

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕЩЕНИЯ КОНТУРОВ РУДНЫХ ТЕЛ ПОСЛЕ ВЗРЫВА

А.С. Левковский, НИТУ МИСИС, ООО «ДНА-Бласт МСК», г. Москва, Россия.

Аннотация. В статье приведены результаты исследований по использованию новой технологии определения перемещения рудных тел после взрывных работ.

Установлено, что результаты моделирования соответствуют фактическим данным более чем на 90%.

Определено, что данная методика позволяет оценить состояние массива после взрыва, в частности смещение рудных тел, их смешивание с пустыми породами и как следствие составлять сортовой план.

Выявлено, что для построения наиболее точной модели необходимо проводить дополнительные замеры с целью получения неизвестных констант.

Результаты исследований могут быть полезными при составлении сортового плана горных работ.

Ключевые слова: рудное тело, компьютерное моделирование, геология, взрывные работы, воксель.

COMPUTER SIMULATION OF DISPLACEMENT OF CONTOURS OF ORE BODIES AFTER EXPLOSION

A. Levkovsky, NUST MISIS, LLC «DNA-Blast MSK», Moscow, Russia.

Abstract: The article presents the results of research on the use of a new technology for determining the movement of ore bodies after blasting.

It is established that the simulation results correspond to the actual data by more than 90%.

It is determined that this technique allows us to assess the state of the massif after the blast, in particular, the displacement of ore bodies, their mixing with empty rocks and, as a consequence, to make a varietal plan.

It is revealed that in order to build the most accurate model, it is necessary to carry out additional measurements in order to obtain unknown constants.

The results of the research can be useful in drawing up a varietal mining plan.

Keywords: ore body, computer simulating, geology, blasting operations voxel.

Эксплуатационная разведка на взрывном блоке с сетью опробования $6 \times 6 \times 15$ м или $3.5 \times 3.5 \times 5$ м предполагает высокую степень надежности при оценке качества и количества полезного компонента в блоке, точного геометрического расположения рудных тел до взрыва. Другими словами, до взрыва геологи знают о руде в блоке все. Достаточно часто, в случае сложного залегания рудных тел, высокой категории сложности месторождения (3-4 категории) после проведения взрывных работ встает вопрос определения смещения рудных тел для минимизации потерь и разубоживания полезных ископаемых. Данная задача нетривиальна и не имеет простого решения. Существуют различные подходы к решению данной задачи, замеры сдвижения с использованием радиочастотных датчиков, цветовая раскраска поверхностей, закладка маркировочных трубок в скважины, численное моделирование. Ниже будет предложен вариант математического моделирования с численными расчетами.

Решением данной проблемы может послужить компьютерное моделирование взрывных работ, в том числе моделирование смещения контуров рудного тела и моделирование развала взрыва с использованием локальной блочной модели в программном обеспечении I-Blast Ultimate.

В силу сложной геометрической формы рудных тел, горно-геологической конфигурации массива, для корректного моделирования взрыва требуется множество входящих данных.

Во входящие данные входят:

- ✦ Физико-механические свойства горных пород;
- ✦ Геологические полигоны в случае, если на блок приходится несколько типов пород;
- ✦ Контурные рудных тел в массиве, если необходимо смоделировать их смещение;
- ✦ Фактическая съемка топоповерхности перед взрывом для построения воксельной модели;
- ✦ Геологическая блочная модель необходима для моделирования перемещения и разубоживания рудной массы;
- ✦ Фактические данные по скважинам, а именно:
- ✦ Координаты устья скважин (x, y, z), глубина скважин, их угол наклона и азимут;
- ✦ Конструкция заряда скважин;
- ✦ Схема монтажа и используемые замедления;
- ✦ Характеристики применяемых типов взрывчатых веществ и взрывчатым материалов.

По данным исходным данным строится модель взрыва.

При компьютерном моделировании взрыва используются сложные математические расчеты.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Здесь X, Y, Z — компоненты объемных сил по осям в декартовой системе координат x, y, z ; t — время.

Связи напряжений с деформациями (производными от перемещений u, v, w) задаются законом Гука

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda \varepsilon + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \\ \sigma_y &= \lambda \varepsilon + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right); \\ \sigma_z &= \lambda \varepsilon + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}; \quad \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad \varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

где λ, μ — упругие постоянные Ляме.

Из системы (1.1) исключим компоненты σ тензора напряжений, пользуясь соотношениями (1.2). Полученная система трех уравнений второго порядка от перемещений u, v, w по координатам x, y, z и t имеет вид

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \mu \Delta u + X - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0; \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + \mu \Delta v + Y - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0; \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + \mu \Delta w + Z - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= 0, \end{aligned} \quad (1.3)$$

носит название системы Ляме и может быть представлена в нескольких различных формах [1].

