



Газодинамические явления при проходке выработок во вмещающих породах кимберлитовой трубки «Интернациональная»

Н.Е. Мороз¹✉, С.Г. Гендлер¹, А.А. Вьюников²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² АК «АЛРОСА», г. Мирный, Российская Федерация

✉ moroz.nikita.1998@mail.ru

Резюме: В статье освещается проблема газодинамических явлений, возникающих при ведении горных работ во вмещающих породах кимберлитовой трубки «Интернациональная». Рассмотрены причины, вызывающие газодинамические явления, приводится анализ геологических и технологических особенностей, оценка геомеханических условий возникновения газодинамических явлений.

На сегодняшний день в условиях месторождения применяются базовые методы прогноза (по начальной максимальной скорости газоистечения) и предотвращения (передовое торпедирование) газодинамических явлений. Применение данных методов внесло значительный вклад в борьбу сотрудников рудника с газодинамическими явлениями, а также позволило прирастить существенные знания о происходящих процессах. Однако выбросы породы и газа продолжают происходить на месторождении при различных условиях, в том числе в условиях проведения законтурного передового торпедирования, что обуславливает актуальность поиска дальнейших решений.

Представленные в статье данные являются предпосылкой к теоретической разработке моделирования газодинамических процессов, происходящих при ведении горных работ во вмещающих породах алмазоносной кимберлитовой трубки.

Ключевые слова: газодинамический процесс, вмещающие породы, разработка месторождений алмазов, геомеханическая обстановка, газодинамические характеристики

Для цитирования: 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>

Gas-dynamic phenomena in tunnel driving through the host rocks of the 'International' kimberlite pipe

N.E. Moroz¹✉, S.G. Gendler¹, A.A. Vyunikov²

¹ Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

² ALROSA, Mirny, Russian Federation

✉ moroz.nikita.1998@mail.ru

Abstract: The article addresses the issue of gas-dynamic phenomena that take place during mining operations in the host rocks of the 'International' kimberlite pipe. The reasons causing gas-dynamic phenomena are reviewed, an analysis of geological and technological features is provided, an assessment of the geomechanical conditions of occurrence of the gas-dynamic phenomena is carried out.

Basic methods of forecasting (based on the initial maximum gas seepage rate) and prevention (advanced shot-firing) of gas-dynamic phenomena are currently used in conditions of the deposit. Application of these methods has made a significant contribution to the efforts of the mine personnel to control the gas-dynamic phenomena, and it also helped to gain an insight into the processes in progress. However, rock and gas outbursts continue to occur in the field under various conditions, including the conditions of the peripheral shot-firing, which makes finding further solutions a topical issue.

The data presented in the article are a prerequisite for the theoretical development for modeling of gas-dynamic processes that take place during mining operations in the host rocks of a diamond kimberlite pipe.

Keywords: gas-dynamic process, host rocks, mining of diamond deposits, geomechanical environment, gas-dynamic characteristics

For citation: Moroz N.E., Gendler S.G., Vyunikov A.A. Gas-dynamic phenomena in tunnel driving through the host rocks of the 'International' kimberlite pipe. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):96–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-96-102>



Введение

Обеспечение безопасных условий ведения подземных горных работ на месторождении кимберлитовой трубки «Интернациональная» является одним из наиболее важных вопросов при проходке вскрывающих горных выработок во вмещающих породах в связи с наличием газодинамических явлений (ГДЯ).

За период с января по декабрь 2022 г. вмещающий массив горных пород кимберлитовой трубки «Интернациональная» 27 раз был в состоянии, при котором реализовались ГДЯ, в том числе со значительным объемом выброшенной горной породы и газа. При этом более 1000 раз за тот же период службой прогноза и предотвращения динамических явлений (ППДЯ) были проведены мероприятия, направленные на прогноз и предотвращение ГДЯ.

Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с изучением газодинамических явлений в угольных шахтах и калийных рудниках, подробно описаны в работах [1; 2]. Из анализа этих работ следует, что одним из превалярующих факторов, обуславливающих газодинамические явления, следует считать физико-механические свойства пород (табл. 1). Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что доломиты, в которых осуществляется проходка выработок на руднике «Интернациональный», характеризуются величинами упругих свойств более значительными, чем песчаники на угольных шахтах и пласты калийных солей. Эти различия существенны для понимания природы газодинамических процессов при разработке алмазов, что и определяет актуальность выполнения данных исследований.

