

# Оценка опасности газодинамических явлений на основе анализа натуральных и лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн во вмещающих горных породах кимберлитовой трубки «Интернациональная»

Н.Е. Мороз<sup>1</sup>✉, С.Г. Гендлер<sup>1</sup>, К.В. Романевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ moroz.nikita.1998@mail.ru

**Резюме:** В статье рассматривается способ районирования толщи горных пород по физико-механическим свойствам при помощи скоростей распространения упругих волн, получаемых в лабораторных условиях при исследовании керновых образцов и в натуральных условиях при обработке сейсмограмм технологических взрывов, проводимых при проходке горных выработок на руднике «Интернациональный». Скорости распространения упругих продольных и поперечных волн в образцах горных пород определены при помощи прибора «Ультразвук». Предел прочности скальных грунтов при одноосном сжатии определен при помощи испытательного пресса на цилиндрических образцах с отношением высоты к диаметру, приблизительно равным 2,0, что при диаметре образцов  $30 \pm 2$  мм соответствовало их высоте, равной  $60 \pm 2$  мм. Результаты лабораторных исследований свидетельствуют о том, что значения скорости распространения продольных волн коррелируют со значениями прочности керновых образцов на одноосное сжатие. Комплексирование лабораторных и натуральных исследований носит перспективный характер для использования в дальнейших прогнозах и расчетах параметров профилактических мероприятий по предотвращению газодинамических явлений. Полученные результаты свидетельствуют, что для дальнейших прогнозных расчётов значение предела прочности на одноосное сжатие массива битуминозных доломитовых пород следует принимать равным 60 МПа.

**Ключевые слова:** газодинамические проявления, выбросы породы, выбросы газа, упругие волны, предел прочности на одноосное сжатие

**Для цитирования:** Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Романевич К.В. Оценка опасности газодинамических явлений на основе анализа натуральных и лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн во вмещающих горных породах кимберлитовой трубки «Интернациональная». *Горная промышленность*. 2025;(2):65–72. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-65-72>

## Assessment of the hazards caused by gas dynamic phenomena based on analyzing in-situ and laboratory studies of elastic wave propagation velocities in the host rocks of the Internatsionalnaya kimberlite pipe

N.E. Moroz<sup>1</sup>✉, S.G. Gendler<sup>1</sup>, K.V. Romanevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> VNIMI JSC, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ moroz.nikita.1998@mail.ru

**Abstract:** The article discusses a method of zoning rock masses by their physical and mechanical properties using the velocities of elastic waves propagation obtained in laboratory conditions when studying core samples and in situ conditions when processing seismic datasets of process blasts performed in driving mine workings at the Internatsionalnaya mine. The velocities of elastic primary and secondary waves propagation in rock samples were determined using the “Ultrazvuk” instrument. The ultimate strength of rocks under uniaxial compression was determined by means of a test press using cylindrical specimens with the height-to-diameter ratio of approximately 2:1, which corresponded to the height of  $60 \pm 2$  mm with the diameter

of the specimens being  $30 \pm 2$  mm. The results of laboratory tests indicate that the values of primary wave propagation velocity correlate with the values of uniaxial compression strength of the core samples. The combination of laboratory and field tests is promising for using in further forecasts and calculations of parameters for measures to prevent gas-dynamic phenomena. The obtained results indicate that the value of uniaxial compressive strength of bituminous dolomite rock mass should be taken as 60 MPa for further forecast calculations.

**Keywords:** gas-dynamic events, rock outbursts, gas emissions, elastic waves, uniaxial compression strength

**For citation:** Moroz N.E., Gendler S.G., Romanevich K.V. Assessment of the hazards caused by gas dynamic phenomena based on analyzing in-situ and laboratory studies of elastic wave propagation velocities in the host rocks of the Internatsionalnaya kimberlite pipe. *Russian Mining Industry*. 2025;(2):65–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-2-65-72>

**Введение**

Развитие горнодобывающей промышленности связано с освоением месторождений полезных ископаемых на больших глубинах, характеризующихся сложными горно-геологическими условиями. С увеличением глубины разработки, как правило, усложняется управление горным давлением, о чём свидетельствуют данные Ростехнадзора, научных организаций и производственных предприятий [1–3].

Глубокие горизонты рудника «Интернациональный» в этом смысле также не являются исключением, где проявление горного давления в виде газодинамических явлений (ГДЯ) осложняют проходку горных выработок буровзрывным способом [4–6] по доломитам, вмещающим кимберлитовую трубку [7; 8].

Повышение безопасности горных работ и увеличение их эффективности затруднено без точного прогноза ГДЯ, который должен опираться на достоверные данные о физико-механических свойствах выбросоопасных участков. На основе этих данных могут быть созданы цифровые геомеханические двойники горного массива, использование которых даст возможность с высокой точностью оценивать динамику ГДЯ при буровзрывной проходке выработок.

Специалисты отмечают положительные результаты внедрения цифровых геомеханических двойников для прогнозирования состояния массивов горных пород на месторождениях со сложными горно-геологическими условиями [9–12]. Сложности, связанные с получением для прогнозных моделей надежных исходных данных, решаются при помощи современных аппаратных комплексов и инструментариев [13–15].