При отсутствии массовых сил из (1.3) следует четыре волновых уравнения для φ и $\vec{\psi}$:

$$\Delta \varphi = a^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad \Delta \vec{\psi} = b^2 \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2}, \quad \vec{F} = \{X, Y, Z\} = 0,$$

Где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа, (1.4)

А величины

$$A = \sqrt{\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}} = \frac{2}{V_p^2} \quad \text{и} \quad b = \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} = \frac{2}{V_s^2} \quad (1.5)$$

обратные значения скоростей распространения продольных и поперечных волн соответственно [2].

Дифференцируя уравнение системы (1.3) по x (первое), y (второе) и z (третье) и складывая результаты, находим что

$$(\lambda + 2\mu) \Delta \varepsilon = \rho \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2}, \quad (1.6)$$

Откуда следует, что в среде могут распространяться волны со скоростью V_p (см. уравнение (1.5)). Если принять в уравнениях (1.3) $\varepsilon = 0$, получим три выражения:

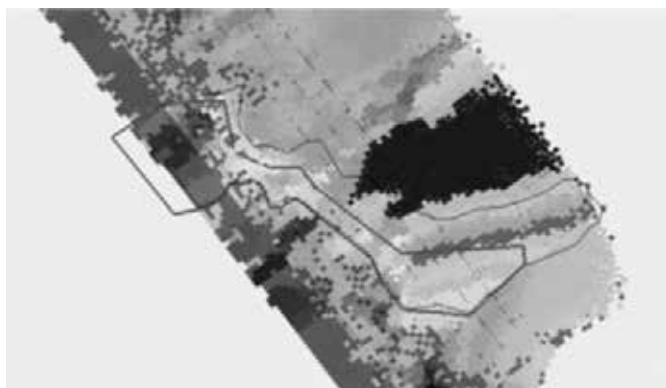
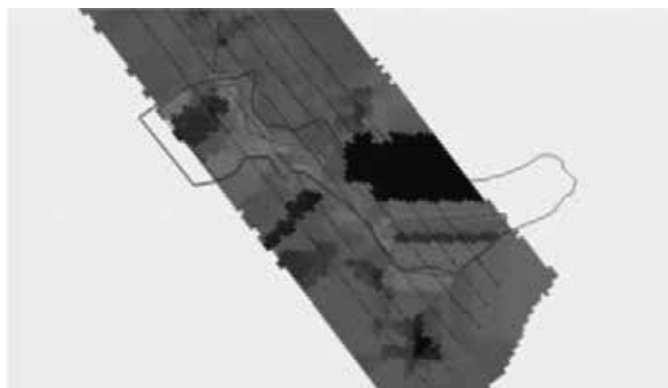
$$\mu \Delta u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad \mu \Delta v = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad \mu \Delta w = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \quad (1.7)$$

Указывают на то, что в среде могут иметь место волны, распространяющиеся со скоростью V_s (см. уравнение (1.5)): для этих волн существенно отсутствие изменения объема [3].

В случае динамических процессов граничные условия должны быть дополнены начальными условиями, которые могут быть поставлены для вектора упругих перемещений, например

$$\vec{u} = \vec{u}_0(x, y, z), \quad \partial u / \partial t = \vec{u}_1(x, y, z), \quad \text{при } t = t_0. \quad [4] \quad (1.8)$$

Аналитическим методом решение невозможно. Вышеупомянутая система уравнений решается численными методами, в частности методом дискретных элементов. При решении системы дифференциальных уравнений в частных производных первого и второго порядка появляются неизвестные константы. Чтобы решить систему однозначно, ее необходимо дополнить системой начальных и граничных условий, таким образом определить данные константы однозначно. Выполнение ряда натурных измерений и последующих калибровок является по сути определением неизвестных констант. Начальные и граничные условия



----- контур — контур рудного тела по подошве.

----- контур — контур смещения рудного тела в массиве.

Рис. 1. Контур смещения рудного тела на воксельной модели до и после взрыва.

Pict. 1. Contours of the displacement of the ore body on the voxel model before and after the blast.

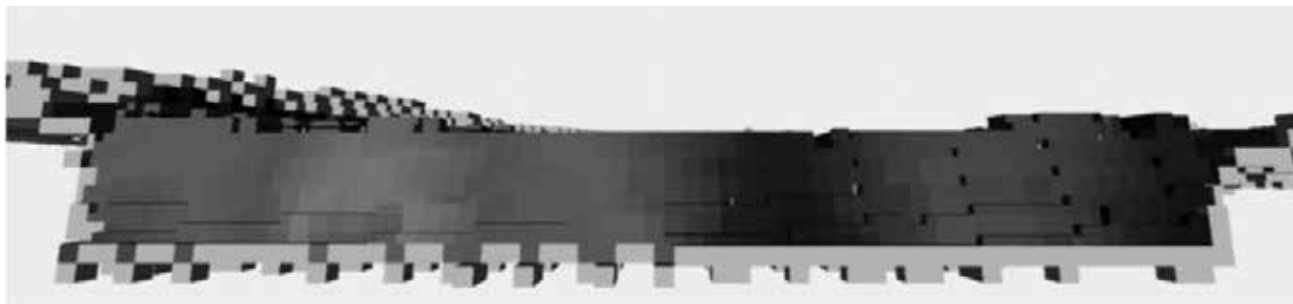


Рис. 2. Воксельная модель блока до взрыва.
Pict. 2. Voxel model of the block before the blast.