Таблица 1
Прочностные и деформационные показатели выбросоопасных пород [1–3]

Усредненные показатели	Доломиты (трубка «Интернациональная»)	Песчаник (шахта им. Сковинского)	Калийная соль (Старобинское месторождение)
Прочность на одноосное сжатие, МПа	90	115	25
Плотность, кг/м ³	2700	2600	2100
Коэффициент Пуассона	0,2	0,22	0,3
Модуль Юнга, ГПа	50	30	10

Table 1
Strength and deformation properties of outburst-prone rocks

Анализ геологических и технологических особенностей

В настоящее время на руднике «Интернациональный» отработка запасов осуществляется подземным способом. Для обеспечения безопасности горных работ, эффективного управления горным давлением и наиболее полного извлечения полезного ископаемого применяется сплошная слоевая система разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства [4]. Очистные работы ведутся комбайновым способом выемки, горнопроходческие работы осуществляются буровзрывным способом.

Проходческие работы на руднике «Интернациональный» достигли глубины 1300 м от уровня поверхности [5]. В стратиграфическом разрезе месторождения с глубины 1000 м наблюдается переслаивание солей с доломит-ангидритовой породой, с глубины 1050 м залегают трещиноватые нефтеносные доломиты, ниже 1200 м и до 1600 м происходит

переслаивание аргиллитов и доломитов [6]. Геологические условия весьма сложные – кимберлитовую трубку вмещают хрупкие нефтегазосодержащие структурно нарушенные карбонатные толщи.

Экспериментальные исследования состава газа, газоносности и газопроницаемости карбонатных толщ проведены сотрудниками ГИ Уро РАН [7-9]. Так, среднее значение газоносности по связанным газам в доломите бежевом достигает 0,251 м³/м³, а по свободным газам 3 м³/м³. Толщи соляных пород являются газовыми упорами. Литологические разности, вмещающие кимберлитовую трубку, являются слабопроницаемыми. Горизонтальная газопроницаемость доломитовых разностей изменяется от 0,05 до 2,11 мД, вертикальная газопроницаемость – от 0,028 до 1,36 мД. Среди углеводородных газов преобладает метан, содержание которого составляет 70–75% от всего количества растворимых газов. Содержание азота в газах находится в пределах 20–25%. Концентрация тяжелых углеводородов не превышает 3–5%.

Под совокупным влиянием природного и техногенного полей напряжений горные породы подвергаются динамическому процессу вторичного разрушения [10;11]. Лабораторией института «ВНИМИ» отмечается генетическая предрасположенность доломитовых разновидностей в пределах месторождения к хрупкому разрушению, что показывают результаты физико-механических испытаний проб (рис. 1), 25 из 30 образцов разрушились хрупко.

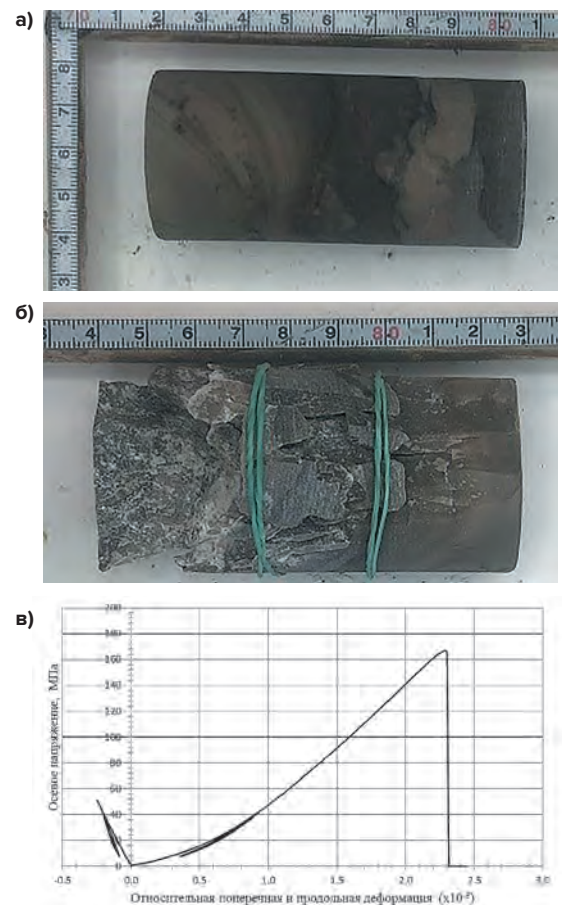


Рис. 1
Фото образца доломита бежевого до (а) и после (б) испытания и кривая деформирования (в). Модуль упругости превышает модуль спадает, что говорит о хрупком характере разрушения

Fig. 1
A photograph of a beige-coloured dolomite sample before (a) and after (b) the test and its deformation curve (v). The modulus of decrease exceeds the modulus of elasticity, which indicates the brittle nature of the fracture