Актуальным в данных условиях становится внедрение метода пространственной оценки состояния массива горных пород путем сопоставления прочностных и динамических свойств горных пород с привлечением сейсмического мониторинга и лабораторных испытаний керновых образцов. Положительный опыт использования зависимостей динамических и прочностных характеристик отмечается в решении геомеханических проблем на соляных месторождениях Верхнекамья [16; 17].

**Лабораторные определения скоростей распространения продольных волн и предела прочности на одноосное сжатие**

Скорости распространения упругих продольных и поперечных волн в образцах горных пород определены при помощи прибора «Ультразвук» в соответствии с ГОСТ 21153.7–75 «Горные породы. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн».

Предел прочности скальных грунтов при одноосном сжатии определен при помощи испытательного пресса в соответствии с ГОСТ 21153.2–84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжа-

тии» на цилиндрических образцах с отношением высоты  $h$  к диаметру, приблизительно равным 2,0, что при диаметре образцов  $30 \pm 2$  мм соответствовало их высоте, равной  $60 \pm 2$  мм. Результаты лабораторных исследований приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
Результаты лабораторных исследований керновых образцов доломитов Толбачанской свиты в границах эксплуатационного блока №11 (глубина опробования 1350 м)

**Table 1**  
Results of laboratory testing of dolomite core samples from the Tolbachanskaya Formation within the boundaries of Production Block No. 11 (the sampling depth of 1350 m)

№ пробы	Скорость распространения продольных волн $V_p$ , м/с	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа
1	6029,04	110,00
2	5934,89	129,00
3	6018,93	112,00
4	4618,85	54,50
5	6079,92	76,50
6	5584,42	60,20

Результаты лабораторных исследований свидетельствуют о том, что значения скорости распространения продольных волн коррелируют со значениями прочности керновых образцов на одноосное сжатие.

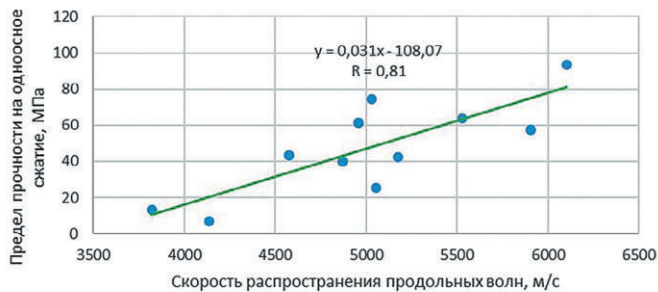
Так, керновый образец из пробы №4, через который продольная волна распространялась со скоростью порядка 4600 м/с разрушился при достижении нагрузки, соответствующей прочности 54,5 МПа. В свою очередь, в образцах с прочностью от 76,5 до 129 МПа продольная волна распространялась со средней скоростью порядка 6000 м/с.

Также можно отметить положительную схожимость (рис. 1) при сопоставлении корреляционных зависимостей физико-механических свойств доломитов, вмещающих трубку «Интернациональная» в границах эксплуатационного блока №10, полученных при ранее проведенных испытаниях [7].

**Натурные определения скоростей распространения продольных волн при технологических взрывах по данным шахтной сейсмостанции**

Изучению физико-механических свойств геологической среды, её напряженно-деформированного состояния при помощи экспериментальных взрывов в подземных горных выработках посвящен ряд работ [18–20].

В работе [21] представлено решение задачи по определению скоростных характеристик вмещающего массива для верхней и нижней областей подземного рудника



**Рис. 1**  
Корреляционная зависимость результатов испытаний прочности на одноосное сжатие и скорости прохождения продольной волны через керновые образцы доломитов Толбачанской свиты в границах эксплуатационного блока №10 (глубина от 1090 до 1190 м)  
Источник: [7]

**Fig. 1**  
Correlation dependence between the results of uniaxial compression tests and the primary wave velocity through the core samples of the Tolbachanskaya Formation dolomites within the boundaries of Production Block No. 10 (the sampling depth from 1090 m to 1190 m)  
Source: [7]

«Интернациональный». Исходными данными здесь является информация, которая в непрерывном режиме поступает с установленной на руднике системы сейсмического мониторинга породного массива и прогноза динамических явлений (система GITS, производства ВНИМИ) [22–24]. Полученные в данной работе результаты характеризуются высоким разбросом значений, поскольку для определения скоростей на парах сейсмопавильонов использовались в качестве источников все технологические взрывы (ТВ), произведенные в верхней или нижней части рудника.

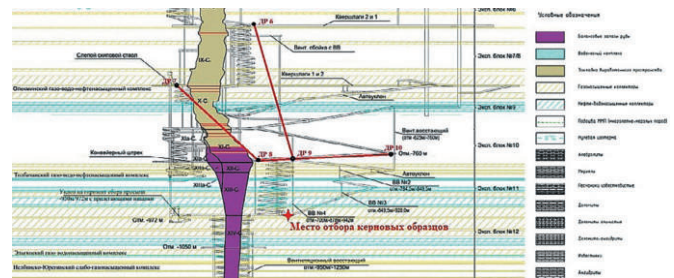
Такой подход не учитывает того факта, что часть источников находится в стороне от линии между рассматриваемыми сейсмопавильонами, что значительно исказило точность определения скоростных характеристик массива. Для более точного определения скоростных характеристик массива в настоящей работе вводится телесный угол, который ограничивает область, в пределах которой располагаются технологические взрывы, являющиеся источниками сейсмических колебаний [25]. Границу телесного угла образует коническая поверхность. Для телесного угла при вершине прямого кругового конуса, который описывает конус с углом  $\theta$  между его осью и границей:

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos\theta),$$

где  $\Omega$  – телесный угол (в стерadians);  $\theta$  – половина угла раскрытия конуса (в радианах).

