



НИЦ «Прикладная геомеханика
и конвергентные горные технологии»
Горного института НИТУ МИСИС

Методические рекомендации по оценке устойчивости подземных горных выработок в условиях разработки рудных месторождений

Разработчики:

д.т.н., проф. РАН Еременко В.А., PhD Федянин А.С., Лушников В.Н.,
к.т.н. Косырева М.А.

Москва, 2025

СОДЕРЖАНИЕ:

1. Общие положения	3
2. Методика расчета индекса устойчивости подземной горной выработки R_m	4
3. Прогноз времени устойчивости, смещений свободного от крепи контура и высоты свода возможного обрушения подземной горной выработки	13
4. Оценка вероятности разрушения горной выработки	15
5. Оценка устойчивости подземной горной выработки по индексу R_m	17
6. Работа с комплексной номограммой	19
7. Пример оценки устойчивости горной выработки на руднике	22
Информация об авторах	27

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Индекс R_m применяется для количественной оценки устойчивости подземных горных выработок при разработке рудных месторождений. Критерии классификации представлены ниже в формате справочных таблиц. Диапазон оценки представляет собой пять категорий устойчивости подземных горных выработок (**табл. 1**), которые согласуются с разрабатываемым в настоящее время проектом Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости подземных горных выработок при разработке твердых полезных ископаемых».

Параметры индекса R_m выбираются из апробированных систем количественной оценки качества породного массива и устойчивости подземных горных выработок, российской системы представленной в СП 91.13330.2012 «Подземные горные выработки», зарубежных систем – Бартон (индекс Q), рейтинговой классификации Бенявского (индекс RMR), Мэтьюза-Потвина (фактор N), Хука (геологический индекс прочности GSI) или других схожих систем.

Таблица 1. Категории устойчивости подземных горных выработок по индексу R_m

Диапазон индекса R_m	Категория устойчивости	Оценка состояния устойчивости	Характеристика состояния устойчивости
1÷0,8	I	Очень устойчивое	Деформации и смещения отсутствуют, массив сохраняет целостность
0,8÷0,6	II	Устойчивое	Локальные нарушения, затухающие деформации. Начальная стадия формирования зоны неупругих деформаций. Деформации пород носят затухающий характер.
0,6÷0,4	III	Средне-устойчивое	Распространение нарушений пород вглубь массива. Развитие зон неупругих деформаций, возможны локальные обрушения в ослабленных зонах.
0,4÷0,2	IV	Неустойчивое	Значительные смещения контура выработки, слабо затухающие деформации
0,2÷0	V	Очень неустойчивое	Критическое развитие зон разрушения, незатухающие деформации. Смещения свободного (или при малом отпоре крепи) контура выработки носят слабо затухающий и незатухающий характер.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНДЕКСА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ R_m

Факторы устойчивости горной выработки классифицируются на шесть групп (табл. 2, 3), включающие природные и техногенные факторы.

Природные факторы:

- Физико-механические свойства горных пород;
- Качество породного массива;
- Состояние трещиноватости.

Техногенные факторы:

- Геометрия выработки и ориентации трещин;
- Горное давление;
- Способ проведения выработки.

Все факторы взаимосвязаны и в разной степени влияют на устойчивость. Их совокупное воздействие выражается индексом R_m .

Сумма параметров, показателей или факторов, оказывающих влияние на устойчивость выработки описывается индексом R_m :

$$R_m = R'_m \cdot K_{VT_{24}} \cdot K_{VT_{27}} \cdot K_{VT_{28}}, \quad (1.1)$$

$$R'_m = \frac{\sum_i R_{mp_i} + \sum_i R_{mt_i}}{n} \quad (R_{mt_{24}}, R_{mt_{27}}, R_{mt_{28}} \text{ в расчет}$$

$$R'_m \text{ не входят}), \quad (1.2)$$

где R'_m — базовый индекс устойчивости горной выработки, который не учитывает факторов техногенного влияния на устойчивость ширины пролета выработки, на выработку других выработок и способа проведения выработки;

R_{mp_i} — индекс **природных составляющих**, влияющих на устойчивость горной выработки отдельного параметра, показателя или фактора;

R_{mt_i} — индекс **техногенного влияния** на устойчивость выработки отдельного параметра, показателя или фактора;

n — число учитываемых параметров в расчете;

i — порядковый номер индекса.

Коэффициенты:

• $K_{VT_{24}}$ — коэффициент влияния ширины пролета выработки $R_{mt_{24}}$ (табл. 4);

• $K_{VT_{27}}$ — коэффициент влияния на выработку других выработок $R_{mt_{27}}$ (табл. 5);

• $K_{VT_{28}}$ — коэффициент влияния способа проходки выработки $R_{mt_{28}}$ (табл. 6).

Базовый индекс R'_m может рассчитываться как **по одному** выбранному параметру, показателю или фактору **из каждой группы**, так и по **нескольким параметрам из каждой группы**.

Отдельные элементы системы имеют как **природную составляющую**, так и **техногенное влияние** на устойчивость выработки, которые в разной степени оказывают влияние на суммарный базовый индекс R'_m , в связи с чем необходимо учитывать их вес посредством введения **коэффициентов влияния K_{vp_i} и K_{vt_i}** (таб. 2). **Суммарный коэффициент влияния K_v** определяет интегральное единство элементов системы и **равен 1**:

$$K_v = \sum_i K_{vp_i} + \sum_i K_{vt_i} = 1 \quad (K_{VT_{24}}, K_{VT_{27}}, K_{VT_{28}} \text{ — в расчет } K_v \text{ не входят}). \quad (2)$$

Таблица 2. Параметры, показатели или факторы в рейтинговой системе оценки устойчивости подземных горных выработок по индексу R_m

Название группы	Параметр, показатель или фактор	Индекс природных составляющих, влияющих на устойчивость горной выработки отдельного параметра, показателя или фактора R_{mp_i}	Коэффициент влияния K_{vp_i} по параметру, показателю или фактору (природная составляющая)
1. Физико-механические свойства горных пород	Прочность горной породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ в образце, МПа	R_{mp_1}	0,12
	Сцепление в массиве C , МПа	R_{mp_2}	0,1
	Угол внутреннего трения в массиве φ , град.	R_{mp_3}	0,1

Продолжение табл. 2

Название группы	Параметр, показатель или фактор	Индекс природных составляющих, влияющих на устойчивость горной выработки отдельного параметра, показателя или фактора R_{mp_i}	Коэффициент влияния K_{up} , по параметру, показателю или фактору (природная составляющая)
2. Качество породного массива	Показатель качества породного массива RQD, %	R_{mp_4}	0,09
	Модуль трещиноватости (частота трещиноватости FF), тр./м.	R_{mp_5}	0,06
	Модуль кусковатости, кс./пог. м	R_{mp_6}	0,04
	Выход керна, %	R_{mp_7}	0,02
	Коэффициент структурного ослабления $K_{с.о}$	R_{mp_8}	0,04
	Геологический индекс прочности GSI	R_{mp_9}	0,06
3. Состояние трещиноватости	Расстояние между трещинами J_{A3} , мм	$R_{mp_{10}}$	0,03
	Шероховатость поверхности стенок трещин J_{A41}	$R_{mp_{11}}$	0,02
	Длина трещин J_{A42} , м	$R_{mp_{12}}$	0,02
	Раскрытие трещин J_{A43} , мм	$R_{mp_{13}}$	0,03
	Заполнитель трещин J_{A44} , мм	$R_{mp_{14}}$	0,02
	Измененность стенок трещин J_{A45}	$R_{mp_{15}}$	0,02
	Обводненность пород выработки J_{A5}	$R_{mp_{16}}$	0,02
	Показатель количества систем трещин J_n	$R_{mp_{17}}$	0,01
	Показатель шероховатости поверхности стенок трещин J_r	$R_{mp_{18}}$	0,01
	Показатель измененности (выветрелости) трещин J_a	$R_{mp_{19}}$	0,01
	Показатель присутствия воды в трещинах J_w	$R_{mp_{20}}$	0,02
Название группы	Параметр, показатель или фактор	Индекс техногенного влияния на устойчивость выработки отдельного параметра, показателя или фактора R_{mt_i}	Коэффициент влияния K_{ut} , по параметру, показателю или фактору (техногенное влияние)
4. Геометрия выработки и ориентации трещин	Влияние ориентации трещин на устойчивость выработки J_B	$R_{mt_{21}}$	0,03
	k_α – коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости	$R_{mt_{22}}$	0,03
	k_θ – коэффициент направления смещения пород со стороны кровли и почвы выработки или со стороны боков выработки	$R_{mt_{23}}$	0,02
	Фактор, учитывающий пролет выработки b , м	$R_{mt_{24}}$ (табл. 4)	
	Фактор, учитывающий угол падения плоскости обнажения выработки, град.	$R_{mt_{25}}$	0,02
5. Горное давление	Фактор напряженного состояния массива $\sigma_{сж}/\sigma_{max}$	$R_{mt_{26}}$	0,06
	Фактор, учитывающий воздействия на выработку других выработок	$R_{mt_{27}}$ (табл. 5)	
6. Способ проведения выработки	Фактор, учитывающий способ проведения выработки	$R_{mt_{28}}$ (табл. 6)	
Суммарный коэффициент влияния K_y (формула 2)			1

Таблица 3. Составные элементы индекса R_m

Параметр, показатель или фактор	Интервалы значений				
	0,8–1	0,6–0,8	0,4–0,6	0,2–0,4	0–0,2
	I	II	III	IV	V
Физико-механические свойства горных пород					
Прочность горной породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ в образце, МПа (R_{mp1})	>250	100–250	50–100	25–50	1–25
Сцепление в массиве C , МПа (R_{mp2})	>0,4	0,3–0,4	0,2–0,3	0,1–0,2	<0,1
Угол внутреннего трения в массиве φ , град. (R_{mp3})	>45°	35–45°	25–35°	15–25°	<15°
Качество породного массива					
Показатель качества породного массива RQD , % (R_{mp4})	90–100	75–90	50–75	25–50	<25
Модуль трещиноватости (частота трещиноватости FF , тр./пог. м (R_{mp5}))	1	1–3	3–10	10–21	>21
	Единичные волосные и тонкие трещины шириной менее 1 мм	Волосные и тонкие трещины шириной менее 1 мм с единичными трещинами шириной 2 мм	Наряду с тонкими трещинами шириной до 1 мм (до 50%) встречаются мелкие трещины шириной от 2 до 5 мм и средние шириной от 5 до 20 мм	Наряду с мелкими трещинами встречаются крупные трещины шириной от 20 до 100 мм (10–20%)	Наряду с мелкими и крупными трещинами присутствуют трещины шириной более 100 мм
Модуль кусковатости, кс./пог. м (R_{mp6})	2	2–5	5–12	12–21	>21
Выход керна, % (R_{mp7})	>85	58–85	18–58	2–18	<2
	Трещины практически отсутствуют	Керн с плоскостями ослабления в среднем через 1–1,5 м	Керн с плоскостями ослабления в среднем через 0,5–1,5 м	Выход керна кусками с плоскостями ослабления в среднем через 0,1–0,5 м	Выход керна мелкими обломками, плоскости ослабления менее чем через 0,1 м
Коэффициент структурного ослабления $K_{с.о}$ (R_{mp8})	0,6–0,9	0,4–0,6	0,3–0,4	0,1–0,3	<0,1
Геологический индекс прочности GSI (R_{mp9})	75–100	55–75	35–55	18–35	<18

Параметр, показатель или фактор	Интервалы значений				
	0,8–1	0,6–0,8	0,4–0,6	0,2–0,4	0–0,2
	I	II	III	IV	V
Категория устойчивости	Состояние трещиноватости				
Расстояние между трещинами J_{A3} , мм (R_{mp10})	>2000	600–2000	200–600	60–200	<60
Шероховатость поверхности стенок трещин J_{A41} (R_{mp11})	Очень шероховатые	Слегка шероховатые, раскрытие <1 мм, слегка выветрелые стенки	Слегка шероховатые раскрытие <1 мм, сильно выветрелые стенки	Гладкие поверхности	Следы скольжения
Длина трещин J_{A42} , м (R_{mp12})	<1	1–3	3–10	10–20	>20
Раскрытие трещин J_{A43} , мм (R_{mp13})	Нет	<0,1	0,1–1,0	1–5	>5
Заполнитель трещин J_{A44} , мм (R_{mp14})	Нет	Твердый заполнитель <5	Твердый заполнитель >5	Мягкий заполнитель <5	Мягкий заполнитель >5
Измененность стенок трещин J_{A45} (R_{mp15})	Нет	Слегка выветрелые	Средне выветрелые	Сильно выветрелые	Раздробленные
Обводненность пород выработки J_{A5} (R_{mp16})	Полностью сухая	Влажная	Мокрая	Капез	Водоприток
Показатель количества систем трещин J_n (А–J – классы системы) (R_{mp17})	А-Монолитные породы или случайные трещины	В-1 система трещин; С-1 система трещин + 1 случайная трещина	Д-2 системы трещин; Е-2 системы трещин + 1 случайная трещина	F-3 системы трещин; G-3 системы трещин + 1 случайная трещина	H–≥4 систем трещин + случайные трещины; J-Сильно нарушенный массив
Показатель шероховатости поверхности стенок трещин J_r (А–Н – классы системы) (R_{mp18})	Контакт «порода-стенка», при сдвиге менее 100 мм				
	А-Прерывистые, разрывные поверхности стенок трещин; В-Шероховатые или нерегулярные, волнистые	С-Гладкие, волнистые	Д-Волнистые с плоскостями скольжения; Е-Шероховатые или нерегулярные, плоские	F-Гладкие, плоские	G-С полированными берегами, с плоскостями скольжения
	Отсутствие контакта «порода-стенка», толстое заполнение если имеется сдвиг				
	-	-	G-Зона содержащая глинистые минералы толщиной достаточной для предотвращения контакта «порода-стенка»; Н-Песчаная, гравелистая или дробленая зона достаточно толстая для предотвращения контакта «порода – стенка»	-	-

Параметр, показатель или фактор	Интервалы значений				
	0,8–1	0,6–0,8	0,4–0,6	0,2–0,4	0–0,2
Категория устойчивости	I	II	III	IV	V
Показатель изменности (выветрелости) трещин J_a (A–P – классы системы) ($R_{тр,г}$)	Контакт «порода-стенка» без разрушенного минерального заполнителя (φ_r – приблизительный)				
	А-Сомкнутые стенки трещин. Плотное залеченное, твердое не ослабляющееся, непроницаемое заполнение (например, кварц, эпидот, кальцит, ангидрит, цеолиты, халькопирит, сфаллерит, аплофилит, датолит, ломонтит (плотный), датолит); В-Неизменные стенки трещин, только пятно на поверхности (изменение цвета) ($\varphi_r = 25–35$ град.).	С-Слегка изменены стенки трещин, с легким налетом. Не ослабляющиеся минеральные покрытия (класс А), песчаные частицы, не содержащая глины дезинтегрированная порода и т.п. ($\varphi_r = 25–30$ град.); D-Илисто – или песчанно – глинистые покрытия, малая доля глины (не ослабляющаяся) (или минералов класса Е) мощностью до 3 мм ($\varphi_r = 20–25$ град.).	Е-Не ослабляющиеся или с низким трением глинистые минеральные покрытия, например, каолинит или слюда. Также хлорит, тальк, гипс, графит и т.п. и малое количество набухающего заполнителя. ($\varphi_r = 8–16$ град.)	-	-
	Контакт «порода-стенка», сдвиг до 100 мм (тонкое минеральное заполнение) (φ_r – приблизительный)				
	-	F-Включения песчаных частиц, не содержащая глины, дезинтегрированная порода и т.п. (класс А) ($\varphi_r = 25–30$ град.)	G-Сильно-размягчающийся переуплотненный не ослабляющийся минеральный заполнитель (непрерывный, но толщиной <5мм) ($\varphi_r = 16–24$ град.)	H-Размягчающийся заполнитель на основе глинистых минералов со средней или низкой степенью переуплотнения толщиной <5мм ($\varphi_r = 12–16$ град.)	J-Заполнитель из набухающей глины (непрерывный, но толщиной <5мм). Устойчивость массива зависит от процентного содержания частиц набухающей глины и доступа воды и т.п. ($\varphi_r = 6–12$ град.)

Параметр, показатель или фактор	Интервалы значений			
Диапазон индекса	0,8–1	0,6–0,8	0,4–0,6	0,2–0,4
Категория устойчивости	I	II	III	IV
	Отсутствие контакта «порода-стенка», сдвиг (толстое минеральное заполнение) (φ_r - приблизительный)			
		К-Зоны или прослойка дезинтегрированной или дробленной породы. Сильно переуплотненный заполнитель, например, глина (классы G, H, J для описания состояния глины). Толщина заполнителя >5 мм. ($\varphi_r=16-24$ град.)	Л-Зоны или прослойка дезинтегрированной, или дробленной породы. Средне и слабо переуплотненный заполнитель. Толщина заполнителя >5 мм. ($\varphi_r=12-16$ град.)	М-Зоны или прослойка дезинтегрированной, или дробленной породы. Средне и слабо переуплотненный заполнитель. Толщина заполнителя 5 мм. ($\varphi_r=6-12$ град.); N-Зоны или прослойки илисто, или песчанно – глинистой, мелкой глинистой фракции (не ослабляющиеся). Сильно переуплотненный заполнитель. Толщина заполнителя >5 мм. ($\varphi_r=12-16$ град.); O-Зоны или прослойки илисто, или песчанно – глинистой, мелкой глинистой фракции (не ослабляющиеся). Сильно переуплотненный заполнитель. Толщина заполнителя >5 мм. ($\varphi_r=6-12$ град.)
Показатель присутствия воды в трещинах J_w (A-F – классы системы) ($R_{тр20}$)	A-Сухая выработка или незначительный водоприток (влажные трещины), местный приток воды <5 л/мин (приблизительное давление воды 1 кг/см ²)	B- Средний водоприток или давление, эпизодическое вымывание заполнителя трещин (приблизительное давление воды 1,0–2,5 кг/см ²)	C-Большой водоприток или высокое давление в крепкой породе с трещинами без заполнения (приблизительное давление воды 2,5–10 кг/см ² ; D-Большой водоприток или значительное вымывание заполнения трещин (приблизительное давление воды 2,5–10 кг/см ²)	E-Сверх высокий водоприток или давление воды при взрывах, ослабевающие значения с течением времени (приблизительное давление воды >10 кг/см ²)
	F-Сверх высокий водоприток или давление воды, продолжающиеся без заметного ослабления (приблизительное давление воды >10 кг/см ²)			