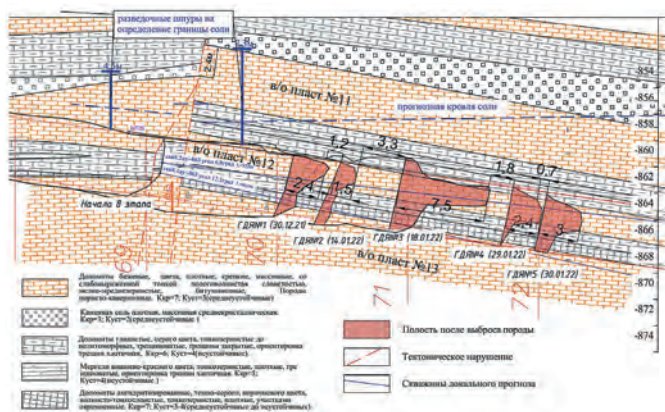


Рис. 2
Геологический разрез участка
выработки с зонами ГДЯ
[составлен сотрудниками
службы ППДЯ рудника
«Интернациональный»]

Fig. 2
A geological section of the
mining site with zones of the
gas-dynamic phenomena
[compiled by the staff of the
Forecasting and Dynamic
Event Prevention Service of
the 'International' Mine]

По мере роста глубин прочностные показатели породных толщ увеличиваются [12]. Усредненное значение предела прочности на одноосное сжатие склонных к хрупкому разрушению пород доломитовых разновидностей составило 91 МПа, коэффициент Пуассона – 0,2, естественная плотность – 2,7 т/м³ и значение модуля упругости – 57 ГПа.

Ранее было установлено, что именно доломиты бежевые являются выбросоопасными [13]. Однако геометрия выбросов породы (рис. 2) свидетельствует о вовлеченности в исследуемый процесс как бежевых, так и серых доломитов.

Анализируя ситуацию, изображенную на рис. 2, можно заключить, что тектоническое нарушение оказало разгружающий эффект, из-за которого произошел приток газа

из глубинных участков массива. При дальнейшем продвижении забоя выработки коллекторы газа оказывались за зоной опорного давления, а произведенный взрыв интенсифицировал отжим предварительно разгруженной зоны.

Также можно сделать вывод, что значение угла встречи выбросоопасного пласта с горной выработкой не оказывает влияния, поскольку выбросы происходили как при сонаправленной (рис. 2), так и против-направленной траектории [14].

ГДЯ были зафиксированы как после передового торпедирования, так и после взрывной отбойки, что свидетельствует о необходимости дальнейших научно обоснованных корректировок технологии ведения горных работ [15].

Оценка напряженно-деформированного состояния массива горных пород

Газодинамические явления реализуются при определенных факторах (напряженное поле толщи пород; давление газа в порах; склонность пород к хрупкому разрушению; введенная сейсмичность от взрывной отбойки), оценка вклада которых является задачей настоящего и будущих исследований.

Мнения специалистов различных геомеханических школ сходятся в том, что исходное (природное) поле напряжений в районе месторождения на глубине свыше 1 км характеризуется как равнокомпонентное [16–18].

Стоит отметить, что информация о параметрах тензора напряжений, полученная опытным путем, имеет ключевую роль при реализации численных геомеханических расчетов [19–26].

Для оценки влияния очистных работ на формирование исходного поля напряжений в районе реализации ГДЯ было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе «PRESS 3D URAL» [27–29].