В.С. Ломакиным эмпирически определено, что для корректного расчета скорости между парами сейсмопавильонов необходимо, чтобы источник сейсмических колебаний находился в конусе с вершиной в одном из сейсмопавильонов и углом раскрытия  $9^\circ$  [26]. Телесный угол для конуса с углом раскрытия  $9^\circ$  составляет приблизительно 0,0785 стерadians, что описывает небольшую часть пространства вокруг точки. Таким образом, приемлемыми источниками волн могут служить только технологические взрывы, находящиеся в этом пространстве. Такой подход позволяет исключить из расчетов источники, находящиеся вне прямой линии между сейсмопавильонами, тем самым значительно повысив точность получаемых значений скорости продольных волн на парах сейсмопавильонов.

Особый интерес представляют скоростные характери-



**Рис. 2**  
Горно-геологический разрез кимберлитовой трубки «Интернациональная» с указанием расположения датчиков регионального прогноза GITS

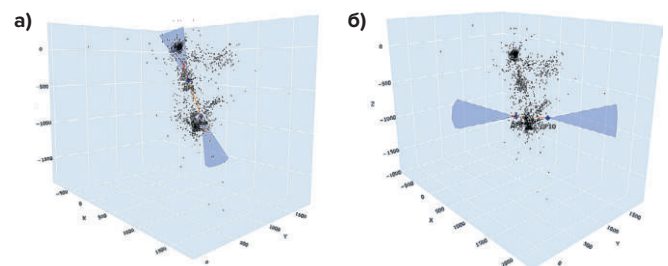
**Fig. 2**  
Mining and geological profile of the Internatsionalnaya kimberlite pipe showing the location of the GITS regional forecast sensors

стики массива горных пород в границах Толбачанской свиты на горизонтах эксплуатационных блоков №10, 11 и глубже (рис. 2), где складываются опасные горно-геологические условия по фактору газодинамических явлений.

Для определения скоростных характеристик между парами сейсмопавильонов определены приемлемые источники. Сначала находились направления от одного сейсмопавильона до другого. Этот вектор использовался для определения оси конуса и направления распространения сейсмических колебаний между сейсмопавильонами, затем определялись параметры для конусов с вершинами в точках с координатами этих сейсмопавильонов.

Для всех имеющихся технологических взрывов определялось, попадают ли эти сейсмические источники в пределы конусов с углом раскрытия  $9^\circ$ . Источники, попадающие в пространство конусов, визуализировались в 3D-пространстве красным цветом, находящиеся вне конусов – черным. Для визуализации данных и проверки попадания источников сейсмических колебаний в заданные конусы была использована библиотека Plotly в Python. На рис. 3 показаны такие построения для пар сейсмопавильонов.

Таким образом, отобрано 16 технологических взрывов, приемлемых в качестве источников для пар сейсмопавильонов ДР6-ДР9, ДР7-ДР8, ДР8-ДР9, ДР8-ДР10, ДР9-ДР10. Для каждого из этих ТВ в программном обеспечении GITS2 [27] определялось время первых вступлений по сейсмограммам на соответствующих датчиках. Анализ данных проводился в модуле просмотра и анализа сейсмических событий ПО GITS2 [28; 29].



**Рис. 3**  
Выбор технологических взрывов, приемлемых в качестве источников для: а – пар сейсмопавильонов ДР6 и ДР9; б – для пар сейсмопавильонов ДР8 и ДР10

**Fig. 3**  
Selection of the technological blasts acceptable as sources for: а – pairs of seismic stations DR6 and DR9, б – for pairs of seismic stations DR8 and DR10