Параметр, показатель или фактор	Интервалы значений				
Диапазон индекса	0,8–1	0,6–0,8	0,4–0,6	0,2–0,4	0–0,2
Категория устойчивости	I	II	III	IV	V
Геометрия выработки и ориентации трещин					
Влияние ориентации трещин на устойчивость выработки $J_B (R_{mt21})$	Очень благоприятное	Благоприятное	Среднее	Неблагоприятное	Очень неблагоприятное
	Простирание трещин вдоль оси выработки				
	Проходка выработки ведется по падению трещин с углами падения 45–90°	Проходка выработки ведется по падению трещин с углами падения 20–45°	Проходка выработки ведется против падения трещин с углами падения 45–90°	Проходка выработки ведется против падения трещин с углами падения 20–45°	-
	Простирание трещин параллельно оси выработки				
	-	-	-	Углы падения трещин 45–90°	Углы падения трещин 20–45°
	Независимо от простирания				
	-	-	-	Углы падения трещин 0–20°	-
k_a – коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости (R_{mt22})	Направление проходки выработки – по простиранию пород и основных систем трещин				
	Угол залегания пород α и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости, град.				
	60–90°	50–60°	40–50°	30–40°	0–30°
	k_a – коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости				
	<0,60	0,60–0,65	0,65–0,80	0,80–0,95	0,95–1
	Направление проходки выработки – вкрест простирания пород и основных систем трещин				
	Угол залегания пород α и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости, град.				
	60–90°	50–60°	40–50°	30–40°	0–30°
	k_a – коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости				
	<0,15	0,15–0,20	0,20–0,25	0,25–0,60	0,60–0,70
	Направление проходки выработки – под углом к простиранию пород и основных систем трещин				
	Угол залегания пород α и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости, град.				
	50–60°	40–50°; 60–90°	40–50°	30–40°	0–30°
	k_a – коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости				
	0,35–0,45	0,45–0,65; <0,35	0,65–0,80	0,80–0,85	-

Продолжение табл. 3

Параметр, показатель или фактор	Интервалы значений				
Диапазон индекса	0,8–1	0,6–0,8	0,4–0,6	0,2–0,4	0–0,2
Категория устойчивости	I	II	III	IV	V
k_θ – коэффициент направления смещения пород со стороны кровли и почвы выработки или со стороны боков выработки (R_{mt23})	Направление проходки выработки – по простиранию				
	Угол залегания пород α и основных плоскостей трещиноватости, град.				
	0–30	30–40	40–50	50–60	60–90
	k_θ – коэффициент направления смещения пород со стороны боков выработки				
	0,35–0,55	0,55–80	0,80–1,20	1,20–1,70	<1,70
	Направление проходки выработки – вкрест простирания пород				
	Угол залегания пород α и основных плоскостей трещиноватости, град.				
	-	0–30; 60–90	30–40; 40–50; 50–60	-	-
	-	0,55–0,80	0,80–0,95; 0,95; 0,80–0,95	-	-
	Направление проходки выработки проходки – под углом к простиранию пород				
	Угол залегания пород α и основных плоскостей трещиноватости, град.				
	-	0–30; 30–40	40–50	50–60; 60–90	-
	k_θ – коэффициент направления смещения пород со стороны боков выработки				
-	0,45–0,65; 0,65–0,90	0,90–1,05	1,05–1,10; 0,95–1,10	-	
Фактор, учитывающий пролет выработки, b (R_{mt24})	R_{mp24} (см. табл. 4)				
Фактор, учитывающий угол падения плоскости обнажения выработки, град. (R_{mt25})	80–90	60–80	40–60	20–40	0–20
Горное давление					
Фактор напряженного состояния массива $\sigma_{сж}/\sigma_{\max}$ (R_{mp26}) (при отсутствии величины максимального действующего напряжения – выбирается $\sigma_{\max} = \gamma H$ или $\sigma_{\max} = \lambda \gamma H$)	Средние обжимающие напряжения	Низкие обжимающие напряжения	Высокие напряжения	Высокие пластические деформации или удароопасные условия	Запредельные нагрузки
	5–20	20–200	2–5	1–2	<1
Фактор, учитывающий воздействия на выработку других выработок (R_{mt27})	R_{mt27} (см. табл. 5)				
Способ проведения выработки					
Фактор, учитывающий способ проведения выработки (R_{mt28})	R_{mt28} (см. табл. 6)				

Таблица 4. K_{VT24} – коэффициент влияния ширины пролета выработки R_{mt24}

Группа геометрия выработки и ориентации трещин											
R'_m	Ширина пролета выработки b (фактор R_{mt24}), м	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1–0,8	K_{VT24} – коэффициент влияния ширины пролета выработки R_{mt24} (формула 1)	1,0	1,0	1,0	1,0	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94
0,8–0,6		0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84
0,6–0,4		0,83	0,82	0,81	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76	0,74	0,71
0,4–0,2		0,7	0,67	0,64	0,61	0,58	0,55	0,52	0,49	0,46	0,43
0,2–0		0,4	0,35	0,30	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,01	0,01

Таблица 5. K_{VT27} – коэффициент влияния на выработку других выработок R_{mt27}

Группа горное давление					
Фактор R_{mt27} учитывающий воздействие на выработку других выработок	Одиночные выработки	Параллельные выработки, расстояние между которыми L , не меньше четырех размеров одной из выработок максимальной ширины b	Параллельные выработки, расстояние между которыми L , не меньше трех размеров одной из выработок максимальной ширины b	Для сопряжений с односторонним примыканием выработок	Для сложных сопряжений с примыканием выработок в виде двухстороннего заезда или пересекающихся выработок
K_{VT27} – коэффициент влияния на выработку других выработок R_{mt27} (формула 1)	1	1	0,95	0,85	0,8

Таблица 6. K_{VT28} – коэффициент влияния способа проходки выработки R_{mt28}

Группа способ проведения выработки			
Фактор R_{mt28} учитывающий способ проведения выработки	Механический способ проходки	Буровзрывной способ проведения выработки с применением контурного взрывания	Буровзрывной способ проведения выработки
K_{VT28} – коэффициент влияния способа проходки выработки R_{mt28} (формула 1)	1	0,95	0,9
K_{VT28} – коэффициент влияния способа проходки выработки R_{mt28} (формула 1) с учетом глубины формирования зоны наведенной трещиноватости во вмещающем массиве определяемой в натурных условиях или расчетами в программе ПРЗВВ (программа расчета зон влияния взрыва)	1	0,95	Глубина формирования зоны наведенной трещиноватости, м
			до 1 м
			0,95
			1-2
			более 2
			0,9
			0,8

3. ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ УСТОЙЧИВОСТИ, СМЕЩЕНИЙ СВОБОДНОГО ОТ КРЕПИ КОНТУРА И ВЫСОТЫ СВОДА ВОЗМОЖНОГО ОБРУШЕНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Время устойчивого стояния незакрепленной горной выработки с учетом ширины ее пролета рассчитывается по экспоненциальной зависимости:

$$T_{\text{уст.}} = a \cdot e^{-0,36B}, \text{ ч.} \quad (3)$$

где $T_{\text{уст.}}$ – время устойчивого стояния выработки без крепления, ч; a – коэффициент, зависящий от индекса устойчивости горной выработки R_m ; B – ширина пролета выработки, м.

$$a = 6 \cdot 10^{-5} e^{29,8R_m}. \quad (4)$$

Смещение незакрепленного контура подземной горной выработки с учетом ширины ее пролета рассчитывается для каждой категории устойчивости полиномиальными зависимостями:

$$\text{I категория } (R_m = 0,8 - 1): U = 0,1553B^2 - 0,2235B + 0,75, \text{ мм;} \quad (5.1)$$

$$\text{II категория } (R_m = 0,6 - 0,8): U = 1,0076B^2 - 6,0894B + 24,5, \text{ мм;} \quad (5.2)$$

$$\text{III категория } (R_m = 0,4 - 0,6): U = 1,1894B^2 - 5,69318B + 79,633, \text{ мм;} \quad (5.3)$$

$$\text{IV категория } (R_m = 0,2 - 0,4): U = 1,3636B^2 - 6,8667B + 155,27, \text{ мм;} \quad (5.4)$$

$$\text{V категория } (R_m = 0 - 0,2): U = 10,686B^2 - 34,6839B + 444,82, \text{ мм.} \quad (5.5)$$

В таблице 7 для индекса устойчивости в диапазоне $R_m = 0 - 1$ представлены смещения свободного от крепи контура подземной горной выработки и время ее устойчивого стояния без крепления в зависимости от ширины пролета выработки $B = 1 - 10$ м.

Высота свода возможного обрушения кровли выработки рассчитывается по формуле:

$$l_B = 0,34B/R_m, \text{ м.} \quad (6)$$

В таблице 8 представлены результаты расчетов свода возможного обрушения кровли выработки при различной ширине ее пролета и значениях индекса R_m .

Таблица 7. Смещение U свободного от крепи контура подземной горной выработки и время ее устойчивого стояния без крепления в зависимости от ширины пролета выработки $B = 1 - 10$ м для индекса устойчивости в диапазоне $R_m = 0 - 1$

Категории устойчивости выработки	R_m	Ширина выработки B , м										U , мм
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
I	1–0,8	0	1	2	3	4	5	6	8	11	15	0–15
II	0,8–0,6	16	17	18	19	21	24	30	35	48	70	16–70
III	0,6–0,4	71	73	76	78	82	87	93	103	120	145	71–145
IV	0,4–0,2	146	148	150	152	156	164	173	183	198	400	146–400
V	0,2–0	401	420	440	500	575	615	700	805	990	1200	401–1200
Категории устойчивости выработки	R_m	Ширина выработки B , м										$T_{\text{уст.}}$, ч
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
I	1,00	Не обрушается			$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	
	0,95	Не обрушается			$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	
	0,90	Не обрушается			$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	$>10^6$	728566,4	
	0,85	Не обрушается			$>10^6$	993345,7	693033,8	483513,3	337335,8	235351,2	164198,9	
	0,80	Не обрушается			320883,7	223873,0	156190,9	108970,7	76026,3	53041,7	37006,0	

Продолжение табл. 7

Категории устойчивости массива	R _m	Ширина выработки В, м										T _{уст.} , ч	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
II	0,80	Не обрушается			320883,7	223873,0	156190,9	108970,7	76026,3	53041,7	37006,0		
	0,75	Не обрушается			72318,4	50454,8	35201,1	24559,0	17134,2	11954,2	8340,1		
	0,70	47994,1	33484,4	23361,3	16298,6	11371,1	7933,4	5534,9	3861,6	2694,1	1879,6		
	0,65	10816,6	7546,5	5265,0	3673,3	2562,7	1788,0	1247,4	870,3	607,2	423,6		
	0,60	2437,8	1700,8	1186,6	827,9	577,6	403,0	281,1	196,1	136,8	95,5		
III	0,60	2437,8	1700,8	1186,6	827,9	577,6	403,0	281,1	196,1	136,8	95,5		
	0,55	549,4	383,3	267,4	186,6	130,2	90,8	63,4	44,2	30,8	21,5		
	0,50	123,8	86,4	60,3	42,0	29,3	20,5	14,3	10,0	7,0	Обрушение при проходке		
	0,45	27,9	19,5	13,6	9,5	6,6	4,6	3,2	Обрушение при проходке				
	0,40	6,3	4,4	3,1	2,1	Обрушение при проходке							
IV	0,40	6,3	4,4	3,1	2,1	Обрушение при проходке							
	0,35	1,4	1,0	Обрушение при проходке									
	0,30	Обрушение при проходке											
	0,25	Обрушение при проходке											
	0,20	Обрушение при проходке											
V	0,20	Обрушение при проходке											
	0,15	Обрушение при проходке											
	0,10	Обрушение при проходке											
	0,05	Обрушение при проходке											
	0,00	Обрушение при проходке											

Таблица 8. Высота свода возможного обрушения кровли выработки в зависимости от ширины ее пролета $B = 1-10$ м для индекса устойчивости в диапазоне $R_m = 0,2-0,8$

Ширина пролета выработки, м	Индекс R_m						
	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
	Высота свода возможного обрушения, м						
1	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,1	1,7
2	0,9	1,0	1,1	1,4	1,7	2,3	3,4
3	1,3	1,5	1,7	2,0	2,6	3,4	5,1
4	1,7	1,9	2,3	2,7	3,4	4,5	6,8
5	2,1	2,4	2,8	3,4	4,3	5,7	8,5
6	2,6	2,9	3,4	4,1	5,1	6,8	10,2
7	3,0	3,4	4,0	4,8	6,0	7,9	11,9
8	3,4	3,9	4,5	5,4	6,8	9,1	13,6
9	3,8	4,4	5,1	6,1	7,7	10,2	15,3
10	4,3	4,9	5,7	6,8	8,5	11,3	17,0

4. ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Для ранжирования выработок по вероятности рисков события используется показатель условной вероятности. Оценка условной вероятности (далее - вероятность) рисков события, связанного с разрушением горной выработки, выполняется на основе статистических подходов, учитывающих данные о времени устойчивого стояния аналогичных выработок.

Основные этапы расчета:

1. Определение времени устойчивого стояния ($T_{уст}$): это время (в часах), в течение которого выработка сохраняет устойчивость до момента возможного разрушения. Для горно-геологических и горнотехнических условий конкретного рудника или разрабатываемого участка месторождения эти данные могут варьироваться, но для предварительной оценки можно использовать данные представленные в таблице 7.

2. Перевод времени в частоту реализации риска (λ). Частота (интенсивность) λ события показывает, сколько раз в среднем по статистике для данного типа пород и в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях происходит разрушение за единицу прогнозного интервала и определяется по формулам:

$$\lambda = 1_{\text{событие}}/T_{\text{уст}}, 1_{\text{событие}}/\text{час (если } T_{\text{уст}} \text{ измеряется в часах) или} \quad (7.1)$$

$$\lambda = 1_{\text{событие}}/T_{\text{уст}}, 1_{\text{событие}}/\text{сут, (если } T_{\text{уст}} \text{ измеряется в сутках).} \quad (7.2)$$

Расчет вероятности разрушения горной выработки выполняется на прогнозном интервале от одного месяца и более для выработок, имеющих время стояния не менее 120 часов (5 суток).

3. Расчет вероятности разрушения горной выработки при наличии статистических данных (дискретных событий) выполняется **с использованием модели Пуассона**:

$$P = 1 - e^{-(\lambda)}, \% \quad (8)$$

где P – вероятность реализации риска на момент проходки горной выработки, %; λ – частота события ($1_{\text{событие}}/\text{час}$ или $1_{\text{событие}}/\text{сут}$); e – основание натурального логарифма (приблизительно равно 2,71828).

При задержке между проходкой и креплением выработки расчет ведется с использованием **метода Вейбулла**, учитывающего, что горный массив является

сложной структурой, в которой риск увеличивается со временем при ухудшении состояния системы:

$$P = 1 - (e^{-(\lambda T_i)})^2, \% \quad (9)$$

где T_i – время задержки крепления, час (сутки).

При оперативном креплении выработки без отставания, время устойчивого стояния принимается с учетом данных о надежности крепления с перерасчетом частоты и вероятности возможного события по формуле 8.

4. Расчет вероятности разрушения горной выработки на основании натурных данных систем мониторинга выполняется **методом Пуассона** по формуле 8. При этом, время устойчивого стояния (время до достижения предельного значения критериального показателя) определяется с учетом фактической скорости его изменения (деформация контура выработки или смещение ее крепи, трещинообразование, акустическая эмиссия и т.п.) методом регрессии.

5. Количественная оценка вероятности необходима для ранжирования выработок по степени опасности согласно ФЗН[№]116 (ст.11, п.4):

Экспертная оценка вероятности	Количественная характеристика вероятности, %
Крайне низкая	0-5
Низкая	5-10
Средняя	10-20
Существенная	20-40
Крайне существенная	более 40

6. Модель служит для экспресс-оценки вероятности риска, связанного с разрушением горных выработок. Модель не заменяет действующие инструкции и регламенты, связанные с креплением горных выработок, и может уточняться и дополняться профильными специалистами рудника в процессе тестирования и эксплуатации.

7. Экспертная оценка вероятности возможна коллегиальным решением специалистов для локальных выработок в условиях оперативного обеспечения безопасности горных работ при отсутствии статистических данных и данных систем мониторинга.

В данном случае целесообразно использовать повышающие коэффициенты для полученной вероятности с учетом типа и степени повреждений крепления:

Элементы крепи	Характер повреждений				
	Появление трещин и отслоений в массиве	Ослабление затяжки гаек анкером, «обыгрывание» прижимных пластин	Головки болтов сорваны или оголены, выдавлены прижимные пластины	Смещения анкеров, локальные вывалы между анкерами	Крупные смещения, оголения анкеров
Торкретбетон/сетка	Появление мелких площадных трещин с раскрытием до 3 мм	Отслоение торкретбетона от породы (звук пустот при простукивании)	Раскрытие трещин до 10 мм с обнажением сетки	Раскрытие трещин до 20 мм с вывалами фрагментов	Вывалы и заколы, разрывы сетки с провисанием
Рамная крепь	Появление зазоров между рамой и породой	Деформации элементов рамы (прогиб стоек, изгиб ригелей)	Трещины и разрывы в металле	Смещение рам (сдвиг по контуру, сползание стоек)	Разрушение рам (раздавливание вывалы в выработку)
Экспертная оценка вероятности	Низкая	Средняя	Существенная	Крайне существенная	Аварийная остановка без определения вероятности

8. Количественная оценка вероятности риска обеспечивает прогнозирование событий и позволяет перейти от абстрактной угрозы риска к управляемым параметрам обеспечения безопасности. Необходимо ежемесячно

составлять карты опасных зон с указанием условной вероятности риска в плановых направлениях ведения горных работ (ГР) и описанием мероприятий для управления рисками.

5. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ПО ИНДЕКСУ R_m

Система оценки устойчивости по индексу R_m включает шесть групп факторов:

- Физико-механические свойства горных пород;
- Качество породного массива;
- Состояние трещиноватости;
- Геометрия выработки и ориентации трещин;
- Горное давление;
- Способ проведения выработки.

Факторы внутри групп могут заменять друг друга. При выборе факторов предпочтение следует отдавать параметрам с максимальным весом в группе (табл. 2). Допускается использование альтернативных факторов с меньшим весом при условии сохранения общей структуры оценки.

Минимальный набор для **оценки устойчивости подземной горной выработки или ее участка по индексу R_m** в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях рудника включает 9 ключевых параметров:

1. R_{mp1} — прочность горной породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ в образце, МПа ($K_{vp1} = 0,12$);

2. R_{mp4} — показатель качества породного массива RQD, % ($K_{vp4} = 0,09$);

3. R_{mp11} — показатель шероховатости поверхности стенок трещин J_{A41} ($K_{vp11} = 0,02$);

4. R_{mp14} — показатель заполнителя трещин J_{A44} ($K_{vp14} = 0,02$);

5. R_{mp20} — показатель присутствия воды в трещинах J_w ($K_{vp20} = 0,02$) или R_{mp16} — показатель обводненности пород выработки J_{A5} ($K_{vp16} = 0,02$);

6. R_{mt21} — влияние ориентации трещин на устойчивость выработки J_B ($K_{vt21} = 0,03$) или $R_{mt22} - k_\alpha$ — коэффициент влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простирания пород или основных плоскостей трещиноватости ($K_{vt21} = 0,03$);

7. R_{mt24} — фактор, учитывающий ширину пролета выработки b через коэффициент K_{vt24} , м;

8. R_{mt27} — фактор, учитывающий воздействие на выработку других выработок через коэффициент K_{vt27} ;

9. R_{mt28} — фактор, учитывающий способ проведения выработки через коэффициент K_{vt28} .

Максимальный набор параметров, показателей или факторов при проведении **оценки** может состоять

из большего количества от 10 до 28 **параметров, показателей или факторов**.

При последующих оценках в сложных условиях (категории IV-V, глубокие выработки, удароопасные массивы) количество параметров может быть увеличено (табл. 7). Например, если **месторождение удароопасное или выработки глубокого залегания** необходимо добавить в расчеты фактор напряженного состояния массива $\sigma_{сж}/\sigma_{max}$ (R_{mt26}). Если, например, необходимо оценить конкретно **устойчивость горизонтального, вертикального или наклонного обнажения** горной выработки в расчеты добавить фактор учитывающий угол падения плоскости обнажения выработки (R_{mt25}).

Порядок определения индекса на основе количественных параметров выполняется в три этапа:

1. Найти диапазон в **таблице 3**, содержащий измененное значение;
2. Выбрать соответствующее значение R_{mpi}/R_{mti} ;
3. Для граничных значений применять консервативный подход.

Например, порядок определения по табл. 3 конкретного индекса R_{mpi} или R_{mti} влияющего на устойчивость горной выработки отдельного **количественного** параметра, показателя или фактора (пример): прочность горной породы на одноосное сжатие в образце $\sigma_{сж} = 78,5$ МПа; диапазон, в который попадает параметр $\sigma_{сж} = 50-100$ МПа, что соответствует диапазону $R_{mp1} = 0,4-0,6$; соответственно $\sigma_{сж} = 78,5$ МПа находится в диапазоне $R_{mp1} = 0,5-0,6$, но входит в диапазон $R_{mp1} = 0,5-0,55$, поэтому выбирается $R_{mp1} = 0,5$; если значение предела прочности горной породы на одноосное сжатие входит в диапазоны $\sigma_{сж} = 87,5-100$ МПа и $R_{mp1} = 0,55-0,6$, то выбирается $R_{mp1} = 0,6$; если $\sigma_{сж} = 87,5$ МПа (значение граничное), то принимая консервативных подход выбирается $R_{mp1} = 0,5$.

Порядок определения по табл. 3 конкретного индекса R_{mpi} или R_{mti} влияющего на устойчивость горной выработки отдельного **не количественного** параметра, показателя или фактора (пример): показатель шероховатости поверхности стенок трещин J_{A41} — **слегка шероховатые, раскрытие <1мм, слегка выветрелые стенки**; представленная характеристика

шероховатости поверхности стенок трещин входит диапазон показателя $R_{mp11} = 0,6-0,8$, выбирается среднее значение $R_{mp11} = 0,7$, если есть сомнение в результатах оценки принимая консервативный подход выбирается $R_{mp11} = 0,6$.

Пример округления значения R_m : если в результате расчетов $R_m = 0,511$, то округляется до $R_m = 0,51$; $R_m = 0,501$, то округляется до $R_m = 0,5$; $R_m = 0,517$, то округляется до $R_m = 0,52$ и т.п.

6. РАБОТА С КОМПЛЕКСНОЙ НОМОГРАММОЙ

Комплексная номограмма включает девять индивидуальных номограмм (1-9) (см. рисунок 1), в состав которых входят графики для визуализации рейтинговой системы оценки устойчивости горных выработок по индексу R_m . **Все девять номограмм взаимосвязаны между собой.** Проведя оценку и измерения и поставив точку на одном графике можно линейно перейти в любой другой график и номограмму. **Линейная связь**, маршруты по которым можно пройти по номограммам и графикам, **обозначены стрелками** $\leftarrow$, $\rightarrow$, $\uparrow$, $\downarrow$.

Номограмма 1 отображает рейтинговую систему оценки устойчивости горных выработок по индексу R_m , **I-V категории** устойчивости горной выработки с учетом ширины ее пролета ($B \times \infty$, м) или прямоугольного (квадратного) пролета обнажения выработки ($a \times L$, м) или гидравлического радиуса обнажения ($ГР$, м). Для каждой из пяти категорий представлены диапазоны смещений на контуре поперечного сечения выработки за весь срок ее эксплуатации без крепи (мм) (**I категория – 0–15 мм; II категория – 16–70 мм; III категория – 71–145 мм; IV категория – 146–400 мм и V категория – 401–1200 мм и более**). Величина смещения в каждом диапазоне зависит от ширины пролета выработки (табл. 7). На соседней **номограмме 6** (слева от **номограммы 1**) на **оси X** представлено логарифмическое распределение смещения на контуре поперечного сечения выработки за весь срок эксплуатации без крепи (U , мм).

Номограмма 2 отображает **систему Бартона** (индекс $Q = 0,001 \div 1000$), которая включает девять категорий качества породного массива и его устойчивости (категории A-И) с учетом отношения $B/ESR = 1 \div 10$ м, где B – максимальная ширина пролета горной выработки, м; ESR – коэффициент типа горной выработки. Номограмма не имеет традиционный классический бартонский вид, предназначенный для тоннелей, так как доработана под натурные условия действующих рудников России, Узбекистана и Киргизии для горизонтальных и наклонных горных выработок различного назначения шириной до 10 м. Категории в системе Бартона согласуются с его рекомендациями по креплению. На графике также можно определить расстояние между анкерами. **Номограмма 2** линейно **согласована с номограммой 1** и с другими номограммами; например, если выставить точку на графике **номограммы 2**,

то можно перейти линейно на график **номограммы 1** и определить индекс R_m и категорию устойчивости выработки через ширину ее пролета или гидравлический радиус.

Номограммы 3 и 4 отображают рейтинговую **классификацию Бенявского** (индекс $RMR = 0 \div 100$), которая включает: пять категорий устойчивости горных выработок (I-V) шириной до 10 м с учетом продолжительности их временной устойчивости (часы, дни, недели, месяцы, годы). На графиках **номограмм 3 и 4** выделена зона, где выработки не требуют крепления, выделены также зона, где требуется крепление, и зона, где сразу происходит обрушение при проходке. **На номограмме 4** кроме количественных параметров **индекса RMR**, представлены также параметры **индекса Q**. **Номограммы 3 и 4** не имеют традиционного классического вида, так как переработаны для горизонтальных и наклонных горных выработок различного назначения шириной до 10 м. **Номограммы 3 и 4** линейно согласованы между собой, а также **с номограммой 2 и 1** и **другими номограммами**, если выставить точку на графиках **номограмм 3 и 4**, то можно перейти линейно на график **номограммы 2** и далее на график **номограммы 1** и определить индекс R_m и категорию устойчивости выработки. Следует отметить, что крайние значения **индекса RMR 0 и 100** линейно не совпадают с крайними значениями **индекса Q 0,001 и 1000**, так как экспериментальные исследования в натурных условиях показали, что такой связи нет. Если определен **индекс Q**, и он не попадает линейно ни в одну из категорий **рейтинговой классификации RMR**, то эти значения относятся к крайним **индексам RMR 0 или 100**. То же самое касается и рейтинговой системы оценки устойчивости горных выработок по **индексу R_m** (**номограмма 1**).

Номограмма 5 отображает **систему Мэтьюза-Потвина** в диапазоне модифицированного показателя устойчивости массива $N = 0,01–100$. На графике с учетом рассчитанного модифицированного показателя устойчивости массива N и ширины пролета выработки ($B \times \infty$, м) или прямоугольного (квадратного) пролета обнажения выработки ($a \times L$, м), или гидравлического радиуса обнажения ($ГР$, м) определяются три зоны устойчивости: устойчивая, переходная и неустойчивая. **Номограмма 5** не имеет традиционного классического вида, так как разработана под натурные условия

действующих рудников России, Узбекистана и Киргизии для горизонтальных и наклонных горных выработок различного назначения шириной до 10 м. **Номограмма 5** также линейно согласована с другими номограммами.

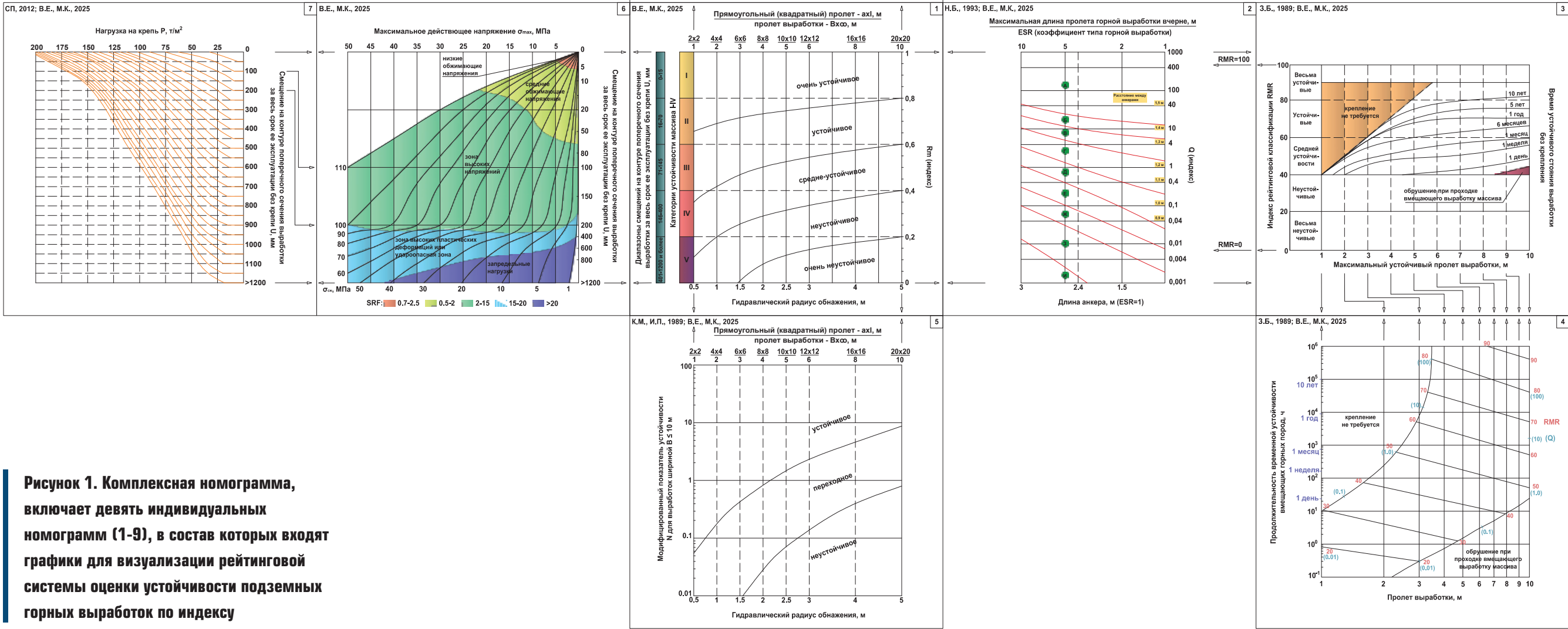
Номограмма 6 отображает график, на котором через максимальное действующее напряжение в массиве в диапазоне $\sigma_1 = 0 \div 50$ МПа и предел прочности горной породы на одноосное сжатие в диапазоне $\sigma_{сж} = 1 \div 110$ МПа можно определить типовое смещение (U_T) на контуре поперечного сечения выработки за весь срок ее эксплуатации без крепи в диапазоне $U_T = 0 \div 1200$ мм и более в логарифмическом представлении (типовое смещение $U_T = 0 \div 1200$ мм не учитывает техногенное влияние на устойчивость выработки параметров, показателей или факторов R_{mt}) и зону напряжений характерных для рассматриваемых условий: **низкие обжимающие напряжения; средние обжимающие напряжения; высокие напряжения; высокие пластические деформации или удароопасные условия; запредельные нагрузки**. Величины параметров, которые определяются в каждой зоне согласованы с фактором SRF (система Бартон): **низкие обжимающие напряжения SRF = 0,7÷2,5; средние обжимающие напряжения SRF = 0,5÷2; высокие напряжения SRF = 2÷15; высокие пластические деформации или удароопасные условия SRF = 15÷20 и запредельные нагрузки SRF ≥ 20. Наилучшие условия** напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающего массива при проходке и поддержании выработок регистрируются в условиях действия **средних обжимающих напряжений. Наихудшие условия** регистрируются в условиях действия **низких обжимающих напряжений и запредельных нагрузок. Номограмма 6** согласована также с другими номограммами.

Номограмма 7 отображает график, на котором через смещение (U) на контуре поперечного сечения выработки за весь срок ее эксплуатации без крепи в диапазоне $U = 0 \div 1200$ мм и более в линейном представлении можно определить **действующую нагрузку на крепь в диапазоне $P = 0 \div 200$ т/м²**. **Номограмма 7** также согласована с другими номограммами.

Через смещение и нагрузку на крепь можно рассчитывать параметры крепи и систем крепления выработок.

Номограмма 8 позволяет определить коэффициент запаса прочности (КЗП) потенциальных призм обрушения, расположенных в кровле выработки в условиях действия **гравитационных сил (для среднетрещиноватых плоских трещин)**, в диапазоне **КЗП = 0,1÷10** для ширины пролета выработки **$B = 1 \div 10$ м** и действия на призму обрушения **минимальных сжимающих напряжений** в диапазоне **0,05÷2 МПа**. Условия действия гравитационных сил — это **зона низких обжимающих напряжений**, которая выделена на **номограмме 6**. **Номограмма 8** также линейно согласована с другими номограммами.

Номограмма 9 отображает график, на котором можно определить **внеплановый выход породы (т/п.м.)** при проходке горной выработки (при **среднем объемном весе** горной породы в земной коре $\gamma_n = 2,6$ т/м³) через параметр увеличения площади проектного поперечного сечения горной выработки (м²) **на среднюю глубину 10, 20, 30 и 40 см зоны нарушенности пород** от действия **взрывных работ (ВР)** для **выработок прямоугольно-сводчатой (арочной) формы** поперечного сечения при условии **$B \approx H$** (ширина $B \approx$ высоте H выработки), но при **$B = 1 \div 2$ м — $H = 2$ м**. **Номограмма 9** также линейно согласована с другими номограммами.



7. ПРИМЕР ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ НА РУДНИКЕ

Оценивается устойчивость подготовительной выработки транспортного штрека: шириной 4,5 м и высотой 5 м. Горная порода - доломит бежевый. Глубина горных работ от земной поверхности $H=635$ м.

Данные геотехнической оценки:

1. Прочность горной породы на одноосное сжатие в образце $\sigma_{сж} = 78,5$ МПа; $R_{mp1} = 0,5$ (см. таблицу 3).

2. Показатель качества породного массива $RQD = 78\%$; $R_{mp4} = 0,6$ (см. таблицу 3).

3. Показатель шероховатости поверхности стенок трещин J_{A41} — слегка шероховатые, раскрытие <1 мм, слегка выветрелые стенки; $R_{mp11} = 0,7$ (см. таблицу 3).

4. Показатель заполнителя трещин J_{A44} — твердый заполнитель <5 мм; $R_{mp14} = 0,7$ (см. таблицу 3).

5. Показатель присутствия воды в трещинах J_w — незначительный водоприток (влажные трещины); $R_{mp20} = 0,9$ (см. таблицу 3).

6. Показатель влияния угла залегания пород и направления проходки выработки относительно простиранья пород или основных плоскостей трещиноватости. Направление проходки выработки — по простиранью пород и основных систем трещин, угол залегания пород $\alpha = 60^\circ$, коэффициент $k_\alpha = 0,65$; $R_{mt22} = 0,8$ (см. таблицу 3).

Рассчитываем базовый индекс устойчивости горной выработки R'_m по формуле 1.2:

$$R'_m = \frac{\sum_i R_{mp_i} + \sum_i R_{mt_i}}{n} =$$

$$= \frac{R_{mp1} + R_{mp4} + R_{mp11} + R_{mp14} + R_{mp20} + R_{mt22}}{n} =$$

$$= \frac{0,5 + 0,6 + 0,7 + 0,7 + 0,9 + 0,8}{6} = 0,7.$$

7. Фактор R_{mt24} , учитывает пролет выработки $b = 4,5$ м; коэффициент $K_{VT24} = 0,895$ (см. таблицу 4).

8. Фактор R_{mt27} учитывает воздействие на выработку других выработок — одиночная выработка; коэффициент $K_{VT27} = 1$ (см. таблицу 5).

9. Фактор R_{mt28} учитывает способ проведения выработки — буровзрывной способ проведения выработки; коэффициент $K_{VT28} = 0,9$ (см. таблицу 6).

10. Рассчитываем индекс R_m по формуле 1.1:

$$R_m = R'_m \cdot K_{VT24} \cdot K_{VT27} \cdot K_{VT28} = 0,7 \cdot 0,895 \cdot 1 \cdot 0,9 = 0,56.$$

Результаты оценки устойчивости подготовительной выработки транспортного штрека шириной 4,5 м и высотой 5 м: индекс $R_m = 0,56$; III категория устойчивости (см. таблицу 1); средне-устойчивое состояние (см. таблицу 1); распространены нарушения пород вглубь массива, регистрируется развитие зон неупругих деформаций и локальные обрушения в ослабленных зонах (см. таблицу 1, III категория устойчивости).

Прогнозное время устойчивого стояния подземной горной выработки без крепления с учетом ширины ее пролета (формула 3):

$$T_{уст.} = a \cdot e^{-0,36B} = 1189,8 \cdot 2,71828^{-0,36 \cdot 4,5} = 235,1 \text{ ч.}$$

$$a = 6 \cdot 10^{-5} e^{29,8R_m} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot 2,71828^{29,8 \cdot 0,56} = 1189,8$$

(формула 4).

где $T_{уст.}$ — время устойчивого стояния выработки без крепления, ч; a — коэффициент, который зависит от индекса устойчивости R_m ; B — ширина пролета выработки, м.

Смещение свободного от крепи контура подземной горной выработки с учетом ширины ее пролета определяется для III категории устойчивости (см. формулу 5.3):

$$U = 1,1894B^2 - 5,69318B + 79,633 = 78,1 \text{ мм.}$$

С учетом полученной величины максимального смещения $U = 78,1$ мм свободного от крепи контура подземной горной выработки с учетом ширины ее пролета прогнозно рекомендуется тип крепи согласно характеристикам представленных в таблице 9. Для рассматриваемого случая подходит комбинированная крепь: анкеры, набрызгбетон с металлической сеткой.

Время устойчивого стояния подземной горной выработки без крепления и смещение свободного от крепи ее контура также можно определять по таблице 7.

Высота свода возможного обрушения рассчитывается по формуле 6: $l_B = 2,7$ м (см. таблицу 8).

Оценки вероятности разрушения горной выработки:

Условная вероятность наступления рискованного события рассчитывается с использованием значения

Таблица 9. Рекомендуемый выбор типа крепи на основе ее предельных смещений

Тип крепи	Предельные смещения крепи, мм
Набрызгбетонная (торкретбетонная)	20
Анкерная (железобетонная ЖБШ, сталеполимерная СПА, фрикционная)	30–40
Комбинированная (анкеры и набрызгбетон)	50
Комбинированная: анкеры, набрызг-бетон с металлической сеткой	150
Деревянная рамная	150
Металлическая арочная податливая трехзвенная	300
Металлическая арочная податливая пятизвенная	500–700

частоты события. Имея данные о прогножном времени стояния 235,5 ч, переведем время в частоту.

Частота события (формула 7): $\lambda = 1_{\text{событие}}/T_{\text{уст.}} = 1/235,5 = 0,0042$ события в час или $\lambda = 0,0042 \cdot 24 = 0,10$ в сутки.

Вероятность реализации риска разрушения данной конкретной горной выработки в течение 1 суток (или 24 часов) при проходке без крепления по **формуле 8:**

$$P_{\text{сут}} = 1 - e^{-(\lambda)} = 1 - 2,71828^{-(0,10)} = 9,7 \%$$

Условная вероятность реализации риска разрушения горной выработки при отставании от крепления через 2 суток (48 часов) по **формуле 9:**

$$P_{\text{сут}} = 1 - (e^{-(0,10 \cdot 2)})^2 = 1 - (2,71828^{-(0,20)})^2 = 33,5 \%$$

Расчет показывает, что для данного типа выработка **необходимо оперативное крепление сразу после проходки**, т.к. даже небольшое время отставания значительно увеличивает вероятность рискованного события.

Для расчета остаточного риска после крепления горной выработки без данных мониторинга целесообразно **применять метод Вейбулла** в котором принять данные о времени стояния закрепленной выработки с учетом статистических натурных наблюдений или данных производителя крепи (систем крепления).

Предположим, что по данным производителя крепления, заявленное (паспортное) время службы системы крепления составляет 120 мес, т.е. закрепленные выработки при неизменных горно-геологических условиях **сохраняют устойчивость не более 10 лет.**

Тогда частота события на прогножном интервале в 1 месяц:

$$\lambda = 1_{\text{событие}}/120 = 0,0083 \text{ события в месяц.}$$

Частота события на прогножном интервале в 1 год:

$$\lambda = 1_{\text{событие}}/10 = 0,1 \text{ события в год.}$$

Соответственно **условная вероятность реализации рискованного события после крепления выработки** при соблюдении всех требований к технологии проведения крепления и неизменных горно-геологических условиях **в первый месяц:**

$$P_{\text{мес.}} = 1 - (e^{-0,0083})^2 = 1,6 \%$$

Через 6 месяцев:

$$P_{\text{6мес.}} = 1 - (e^{-0,0083 \cdot 6})^2 = 9,5 \%$$

Однако, учитывая сложные горно-геологические условия и дополнительные факторы, влияющие на крепление выработок, при наличии данных о изменении в системе целесообразно учитывать динамику критериального показателя, отражающего степень деформирования закрепленного массива **методом Пуассона.**

Предположим, что за критериальный показатель отражающий состояние массива принято расслоение кровли выработки: **за 6 месяцев наблюдений расслоение массива в кровле закрепленной выработки составило 8 мм, при критическом значении расслоения в 25 мм** (указывающем на наступление рискованного события).

Следовательно, **скорость расслоения** составляет: $8 \text{ мм}/6 \text{ мес} = 1,33 \text{ мм/мес.}$

Значение критериального показателя: $25 \text{ мм} - 8 \text{ мм} = 17 \text{ мм.}$

Прогнозное время до наступления рискованного события в данном случае при сохраняющейся динамике изменения критериального показателя составит:

$$17 \text{ мм}/1,33 \text{ мм/мес} = 12,7 \text{ мес (частота события } \lambda = 0,078 \text{ в месяц).}$$

Условная вероятность рискованного события на 6 месяцев составит:

$$P_{\text{мес}} = 1 - e^{-0,078} = 7,5 \%$$

Таким образом, уточненная по данным мониторинга через 6 месяцев фактическая условная

вероятность риска составляет 7,5% в сравнении с прогнозируемой 9,5%.

Пример работы с комплексной номограммой (рисунок 2):

1. С учетом проведенной оценки устойчивости подготовительной выработки транспортного штрека шириной пролета 4,5 м рассчитан индекс $R_m = 0,5$, III категория устойчивости (см. таблицу 1); средне-устойчивое состояние (см. таблицу 1); распространены нарушения пород вглубь массива, регистрируется развитие зон неупругих деформаций и локальные обрушения в ослабленных зонах (см. таблицу 1, III категория устойчивости).

§ С учетом полученных количественных параметров устойчивости на **номограмме 1** выставляем точку: $R_m = 0,5$, ширина пролета выработки $B \times \infty = 4,5$ м или прямоугольного (квадратного) пролета обнажения выработки 9×9 м или гидравлического радиуса обнажения $ГР = 2,25$ м.

§ Индекс $R_m = 0,5$ попадает в диапазон смещений 71–145 мм.

2. Проводим прямую горизонтальную линию от выставленной точки на **номограмме 1** вправо → на **номограмму 2** и получаем значение индекса $Q = 1$ для $B/ESR = 4,5/1,4 = 3,21$ м (B – ширина пролета выработки; ESR – коэффициент типа горной выработки, для подготовительных выработок $ESR = 1,4$). Категория Г устойчивости горной выработки по методу Бартон, что соответствует креплению анкерами и торкретбетоном (40–100 мм), расстояние между анкерами принимается 1,2 м.

§ **Формулы к расчету зависимости индекса Q от индекса R_m :**

$$R_m = 0,0721 \ln(Q) + 0,4952, \quad (8.1)$$

$$Q = 0,001 e^{13,864 R_m}. \quad (8.2)$$

3. Проводим прямую горизонтальную линию от точки выставленной на **номограмме 1** вправо → через **номограмму 2** на **номограмму 3** и получаем значение индекса $RMR = 43$ для ширины пролета выработки $B = 4,5$ м. Определяется по методу Бенявского III категория устойчивости выработки, что соответствует средне-устойчивому состоянию. По методу Бенявского требуется крепление выработки для $RMR = 43$: анкера длиной 4 м с шагом $1,5 \times 2$ м в кровле и боках выработки с сеткой и набрызгбетоном (торкретбетоном) 50–100 мм в кровле и 30 мм в боках выработки; длина проходки выработки на цикле 1,5–3 м; отставание постоянной крепи от забоя – 10 м.

4. Переходим от **номограммы 3** вниз ↓ по линиям на **номограмму 4** и определяем время устойчивого стояния выработки без крепления через значение индекса $RMR = 43$ или через значение индекса $Q = 1$. По методу Бенявского: $T_{уст.} = 60$ ч.

5. Проводим прямую вертикальную линию от выставленной точки на **номограмме 1** вниз ↓ на **номограмму 5** через ширину пролета выработки $B \times \infty = 4,5$ м или прямоугольный (квадратный) пролет обнажения выработки 9×9 м или гидравлический радиус обнажения выработки $ГР = 2,25$ м.

§ Рассчитываем фактор N по формуле Мэтьюза-Потвина:

$$N = Q \cdot A \cdot B \cdot C = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot A \cdot B \cdot C. \quad (9)$$

Для представленного примера:

$$N = \frac{78}{3} \cdot \frac{3}{1} \cdot 0,4 \cdot 0,8 \cdot 2 = 24,96,$$

где $RQD = 78\%$ (R_{mp4}) – показатель качества породного массива; $J_n = 3$ (R_{mp11}) – показатель количества систем трещин (1 система трещин + 1 случайная трещина); $J_r = 3$ (R_{mp18}) – показатель шероховатости поверхности стенок трещин (слегка шероховатые, раскрытие < 1 мм, слегка выветрелые стенки); $J_a = 2$ (R_{mp19}) – показатель измененности (выветрелости) трещин (твердый заполнитель < 5 мм); $A = 0,4$ (R_{mt26}) (см. график К. Метьюза) – коэффициент, учитывающий прочность и напряженное состояние горных пород (прочность на сжатие горной породы/максимальное действующее напряжение, $\sigma_{сж}/\sigma_{max} = 78,5 \text{ МПа}/16,5 \text{ МПа} = 4,76$); $B = 0,8$ (R_{mt22}) (см. график И. Потвина) – коэффициент, учитывающий ориентацию систем трещин в пространстве по отношению к обнажению ($\alpha = 60^\circ$); $C = 2$ (R_{mt25}) (см. график К. Метьюза) – коэффициент, учитывающий угол падения (наклон) поверхности обнажения, выбираем наиболее неустойчивое горизонтальное обнажение 0° .

§ По значению фактора $N = 24,96$ по **номограмме 5** определяется зона устойчивости горизонтального обнажения выработки и даются рекомендации по ее креплению и поддержанию. Рекомендации предоставляются разработчиками «Методических рекомендаций по оценке устойчивости подземных горных выработок в условиях разработки рудных месторождений».

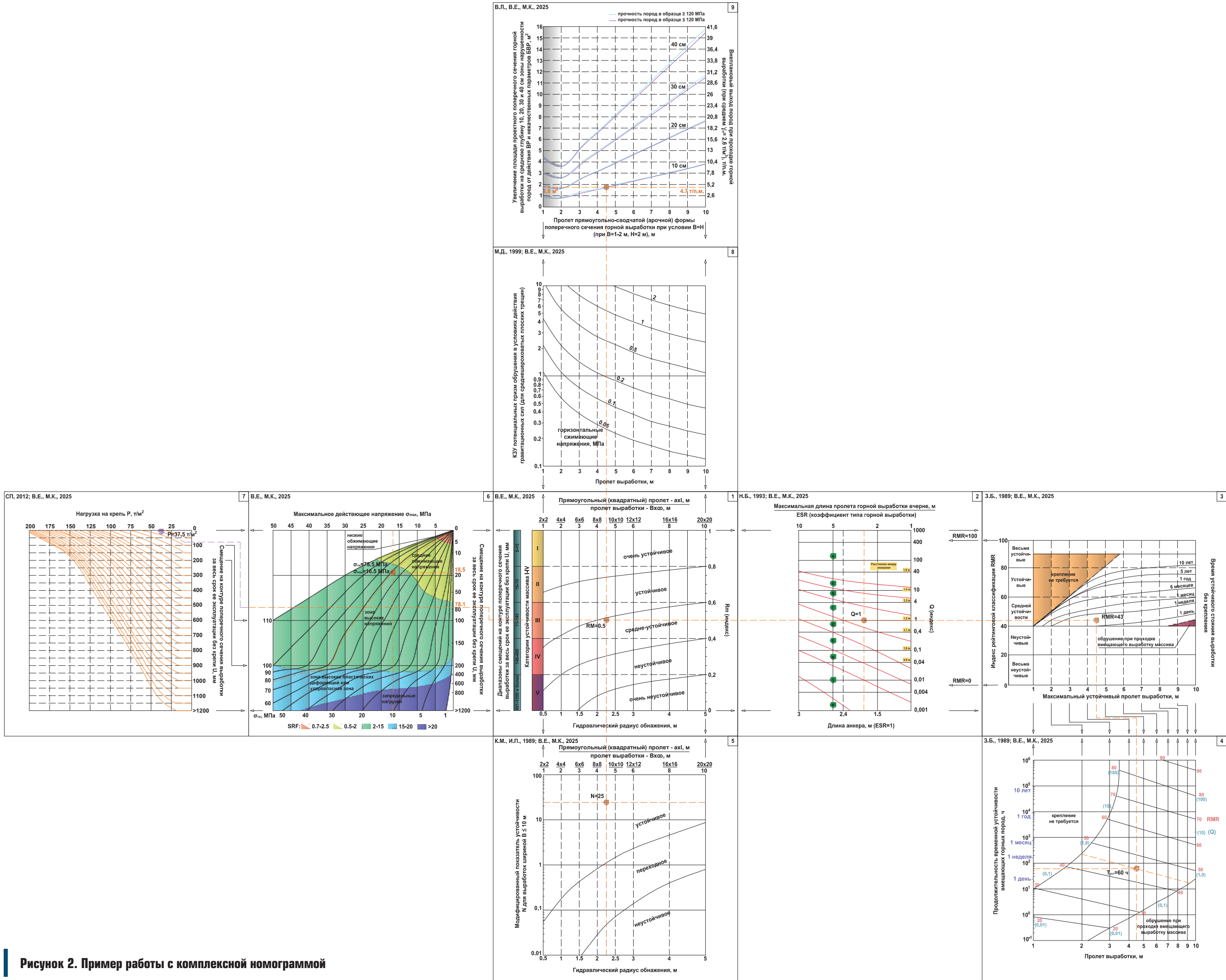
6. Проводим прямую горизонтальную линию от точки $R_m = 0,5$ выставленной на **номограмме 1** влево $\leftarrow$ до **номограммы 6** и пересекаем ее через рассчитанную величину смещения $U = 78,1$ мм (см. таблицу 7, формула 5.3) до **номограммы 7**. На **номограмме 6** **выставляем точку через** максимальное действующее напряжение в массиве $\sigma_{\max} = 16,5$ МПа и предел прочности горной породы на одноосное сжатие $\sigma_{сж} = 78,5$ МПа и определяем, что горная выработка находится **в условиях действия высоких напряжений (соответствие по методу Бартона SRF=2-15)**, а также определяем **типовое смещение (U_T) на контуре поперечного сечения выработки за весь срок ее эксплуатации без крепи $U_T = 18,5$ мм** (типовое смещение $U_T = 18,5$ мм не учитывает техногенное влияние на устойчивость выработки параметров, показателей или факторов R_{mt_i}).

7. Через рассчитанную величину смещения $U = 78,1$ мм (см. таблицу 7) на **номограмме 7** определяем **действующую нагрузку на крепь в $P = 37,5$ т/м².**

8. Номограмма 8 в данном примере не используется так как массив горных пород находится **в условиях действия высоких сжимающих напряжений (соответствие по методу Бартона SRF = 2–15).**

9. При проведении буровзрывных работ (БВР) регистрируется лишний объем вывозимой горной породы на каждый 1 пог. м выработки шириной 4,5 м при увеличении ее проектного сечения, в среднем по периметру на глубину до 0,1 м от проектного контура.

Проводим прямую вертикальную линию от точки $R_m = 0,5$ выставленной на **номограмме 1** вверх $\uparrow$ до **номограммы 9**. Определяем лишний объем вывозимой горной породы **на каждый 1 пог. м $\sim 4,7$ т. На каждый цикл проходки горной выработки 3 м, это $\sim 14,1$ т.**



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ*

1. Еременко Виталий Андреевич, доктор технических наук, профессор РАН, директор научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии», профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Горного института НИТУ МИСИС, +7-926-279-39-08, prof.eremenko@gmail.com;

2. Федянин Алексей Сергеевич, PhD, доцент, директор Центра мониторинга технико-производственных и экологических рисков ПАО «ГМК «Норильский никель», +7-914-252-78-72, uz_platinum@mail.ru;

3. Лушников Вадим Николаевич, директор департамента геотехники и гидрогеологии ООО «УК Полюс», +7-916-683-63-23, LushnikovVN@polyus.com;

4. Косырева Марина Александровна, кандидат технических наук, инженер научного проекта научно-исследовательского центра «Прикладная геомеханика и конвергентные горные технологии» Горного института НИТУ МИСИС, marinkosyreva@gmail.com, +7-910-610-69-43.

**В 2024 году подана заявка на получение патента Российской Федерации на изобретение «Способа оценки устойчивости подземных горных выработок в условиях разработки рудных месторождений»*