На рис. 3 представлены этапы моделирования, соответ-

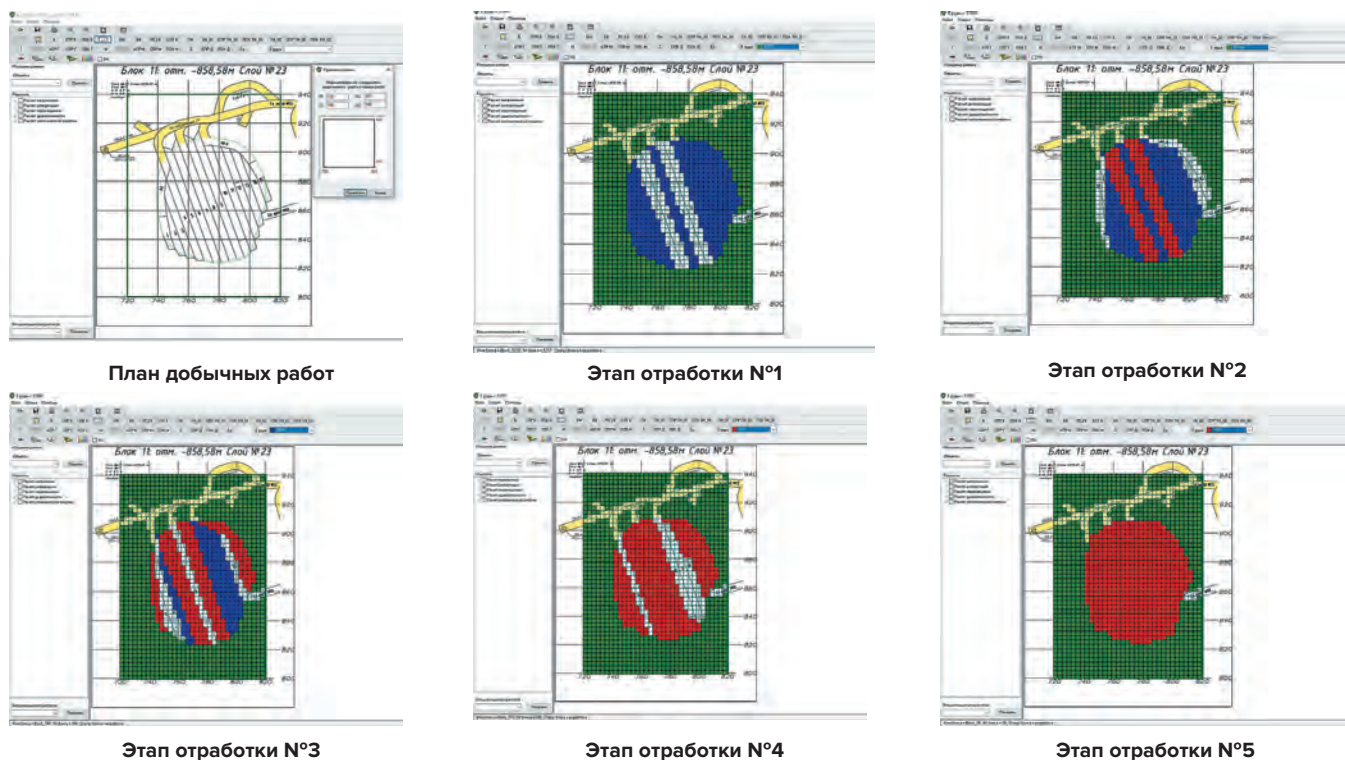


Рис. 3
Формирование базы данных
объектов очистных работ

Fig. 3
Creation of a database of the
actual mining operations

1 Геомеханическое обоснование порядков отработки, параметров зон безопасного ведения работ, параметров систем разработки, параметров поддержания выработок на руднике «Интернациональный» (отчёт заключительный). СПб: ВНИМИ; 1994.



ствующие календарному графику отработки запасов на глубине 1250 м. На расчётных моделях зеленым цветом обозначен породный массив, белым цветом – не заложённое выработанное пространство, синим цветом – рудный массив, красным цветом – закладочный массив. Каждому массиву присвоены свои деформационные показатели. Значение модуля Юнга для вмещающих пород принимается 57 ГПа, для руды – 28 ГПа, для твердеющей закладки – 2 ГПа.

Численная оценка НДС массива производилась для 17 точек Спирального съезда в интервале глубин от 1200 до 1300 м (рис. 4)

Представленные данные свидетельствуют о том, что изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород в районе Спирального съезда (ближайшая к рудному телу капитальная вскрывающая горная

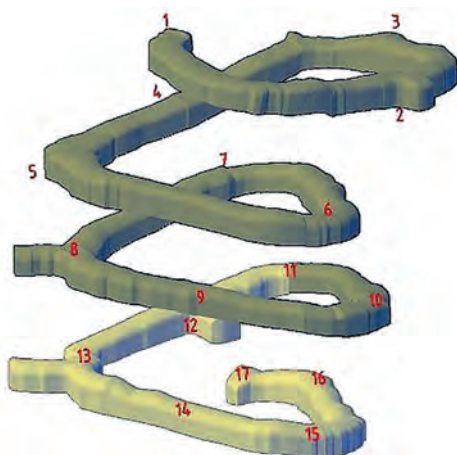


Рис. 4
Спиральный съезд с контрольными точками

Fig. 4
A spiral ramp with reference points

выработка) вследствие ведения очистных работ не превышает 2%.

Таким образом, влияние очистных работ на формирование исходного поля напряжений в районе вскрываемых выработок незначительно, и последующие расчёты достаточно выполнять как для одиночных горных выработок.

Далее в контрольных точках была выполнена расчетная оценка устойчивости одиночной изолированной подземной выработки по методике, приведенной в справочном пособии ВНИМИ [30]. Расчет реализован в инженерной программе ProRockBurst компании ПОЛИГОР (рис. 5). При расчете были приняты следующие исходные данные: коэффициент концентрации полных напряжений; глубина расположения, ширина и высота выработки; удельный вес, модуль упругости и модуль спада, предел прочности на одноосное сжатие пород.

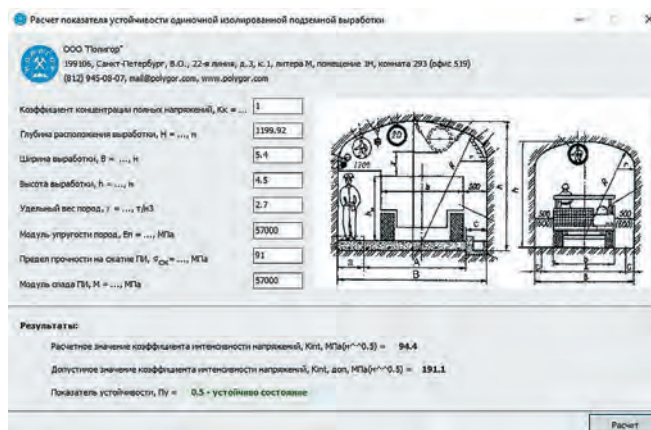


Рис. 5
Пример расчёта показателя устойчивости выработки

Fig. 5
Example of calculating the excavation stability factor

Таблица 2
Результаты оценки (данные в % по модулю)

Table 2
Evaluation results (data in % by the module)

Точка	Модель 1			Модель 2			Модель 3			Модель 4			Модель 5		
	$\sigma_{x,доп}$	$\sigma_{y,доп}$	$\sigma_{z,доп}$	$\sigma_{x,доп}$	$\sigma_{y,доп}$	$\sigma_{z,доп}$	$\sigma_{x,доп}$	$\sigma_{y,доп}$	$\sigma_{z,доп}$	$\sigma_{x,доп}$	$\sigma_{y,доп}$	$\sigma_{z,доп}$	$\sigma_{x,доп}$	$\sigma_{y,доп}$	$\sigma_{z,доп}$
1	0,16	0,17	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01
2	0,31	0,31	0,01	0,28	0,28	0,01	0,28	0,28	0,01	0,28	0,28	0,01	0,28	0,28	0,01
3	0,96	0,96	0,01	1,11	1,11	0,01	1,03	1,03	0,01	1,02	1,02	0,01	1,02	1,02	0,01
4	0,14	0,13	0,01	0,22	0,22	0,01	0,22	0,22	0,01	0,22	0,22	0,01	0,21	0,21	0,01
5	0,44	0,44	0,01	0,11	0,11	0,01	0,12	0,12	0,01	0,14	0,14	0,01	0,17	0,17	0,01
6	0,25	0,25	0,01	0,18	0,18	0,01	0,18	0,18	0,01	0,18	0,18	0,01	0,19	0,19	0,01
7	0,37	0,37	0,01	0,26	0,26	0,01	0,26	0,26	0,01	0,27	0,27	0,01	0,17	0,17	0,01
8	0,28	0,28	0,01	0,06	0,06	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
9	0,26	0,26	0,01	0,11	0,11	0,01	0,12	0,12	0,01	0,12	0,12	0,01	0,14	0,14	0,01
10	0,31	0,31	0,01	0,27	0,27	0,01	0,27	0,27	0,01	0,27	0,27	0,01	0,27	0,27	0,01
11	1,57	1,58	0,01	1,75	1,75	0,01	1,74	1,74	0,01	1,73	1,73	0,01	1,72	1,72	0,01
12	0,13	0,13	0,01	0,19	0,19	0,01	0,19	0,19	0,01	0,19	0,19	0,01	0,19	0,19	0,01
13	0,41	0,41	0,01	0,08	0,08	0,01	0,10	0,10	0,01	0,12	0,12	0,01	0,15	0,15	0,01
14	0,27	0,28	0,01	0,11	0,11	0,01	0,12	0,12	0,01	0,13	0,13	0,01	0,14	0,14	0,01
15	0,25	0,25	0,01	0,17	0,17	0,01	0,17	0,17	0,01	0,18	0,18	0,01	0,18	0,18	0,01
16	0,79	0,79	0,01	0,85	0,85	0,01	0,84	0,84	0,01	0,84	0,84	0,01	0,84	0,84	0,01
17	0,69	0,69	0,01	0,51	0,51	0,01	0,51	0,51	0,01	0,52	0,52	0,01	0,54	0,54	0,01



Таблица 3
Результаты оценки
устойчивости выработки

Table 3
Results of assessing the
excavation stability factor

Точка	H, м	$P_{уст}$	Статус
1	1199.92	0.5	Устойчиво
2	1206.85		
3	1210.52		
4	1218.51		
5	1221.73		
6	1228.72		
7	1236.85		
8	1242.77		
9	1246.65		
10	1251.56		
11	1256.63		
12	1259.62		
13	1263.91		
14	1267.71		
15	1270.79		
16	1275.78		
17	1278.48		

Результаты расчета, представленные в табл. 3, свидетельствуют об обеспечении устойчивости исследуемой выработки в текущих горно-геологических и горнотехнических условиях на момент, предшествующий буровзрывным работам.

Заключение

На сегодняшний день в условиях месторождения применяются базовые методы прогноза (по начальной максимальной скорости газоистечения) и предотвращения (передовое торпедирование) ГДЯ. Применение данных методов внесло значительный вклад в борьбу сотрудников рудника с газодинамическими явлениями, а также позволило прирастить существенные знания о происходящих процессах. Однако выбросы породы и газа продолжают происходить на месторождении при различных условиях, в том числе в условиях проведения законтурного передового торпедирования, что обуславливает актуальность поиска дальнейших решений.

Представленные в статье данные являются предпосылкой к теоретической разработке для моделирования газодинамических процессов, происходящих при ведении горных работ во вмещающих породах алмазоносной кимберлитовой трубки.

Авторами внесен равноценный вклад в подготовку и написание материала данной статьи

Список литературы

- Ефремов Э.И., Харитонов В.Н., Семенюк И.А. *Взрывное разрушение выбросоопасных пород в глубоких шахтах*. М.: Недра; 1979. 253 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/22320?ysclid=ldpy2olbbq82114094>
- Большинский М.И., Лысыков Б.А., Каплюхин А.А. *Газодинамические явления в шахтах*. Севастополь: Вебер; 2003. 284 с. Режим доступа: http://bergmaster.narod.ru/techno-lit/2003_gdj-v-schahтах.pdf
- Коноваленко В.Я. *Справочник физико-механических свойств горных пород алмазных месторождений Якутии*. – 2012.
- Айнбиндер И.И., Овчаренко О.В. Особенности геомеханического состояния массива пород на глубоких горизонтах рудников «Интернациональный» и «Мир». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(11):57–69. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69>
- Вьюников А.А., Ворожцов С.Г., Пуль Э.К., Ковешников П.Ю. Способы профилактики внезапных выбросов породы и газа при ведении горных работ на сверхглубоких горизонтах подземного рудника «Интернациональный» // *Горный журнал*. – 2022. - № 1. – С. 85 – 89.
- Янников А.М., Голованев А.О. Инженерно-геологическая характеристика пород Олекминской и Толбачанской свит в около-трубочном пространстве месторождения трубка "Интернациональная" // *Современные проблемы и опыт гидрогеологических, инженерно-геологических и эколого-геологических исследований на территории Центрально-Черноземного региона*. – 2018. – С. 146-151.
- Нечаева К.Д. Определение компонентного состава связанных газов в породах рудника «Интернациональный». В: *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф., г. Пермь, 5–8 ноября 2019 г.* Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та; 2019. С. 327–329.
- Колчанов А.С. Исследование газопроницаемости вмещающих пород рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА». В: *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф., г. Пермь, 5–8 ноября 2019 г.* Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та; 2019. С. 310–312.
- Анисимов Р.С. Определение газоносности пород по связанным газам на руднике «Интернациональный». В: *Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы 12-й Всерос. науч.-техн. конф., г. Пермь, 5–8 ноября 2019 г.* Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та; 2019. С. 283–285.
- 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.
- Пуль Э.К., Захаров Н.Е., Лосовская Ю.В., Иванов П.С. Разработка и опытно-промышленная апробация мероприятий по предотвращению негативных последствий газодинамических явлений на месторождении трубки «Интернациональная». *Горный журнал*. 2020;(1):104–108. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.21>
- Коноваленко В.Я. *Справочник физико-механических свойств горных пород алмазных месторождений Якутии*. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2012. 275 с.



13. Андрейко С.С. Предотвращение выбросов породы и газа при проходке подготовительных выработок в доломитовых породах на больших глубинах. *Горное эхо*. 2020;(2):83–91. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.2.17>
14. Нестеров Е.А. Результаты опытно-промышленных испытаний проходки подготовительных выработок в выбросоопасных доломитовых породах. *Горное эхо*. 2020;(2):114–118. <https://doi.org/10.7242/echo.2020.2.22>
15. Бьюников А.А., Ворожцов С.Г., Пуль Э.К., Хоютанова Н.В. Предотвращение внезапных выбросов породы и газа при ведении горных работ на сверхглубоких горизонтах рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА». *Горный журнал*. 2022;(1):85–89. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.15>
16. Иудин М.М. Естественное напряженное состояние массива горных пород кимберлитовых месторождений // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2009. – Т. 6. – №. 2. – С. 25-31.
17. Еременко В.А., Аксенов З.В., Пуль Э.К., Захаров Н.Е. Исследование структуры вторичного поля напряжений призабойной части подготовительных выработок при проходке выбросоопасных пластов с использованием программы Map3D. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(5):91–104. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104>
18. Бильдушкинов Е.В., Гухман В.Д., Константинова С.А., Латынин В.В., Соловьев В.А. Цель, задачи и некоторые результаты геомеханического мониторинга состояния капитальных и подготовительных выработок на руднике «Интернациональный» АК «АЛРОСА». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(1):131–137. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2009/1/Bildushkinov_1_2009.pdf
19. Давыдов А.А., Соннов М.А., Румянцев А.Е., Головченко Ю.Ю., Трофимов А.В. Геотехническое обоснование первоочередной разрезки залежей богатых руд шахты «Глубокая» методами пошагового численного моделирования в условиях гравитационно-тектонического поля напряжений // Горная промышленность. 2022;(5):83–91. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-83-91>
20. Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений калийных солей // Записки Горного института. 2020. Том 246. С. 601-609. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.1>
21. Трушко В.Л., Трушко О. В. Комплексное освоение железорудных месторождений на основе конкурентоспособных подземных геотехнологий // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250. – С. 569-577.
22. Карасев М.А., Сотников Р.О. Прогноз напряженного состояния набрызг-бетонной крепи при многократном сейсмическом воздействии // Записки Горного института. 2021. Том 251. С. 626-638. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.2>
23. Козырев А.А. и др. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. – 2019.
24. Семенова И.Э. Геомеханические аспекты отработки сближенных рудных месторождений в удароопасных условиях // Горный журнал. – 2020. – №. 9. – С. 26-32.
25. Shabarov A. et al. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Т. 129. – С. 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191290101>
26. Господариков А.П., Трофимов А.В., Киркин А.П. Оценка деформационных характеристик хрупких горных пород за пределом прочности в режиме одноосного сервогидравлического нагружения // Записки Горного института. 2022. Том 256. С. 539-548. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.8.7>
27. Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В. Применение цифровых геомеханических двойников для прогнозирования и оценки рисков потери запасов в проектах разработки рудных месторождений. *Горная промышленность*. 2022;(3):112–117. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-112-117>
28. Сидоров Д.В., Пономаренко Т.В., Косухин Н.И. Управление фактором геодинамической безопасности для обеспечения устойчивого развития АО "СУБР" // Горный журнал. – 2021. – №. 1. – С. 81-85.
29. Сидоров Д.В., Потапчук М.И., Сидляр А.В., Курсакин Г.А. Оценка удароопасности при освоении глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Записки Горного института. 2019. Том 238. С. 392. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.4.392>
30. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С. *Расчетные методы в механике горных ударов и выбросов: справочное пособие*. М.: Недра; 1992. 256 с.

References

1. Efremov E.I., Kharitonov V.N., Semenyuk I.A. *Explosive fragmentation of outburst-prone rocks in deep mines*. Moscow: Nedra; 1979. 253 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/22320?ysclid=ldpy2olbbq82114094>
2. Bolshinsky M.I., Lysikov B.A., Kaplyukhin A.A. *Gas-dynamic phenomena in mines*. Sevastopol: Veber; 2003. 284 p. (In Russ.) Available at: http://bergmaster.narod.ru/techno-lit/2003_gdj-v-schahtah.pdf
3. Konovalenko V.Ya. Reference book on physical and mechanical properties of rocks at diamond deposits in Yakutia, 2012.
4. Aynbinder I.I., Ovcharenko O.V. Geomechanical behavior of deep-level rock mass in Internatsionalny and Mir mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(11):57–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69>
5. Vyunikov A.A., Vorozhtsov S.G., Pul E.K., Koveshnikov P.Yu. Methods to prevent sudden rock and gas outbursts during mining operations in ultra-deep levels of the 'International' underground mine // Gornyi Zhurnal, 2022, No. 1, pp. 85-89. (In Russ.)
6. Yannikov A.M., Golovanev A.O. Engineering and geological characteristics of rocks of the Olekminskaya and Tolbachanskaya formations in the near-tube zone of the 'International' pipe// Current challenges and experience of hydrogeological, engineering, ecological, and geological studies in the Central Black Earth Region, 2018, pp. 146-151. (In Russ.)
7. Nechaeva K.D. Definition of the volume components of associated gases in rocks of the "International" mine. In: *Challenges in mining of hydrocarbon and ore mineral deposits: Proceedings of the 12th All-Russian Scientific and Technical Conference, Perm, November 5–8, 2019*. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2019, pp. 327–329. (In Russ.)
8. Kolchanov A.S. Studies of gas permeability of host rocks at ALROSA's 'International' mine. In: *Challenges in mining of hydrocarbon and ore mineral deposits: Proceedings of the 12th All-Russian Scientific and Technical Conference, Perm, November 5–8, 2019*. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2019, pp. 310–312. (In Russ.)
9. Anisimov R.S. Definition of the gas content in rocks based on the associated gases at the 'International' mine. In: *Challenges in mining of hydrocarbon and ore mineral deposits: Proceedings of the 12th All-Russian Scientific and Technical Conference, Perm, November 5–8, 2019*. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2019, pp. 283–285. (In Russ.)
10. Andreyko S.S. Gas-dynamic phenomena in roadway development thought the host rocks at the 'International' kimberlite pipe. In: Baryakh A.A. (ed.). *Strategy and processes in development of georesources: collection of scientific works* Perm: Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2016, pp. 304–307. (In Russ.)
11. Pul E.K., Zakharov N.E., Losovskaya Yu.V., Ivanov P.S. Development and pilot testing of activities aimed to prevent adverse consequences