**Таблица 2**  
Результаты расчета скоростей продольных волн

**Table 2**  
Results of calculating the primary wave velocities

№	Дата ТВ	X	Y	Z	Модуль $dT$ , с	R между СП, м	V прямой расчет, м/с	V с учетом угла, м/с	Ошибка, м/с
<b>Сейсмопавильоны ДР6 – ДР9</b>									
1	06.11.2022 4:12	913	669	-223	0,0800	427,89	5348,60	5342,54	-6,06
2	06.11.2022 19:15	884	686	-244	0,0815		5250,16	5237,73	-12,43
3	14.01.2023 7:07	1090	906	-1060	0,0810		5282,56	5271,47	-11,10
4	25.04.2023 23:01	1040	894	-928	0,0840		5093,90	5091,17	-2,73
5	27.04.2023 6:56	1035	865	-918	0,0835		5124,40	5117,21	-7,20
6	30.07.2023 15:02	1033	889	-959	0,0840		5093,90	5090,55	-3,36
7	02.04.2024 3:41	914	685	-270	0,0820		5218,14	5216,45	-1,69
<b>Сейсмопавильоны ДР7 – ДР8</b>									
8	04.07.2022 14:46	393	1029	174	0,043	269,16	6259,60	6247,95	-11,65
9	05.07.2022 7:20	960	639	-979	0,0405		6645,99	6603,95	-42,04
<b>Сейсмопавильоны ДР8 – ДР9</b>									
10	16.12.2022 18:29	763	603	-799	0,043	228,00	5302,37	5286,21	-16,16
<b>Сейсмопавильоны ДР8 – ДР10</b>									
11	16.12.2022 17:28	781	669	-787	0,09	467,16	5190,62	5174,00	-16,62
<b>Сейсмопавильоны ДР9 – ДР10</b>									
12	09.10.2022 15:04	898	791	-796	0,0455	251,55	5528,62	5515,16	-13,46
13	03.11.2022 23:12	898	825	-801	0,0445		5652,86	5626,00	-26,86
14	08.11.2022 23:04	918	807	-798	0,045		5590,05	5583,96	-6,09
15	06.01.2023 15:07	912	806	-788	0,0465		5409,73	5407,43	-2,30
16	09.01.2023 15:05	911	813	-802	0,0435		5782,81	5773,63	-9,18

По разнице времени первых вступлений на интересующих парах сейсмопавильонов определялась скорость продольных волн на соответствующих интервалах с учетом известного расстояния между сейсмопавильонами по прямой. Также для каждого ТВ определялась скорость с учетом угла и расстояний между ТВ и каждым сейсмопавильоном из пары. По двум данным расчетам считалась (вычислялась) ошибка определения скорости. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Для векторов в пространстве рудника ДР6-ДР9, ДР8-ДР9, ДР8-ДР10 и ДР9-ДР10 показано, что влияние угла и расстояний от ТВ до каждого сейсмопавильона из пары незначительно – максимальная ошибка при определении скорости с учетом угла и без него составляет менее одного процента.

Датчики ДР8, ДР9, ДР10 располагаются на глубине 1150–1190 м, с которой ранее были отобраны и испытаны образцы. Так, натурно определенная скорость продольной волны между парами данных датчиков изменяется в диапазоне от 5174 до 5773 м/с со средним значением 5480 м/с (см. табл. 2, строки №10–16). В свою очередь, лабораторно полученные скорости прохождения продольных волн в керновых образцах изменяются в диапазоне от 3822 до 6102 м/с со средним значением 5014 м/с (см. рис. 1).

Полученную 10%-ную разницу между натурно и лабораторно определенными скоростями возможно оценить как положительно, говоря о крупномасштабном прогнозе свойств геологической среды, так и отрицательно, имея в виду некоторые потери данных о свойствах локальных участков со скоростями менее 4500 или более 6000 м/с.

Тем не менее полученные и натурным, и лабораторным способом средние скорости распространения продоль-

ных волн в границах эксплуатационного блока №10 свидетельствуют о прочности массива горных пород около 60 МПа. Результаты лабораторных испытаний керновых образцов эксплуатационного блока №11 (см. табл. 1) также подтверждают соответствие прочности 60 МПа скорости распространения продольной волны, равной 5500 м/с, что является крайне полезным для дальнейших мероприятий по борьбе с газодинамическими явлениями.

**Область применения полученных результатов при прогнозе газодинамических явлений**

Полученные сведения об изменении скорости продольной волны в массиве выбороопасных горных пород перспективны для использования в расчетах прогноза ГДЯ, поскольку отражают изменения прочностных свойств массива горных пород, вариативность которых весьма значительно влияет на результаты прогнозных расчетов.

В настоящее время на руднике «Интернациональный» проводятся опытные работы по внедрению метода прогноза динамических явлений с применением расчетной методики, учитывающей как структурную неоднородность массива, так и предел прочности на сжатие в образце [30].

Для качественной и количественной оценки структурной нарушенности (трещиноватости) горных пород использован нормативный геомеханический показатель RQD (Rock Quality Designation), широко применяющийся как в России [31; 32], так и за рубежом [33–35]. Формирование потенциально опасных по ДЯ участков массива происходит при уменьшении ширины грузонесущего участка с RQD, находящемся в диапазоне от 50 до 100%, в направлении ослабленной зоны с RQD, равным 0–50%, до предельного состояния (рис. 4).

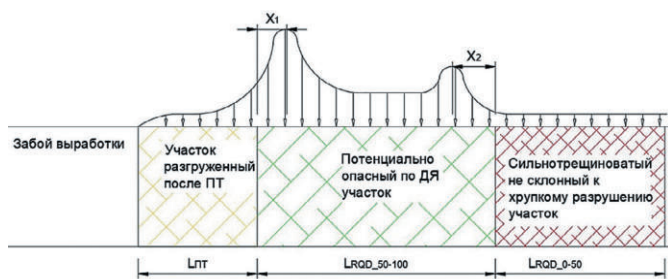


Рис. 4  
Расчетная схема прогноза участков массива, потенциально опасных по газодинамическим явлениям, с применением данных о трещиноватости горных пород (RQD)

Fig. 4  
A calculation model to predict rock mass zones potentially hazardous for the gas-dynamic phenomena using rock quality designation (RQD) data

Расчёт состояния грузонесущего участка производится согласно [36]:

$$L_{пр} = x_1 + x_2 \rightarrow K_{ДЯ} = \frac{1,25L_{пр}}{LRQD_{(50-100)}} \rightarrow K_{ДЯ} > 1 - \text{опасное состояние.}$$

Опорное давление со стороны ПТ

$$x_2 = \frac{a_2}{\left(\frac{\sigma_{сж} a_2}{\gamma H h}\right)^{\frac{2}{3}}}$$

$$a_2 = LRQD_{0-50}$$

Опорное давление со стороны RQD<sub>0-50</sub>

$$a_2 = 14 \text{ м};$$

$$x_2 = \frac{14 \text{ м}}{\left(\frac{91 \text{ МПа} \cdot 14 \text{ м}}{36 \text{ МПа} \cdot 4,5 \text{ м}}\right)^{\frac{2}{3}}} = 3,5 \text{ м.}$$

где  $B_{выр}$  – ширина выработки, м;  $L_{пт}$  – длина скважин передового торпедирования, м;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на одноосное сжатие, МПа;  $h$  – высота выработки, м;  $x_1$  и  $x_2$  – расстояние до максимума опорного давления со стороны разгруженного участка и со стороны природно-сильнотрещиноватого участка, м.

Рассмотрим пример расчета по данным скважины ЛП 19.1 СС, интервалы которой закрашены красным цветом для значений RQD менее 50% (рис. 5). При условии, что первый 7-метровый цикл передового торпедирования начался в районе устья скважины, в момент нахождения забоя выработки на интервале 14 м (перед ПТЗ) возникает потенциально опасная по ДЯ ситуация.

Допускаем, что одиночные 2-метровые интервалы с RQD более 50%, находящиеся внутри группы интервалов RQD

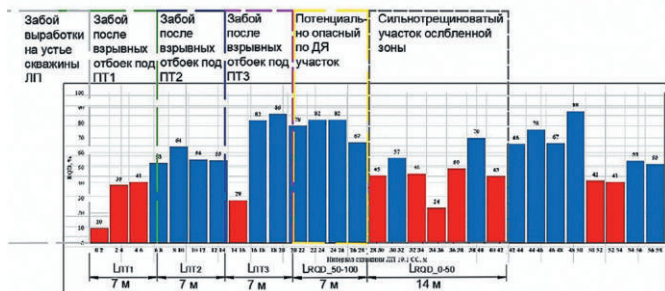


Рис. 5  
Расчетная схема по трассе скважины ЛП 19.1 СС (визуализация проходки выработки, вид сбоку)

Fig. 5  
A calculation model along borehole LP 19.1 SS path (visualization of the excavation progress, side view)

менее 50%, продавливаются вышележащей толщей пород и также перестают нести нагрузку.

Расчёт КДЯ по трассе скважины ЛП 19.1 СС:

$$L_{пр} = 3,4 + 3,5 = 6,9 \text{ м} \rightarrow K_{ДЯ} = \frac{1,25 \cdot 6,9}{7} = 1,2 \rightarrow K_{ДЯ} > 1 - \text{опасно.}$$

Опорное давление со стороны ПТ

$$a_1 = 6 + 7 = 13 \text{ м};$$

$$x_1 = \frac{13 \text{ м}}{\left(\frac{91 \text{ МПа} \cdot 13 \text{ м}}{36 \text{ МПа} \cdot 4,5 \text{ м}}\right)^{\frac{2}{3}}} = 3,4 \text{ м};$$

Опорное давление со стороны RQD<sub>0-50</sub>

$$a_2 = 14 \text{ м};$$

$$x_2 = \frac{14 \text{ м}}{\left(\frac{91 \text{ МПа} \cdot 14 \text{ м}}{36 \text{ МПа} \cdot 4,5 \text{ м}}\right)^{\frac{2}{3}}} = 3,5 \text{ м.}$$

Результаты расчета показывают, что потенциально опасная ситуация по ГДЯ формируется при наличии впереди забоя упругих участков пород  $L_{(RQD_{(50-100)})}$  длиной менее 8,5 м. Данные участки необходимо приводить в неопасное состояние путем увеличения длины скважин торпедирования.

В результате расчётов для различных горно-геологических ситуаций при различных вариациях прочности пород на сжатие (UCS), длин грузонесущих участков с RQD более 50% (LRQD(50-100)) и разупрочненных участков с RQD менее 50% (LRQD(0-50)) разработаны номограммы прогноза потенциально опасных участков по ДЯ (рис. 6). Согласно представленным данным знание прочности горных пород является весьма значимым и определяет последующие действия по ведению горнопроходческих работ в условиях, опасных по газодинамическим явлениям.

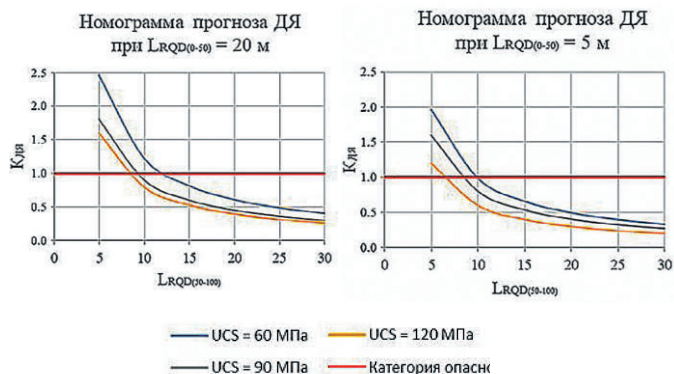


Рис. 6  
Номограммы прогноза потенциально опасных участков по газодинамическим явлениям

Fig. 6  
Nomographic charts for predicting areas potentially hazardous for the gas-dynamic phenomena

### Заключение

Полученные при комплексировании натуральных и лабораторных исследований скоростей распространения упругих волн во вмещающих горных породах кимберлитовой трубки «Интернациональная» результаты свидетельствуют, что для дальнейших прогнозных расчётов значение предела прочности на одноосное сжатие массива битуминозных доломитовых пород следует принимать равным 60 МПа.

## Список литературы / References

1. Оксман В.С., Трубетцкой Н.К., Гражданкин А.И. Анализ летальных несчастных случаев в горнорудной и нерудной промышленности России. *Безопасность труда в промышленности*. 2021;(3):28–35. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-3-28-35>  
Oksman V.S., Trubetskoi N.K., Grazhdankin A.I. Analysis of fatal injuries in the mining and non-metallic industry of Russia. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(3):28–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-3-28-35>
2. Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений калийных солей. *Записки Горного института*. 2020;246:601–609. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.1>  
Baryakh A.A., Andreiko S.S., Fedoseev A.K. Gas-dynamic roof fall during the potash deposits development. *Journal of Mining Institute*. 2020;246:601–609. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.1>
3. Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В., Косухин Н.И. Управление фактором геодинамической безопасности для обеспечения устойчивого развития АО «СУБР». *Горный журнал*. 2021;(1):81–85. <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.14>  
Sidorov D.V., Ponomarenko T.V., Kosukhin N.I. Geodynamic safety management toward sustainable development of Severouralsk Bauxite Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(1):81–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2021.01.14>
4. Андрейко С.С. Газодинамические явления при проходке подготовительных выработок во вмещающих породах на руднике «Интернациональный» АК «Алроса». В: Барях А.А. (ред.). *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр.* Пермь: Горный институт УрО РАН; 2016. С. 304–307.
5. Зыков В.С., Иванов В.В., Пуль Э.К., Вьюников А.А. Оценка газодинамических и фильтрационных характеристик вмещающих пород рудника «Интернациональный» компании «Алроса». *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности*. 2021;(3):26–33. <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.76.95.003>  
Zykov V.S., Ivanov V.V., Pul E.K., Vyunikov A.A. Evaluation of gas dynamic and filtering characteristics of the internet rocks of the Internatsionalny miner of Alrosa company. *Bulletin of Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2021;(3):26–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.25558/VOSTNII.2021.76.95.003>
6. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Вьюников А.А. Газодинамические явления при проходке выработок во вмещающих породах кимберлитовой трубки «Интернациональная». *Горная промышленность*. 2023;(S1):96–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>  
Moroz N.E., Gendler S.G., Vyunikov A.A. Gas-dynamic phenomena in tunnel driving thought the host rocks of the 'International' kimberlite pipe. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):96–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>
7. Коноваленко В.Я. *Справочник физико-механических свойств горных пород алмазных месторождений Якутии*. Новосибирск: Изд-во Сибирского отд-ния Российской акад. наук; 2012. 275 с.
8. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г. Определение опасных по газодинамическим явлениям участков горных пород на основе критериев хрупкого разрушения. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*. 2024;(3):82–90. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2024-3-82-90>  
Moroz N.E., Gendler S.G. Determining areas prone to gas-dynamic phenomena based on brittle fracture criteria. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Gornyy Zhurnal*. 2024;(3):82–90. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2024-3-82-90>
9. Серебряков Е.В., Гладков А.С. Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная». *Записки Горного института*. 2021;250:512–525. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4>  
Serebryakov E.V., Gladkov A.S. Geological and structural characteristics of deep-level rock mass of the Udachnaya pipe deposit. *Journal of Mining Institute*. 2021;250:512–525. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.4>
10. Деменков П.А., Романова Е.Л., Котиков Д.А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола и вмещающего массива горных пород в условиях неравномерности его контура. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11):33-48. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_11\\_0\\_33](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_33)  
Demenkov P.A., Romanova E.L., Kotikov D.A. Stress-strain analysis of vertical shaft lining and adjacent rock mass under conditions of irregular contour. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11):33-48. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_11\\_0\\_33](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_11_0_33)
11. Трушко В.Л., Баева Е.К. Обоснование рациональных параметров крепи комплекса горных выработок, проводимых в сложных горно-геологических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(12):55–69.  
Trushko V.L.1, Baeva E.K. Substantiation of rational parameters of mine support system for underground roadways in difficult geological conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(12):55–69. (In Russ.)
12. Багаутдинов И.И., Беляков Н.А., Севрюков В.В., Рассказов М.И. Применение модели упрочняющегося грунта для прогноза зоны пластических деформаций массива слабоустойчивых пород яковлевского железорудного месторождения. *Горный журнал*. 2022;(12):16–21. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.03>  
Bagautdinov I.I., Belyakov N.A., Sevryukov V.V., Rasskazov M.I. Hardening soil model in prediction of plastic deformation zone in soft rock mass of Yakovlevo iron ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(12):16–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.12.03>
13. Трофимов А.В., Киркин А.П., Румянцев А.Е., Колганов А.В. Использование данных акустического сканирования стенок глубоких скважин для воссоздания действующего режима напряжений на полиметаллическом месторождении интрузивного генезиса. *Горный журнал*. 2024;(1):68–74. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.11>  
Trofimov A.V., Kirkin A.P., Romyantsev A.E., Kolganov A.V. The use of deep borehole imaging data in reconstruction of active stress mode at a polymetallic deposit of intrusive genesis. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(1):68–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.11>

14. Семенова И.Э., Константинов К.Н., Кулькова М.С. Оценка напряженно-деформированного состояния массива пород в окрестности подземных выработок глубокого заложения комплексом инструментальных и численных методов. *Горный журнал*. 2024;(1):22–28. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.04>  
Semenova I.E., Konstantinov K.N., Kulkova M.S. Estimation of stress–strain behavior in surrounding rock mass around deep underground openings using a set of instrumental and numerical methods. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(1):22–28. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.01.04>
15. Марысюк В.П., Трофимов А.В., Киркин А.П., Шутов А.А. Определение напряженно-деформированного состояния массива на участке скипового ствола СС-1 рудника «Октябрьский» методом полной разгрузки керна. *Горный журнал*. 2024;(3):34–40. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.03.04>  
Marysyuk V.P., Trofimov A.V., Kirkin A.P., Shutov A.A. Stress–strain determination in Oktyabrsky Mine SS-1 skip shaft area by overcoring. *Gornyi Zhurnal*. 2024;(3):34–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.03.04>
16. Кашников Ю.А., Ермашов А.О., Ефимов А.А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения. *Записки Горного института*. 2019;237:259–267. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.3.259>  
Kashnikov Y.A., Ermashov A.O., Efimov A.A. Geological and geomechanical model of the Verkhnekamsk potash deposit site. *Journal of Mining Institute*. 2019;237:259–267. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.3.259>
17. Лебедева О.О. Анализ и подготовка исходных данных для построения геолого-геомеханической модели участка верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. *Недропользование*. 2022;22(3):139–143. Режим доступа: <https://ered.pstu.ru/index.php/geo/article/view/3573> (дата обращения: 23.02.2025).  
Lebedeva O.O. Analysis and preparation of initial data for building a geological and geomechanical model of the area at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salt deposit. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2022;22(3):139–143. Available at: <https://ered.pstu.ru/index.php/geo/article/view/3573> (accessed: 23.02.2025).
18. Опарин В.Н., Тапсиев А.П., Востриков В.И. О деформационно-волновых процессах в окрестности горной выработки при взрывах. *Физическая мезомеханика*. 2004;7(1):31–36.  
Oparin V.N., Tapsiev A.P., Vostrikov V.I. On strain-wave processes in the vicinity of a mine at blasting operations. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2004;7(1):31–36. (In Russ.)
19. Кочанов А.Н. Исследование особенностей эволюции микродефектов при взрывном разрушении горных породах. *Инженерная физика*. 2007;(6):48–51.  
Kochanov A.N. Investigation of the features of the evolution of microdefects during explosive destruction of rocks. *Inzhenernaya Fizika*. 2007;(6):48–51. (In Russ.)
20. Кочанов А.Н. Динамика изменений упругих и прочностных свойств горных пород после взрывного воздействия. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2013;18(4-2):1685–1686.  
Kochanov A.N. Dynamics of changes of elastic and strength properties of rocks after explosive impact. *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*. 2013;18(4-2):1685–1686. (In Russ.)
21. Вьюнников А.А., Хоютанова Н.В., Романевич К.В., Панин С.Ф., Разумов Е.Е. Сейсмический мониторинг и оценка геодинамических процессов при ведении горных работ в условиях подземного рудника «Интернациональный». *Горная промышленность*. 2024;(3S):26–31. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31>  
Vyunnikov A.A., Khoютanova N.V., Romanevich K.V., Panin S.F., Razumov E.E. Seismic monitoring and assessment of geodynamic processes during mining operations in conditions of the International underground mine. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):26–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-26-31>
22. Мулев С.Н., Питаль М.Н., Панин С.Ф., Тюхрин В.Г. Современные технологии сейсмического мониторинга угольных шахт и рудников. *Горный журнал*. 2019;(9):68–72. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.09.08>  
Mulev S.N., Pital M.N., Panin S.F., Tyukhrin V.G. Advanced seismic monitoring technologies for coal and ore mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(9):68–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.09.08>
23. Гаврилов А.Г., Штирц В.А., Рукавишников Г.Д. Современные подходы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным сейсмических наблюдений на Таштагольском железорудном месторождении. *Горная промышленность*. 2024;(3S):32–36. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36>  
Gavrilov A.G., Shhirts V.A., Rukavishnikov G.D. Modern approaches to control stress-strain state of rock mass using seismic data at the Tashtagol iron mine. *Russian Mining Industry*. 2024;(3S):32–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36>
24. Разумов Е.Е., Рукавишников Г.Д., Мулёв С.Н., Простов С.М. Анализ сейсмической активности массива при ведении горных работ на шахте «Комсомольская» АО «Воркутауголь». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(1):104–114. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_1\\_0\\_104](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_104)  
Razumov E.E., Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Prostov S.M. Seismic activity in rock mass during mining operations in Vorkutaugol's Komsomolskaya mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(1):104–114. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2022\\_1\\_0\\_104](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_1_0_104)
25. Савельев Ю.А., Черкасова Е.Ю. Количественное измерение телесных углов. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2015;(4):32–42. <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2015-4-32-42>  
Savelyev Yu.A., Cherkasova E.Yu. Quantitative measurements of solid angles. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2015;(4):32–42. (In Russ.) <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2015-4-32-42>
26. Ломакин В.С. *Региональный прогноз удароопасности шахтных полей на основе сейсмологических наблюдений: дис. ... канд. техн. наук*. Свердловск; 1984. 180 с.
27. Питаль М.Н., Мулев С.Н. *Программный комплекс GITS2. Руководство по эксплуатации*. СПб.: ВНИМИ; 2024. 117 с.