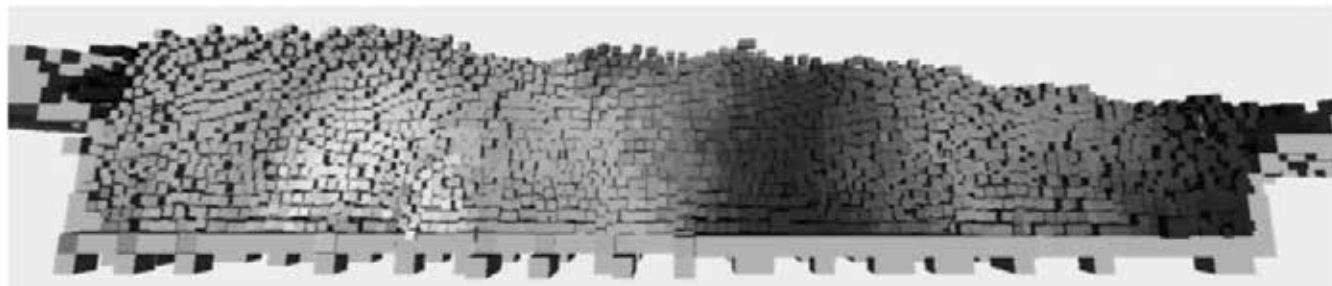


Рис. 3. Воксельная модель развала взрыва.
Pict. 3. Voxel model of blasted muckpile.

уточняются из натурных измерений для уменьшения множества решений.

В качестве начальных и граничных условий выступают следующие данные:

- ✧ Съемка поверхности после взрыва (граничные условия);
- ✧ Замер скорости отрыва массива (начальные условия);
- ✧ Замер максимальной скорости колебаний с помощью сейсмографа (начальные и граничные условия).

По результатам натурных замеров, выполняется уточнение решения («калибровка»), в результате чего можно добиться увеличения точности расчётной модели по отношению к фактическому взрыву по геометрии (форме развала) и достижения совпадения в 90%.

Определение. Воксель — кубик объема пространства в пределах взрывного блока или окрестностей с заданны-

ми размерами, содержащий атрибуты, такие как, например, содержание, тоннаже, типе руд и др., и участвующий в расчетах модели в качестве минимального дискретного элемента.

Выводы. Предлагается численное четырехмерное моделирование развала взрыва для горной промышленности (для твердых полезных ископаемых) с использованием прикладного программного обеспечения I-Blast Ultimate, однако отмечается, что для приемлемого качества модели развала взрыва требуется сбор множества исходных данных. Качество исходных данных напрямую влияет на результаты расчета. Рекомендуется посещения участка и сбор множества исходных данных в натуре для моделирования взрыва, включая поверхность развала взрыва, скорости разлета горной массы, скорости детонации, сейсмических замеров смещений и скоростей. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. М.: Горная книга, 2018. 31 с.
2. Кожиев Х.Х., Ломоносов Г.Г. Рудничные системы управления качеством минерального сырья. - 2-е изд., стер. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. С. 18.
3. Шемякин Е.И. Динамические задачи теории упругости и пластичности. Москва: ННЦГП - ИГД им. А. А. Скочинского, 2007. 205 с.
4. Тьерри Б., Ганьон Г. Взрывные работы на 1 миллион тонн руды в 205 метрах от города // Журнал золота и технологии. 2018. №4. С. 92-98
5. Тьерри Б. Новая модель для реалистичного моделирования взрыва в 3D // Журнал Глобус. 2019. №4 (58). С. 122
6. Белин В. А., Вяткин Н. Л., Болотова Ю. Н. Итоги международной конференции по взрывному делу, организованной АНО НОИВ // Журнал Горная промышленность. 2019. №5. С. 64-70.
7. Стагурова О. В. Прогноз развала и высокоточное позиционирование ковша экскаватора - два звена одной цепи // Журнал Глобус. 2021. №1 (65). С. 154-156.
8. Лещинский А.В., Шевкун Е.Б. Забойка взрывных скважин на карьерах. Хабаровск, Изд-во: ТОГУ, 2008. 229 с.
9. Oates T.E., Spiteri W. Stemming and best practice in the mining industry: A literature review. The journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. August 2021. pp. 415-425.
10. Соснин В. А., Межеричкий С. Э., