисимов В. Н.** Взрывомагнитная деструкция кристаллических материалов (горных пород) различными импульсными динамическими воздействиями. — М.: ВИА им. Н. Е. Жуковского, 2008. — 128 с.
8. **Рац М. В.** Неоднородность горных пород и их физических свойств. — М.: Наука, 1968. — 107 с.
9. **Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протождяконова.** — М.: Недра, 1975. — 276 с.
10. **Ржевский В. В., Новик Г. Я.** Основы физики горных пород. — М.: Недра, 1984. — 232 с.
11. **Исследование напряженно-деформированного состояния пород в целиках при отработке Коробковского месторождения КМА этажно-камерной системой с увеличенными параметрами: отчет ВИОГЕМ.** — ГР № 01824010245. — Белгород, 1984. — 147 с.
12. **Кутузов Б. Н., Тюпин В. Н.** Определение размера зоны регулируемого дробления при взрыве заряда в трещиноватом массиве // Горн. журн. — 1974. — № 8. — С. 30–35.
13. **Tyupin V. N.** Raising the efficiency of blasting in quarries, Proceedings of the I International Scientific Conference on Economic Management in Mineral Activities-EMMA, Hanoi, Vietnam, 2013. — P. 303–307, 586–590.
14. **Тюпин В. Н.** Опасные физические процессы при эксплуатации железных дорог. — Чита: ЗаБИЖТ, 2013. — 149 с.

Поступила в редакцию 14/III 2017