- of gasdynamic phenomena at the Internatsionalnaya pipe. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):104–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.21>
12. Konovalenko V.Ya. *Reference book on physical and mechanical properties of rocks at diamond deposits in Yakutia*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2012. 275 p. (In Russ.)
13. Andreyko S.S. Prevention of rock and gas outbursts during roadway development in dolomite rocks at great depths. *Gornoe ekho*. 2020;(2):83–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2020.2.17>
14. Nesterov E.A. Results of pilot roadway development tests in outburst-prone dolomite rocks. *Gornoe ekho*. 2020;(2):114–118. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2020.2.22>
15. Vyunikov A.A., Vorozhtsov S.G., Pul E.K., Khoyutanova N.V. Prevention of rock and gas outbursts in superdeep-level mining in Internatsionalny Mine of ALROSA. *Gornyi Zhurnal*. 2022;(1):85–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.01.15>
16. Iudin M.M. Natural stress state of the rock masses in kimberlite deposits // *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 25–31. (In Russ.)
17. Eremenko V.A., Aksenov Z.V., Pul E.K., Zakharov N.E. MAP 3D analysis of secondary stress field structure in face area of development headings in rockburst-hazardous seams. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(5):91–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-5-0-91-104>
18. Bildushnikov E.V., Guhman V.D., Konstantinova S.A., Latinin V.V., Solovyev V.A. The primary aims, tasks and selected geomechanical condition monitoring results of temporary and permanent mine openings at internatsionalniy open-pit mine owned by Alrosa CO. LTD. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(1):131–137. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2009/1/Bildushkinov_1_2009.pdf
19. Davydov A.A., Sonnov M.A., Rumyantsev A.E., Golovchenko Yu.Yu., Trofimov A.V. Geotechnical justification of first-priority mining of rich ore deposits at the 'Glubokaya' mine using stepwise numerical simulation methods in conditions of gravitational-tectonic stress field // *Russian Mining Industry Journal*, 2022; (5): 83–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-83-91>
20. Baryakh A.A., Andreyko S.S., Fedoseyev A.K. Gas-dynamic collapse of the roof in mining of potassium salts deposits // *Journal of Mining Institute*, 2020, Vol. 246, pp. 601–609. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.6.1>
21. Trushko V.L., Trushko O.V. Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies // *Journal of Mining Institute*, 2021, Vol. 250, pp. 569–577. (In Russ.)
22. Karasev M.A., Sotnikov R.O. Forecast of the stress state of a shotcrete support under repeated seismic impact // *Journal of Mining Institute*, 2021, Vol. 251, pp. 626–638. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.2>
23. Kozyrev A.A. et al. Geomechanical processes in geological environment of mining systems and geodynamic risk management, 2019. (In Russ.)
24. Semenova I.E. Geomechanical aspects of mining adjacent ore deposits in rock-bump hazardous conditions // *Gornyi Zhurnal*, 2020, No. 9, pp. 26–32. (In Russ.)
25. Shabarov A. et al. Geodynamic risks of mining in highly stressed rock mass // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2019. – T. 129. – C. 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20191290101>
26. Gospodarikov A.P., Trofimov A.V., Kirkin A.P. Estimation of deformation properties of brittle rocks beyond the strength limit in uniaxial servohydraulic loading // *Journal of Mining Institute*, 2022, Vol. 256, pp. 539–548. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.87>
27. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V. Application of digital geomechanical twins to predict and assess risks of reserve loss in ore mining projects. *Russian Mining Industry*. 2022;(3):112–117. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-112-117>
28. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V., Kosukhin N.I. Control of geodynamic safety factor to ensure sustainable development of the North Urals Bauxite Mine (SUBR) // *Gornyi Zhurnal*, 2021, No. 1, pp. 81–85. (In Russ.)
29. Sidorov D.V., Potapchuk M.I., Sidlyar A.V., Kursakin G.A. Assessment of rock-bump hazards in mining of deep levels of the Nikolayevskoye field // *Journal of Mining Institute*, 2019, Vol. 238, p. 392. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.4.392>
30. Petukhov I.M., Linkov A.M., Sidorov V.S. *Computational methods in mechanics of rock bumps and bursts: a reference book*. Moscow: Nedra; 1992. 256 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Мороз Никита Евгеньевич – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

Гендлер Семён Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производств, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Вьюников Александр Анатольевич – заместитель главного инженера, АК «АЛРОСА», Служба ППДЯ рудника «Интернациональный», г. Мирный, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.01.2023

Поступила после рецензирования: 01.02.2023

Принята к публикации: 04.02.2023

Information about the authors

Nikita E. Moroz – Postgraduate student, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

Semen G. Gendler – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Industrial Safety Department, Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

Aleksandr A. Vyunikov – Deputy Chief Engineer, ALROSA, Forecasting and Dynamic Event Prevention Service of the 'International' Mine, Mirny, Russian Federation

Article info

Received: 19.01.2023

Revised: 01.02.2023

Accepted: 04.02.2023