28. Разумов Е.Е., Рукавишников Г.Д., Климко В.К. Геофизический прогноз удароопасности при ведении горных работ. В кн.: Костиков К.С. (ред.) *Россия молодая: сб. материалов 13-й Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием, г. Кемерово, 20–23 апреля 2021 г.* Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2021. С. 10908.1–10908.6. Режим доступа: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2021/RM21/pages/Articles/010908.pdf> (дата обращения: 23.02.2025).
29. Romanevich K., Mulev S., Taratinsky G., Pital' M. Analyses of seismic activity characteristics in coal mines and mine sites. In: Soloviev A.A., Gvishiani A.D. (eds) *Abstracts of the International Conference, dedicated to the 70<sup>th</sup> anniversary of the Geophysical Center of the RAS and the 300<sup>th</sup> anniversary of the Russian Academy of Sciences "Data Science, Geoinformatics and Systems Analysis in Geosciences" Suzdal, 25–27 September 2024.* Suzdal: Геофизический центр РАН; 2024, pp. 42.
30. Мороз Н.Е., Гендлер С.Г., Вьюников А.А., Разумов Е.Е. Применение геомеханического показателя качества породы RQD для прогноза газодинамических явлений при проходке выработок на руднике «Интернациональный». *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле.* 2023;(4):628–639.  
Moroz N.E., Gendler S.G., Vyunikov A.A., Razumov E.E. Rock quality designation (RQD) application for prediction gas-dynamic phenomena in tunnel driving at the mine "International". *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle.* 2023;(4):628–639. (In Russ.)
31. Протосеня А.Г., Вильнер М.А., Сотников Р.О. Прогноз устойчивости породных обнажений, располагаемых в структурно-нарушенных массивах рудников КФ АО «Апатит». В кн.: *Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса: сб. науч. тр. 3-й Всерос. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 5–6 марта 2020 г.* СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2020. С. 1569–1575.
32. Дарбинян Т.П., Цымбалов А.А., Зубов В.П., Колганов А.В. Влияние трещиноватости горного массива на разубоживание медно-никелевых вкрапленных руд при их добыче на руднике «Октябрьский». *Горный журнал.* 2023;(6): 19–25. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.06.03>  
Darbinyan T.P., Tsymbalov A.A., Zubov V.P., Kolganov A.V. Impact of rock mass jointing on dilution of disseminated copper-nickel ore in Oktyabrsky Mine. *Gornyi Zhurnal.* 2023;(6):19–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.06.03>
33. He M., Zhao J., Deng B., Zhang Z. Effect of layered joints on rockburst in deep tunnels. *International Journal of Coal Science & Technology.* 2022;9:21. <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00489-x>
34. Xiao P., Liu H., Zhao G. Characteristics of ground pressure disaster and rockburst proneness in deep gold mine. *Lithosphere.* 2022;(Special 11):9329667. <https://doi.org/10.2113/2023/9329667>
35. Cao J., Dou L., Zhu G., He J., Wang S., Zhou K. Mechanisms of rock burst in horizontal section mining of a steeply inclined extra-thick coal seam and prevention technology. *Energies.* 2020;13(22):6043. <https://doi.org/10.3390/en13226043>
36. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С. *Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: справ. пособие.* М.: Недра; 1992. 256 с.

#### Информация об авторах

**Мороз Никита Евгеньевич** – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4401-1989>, e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

**Гендлер Семен Григорьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246>, e-mail: sgendler@mail.ru

**Романевич Кирилл Викторович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0005-2052-7816>; e-mail: romanevichkirill@gmail.com

#### Information about the authors

**Nikita E. Moroz** – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4401-1989>, e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

**Semeon G. Gendler** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7721-7246>, e-mail: sgendler@mail.ru

**Kirill V. Romanevich** – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Associate, VNIMI JSC, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0005-2052-7816>; e-mail: romanevichkirill@gmail.com

#### Article info

Received: 19.01.2025

Revised: 05.03.2025

Accepted: 21.03.2025

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.01.2025

Поступила после рецензирования: 05.03.2025

Принята к публикации: 21.03.2025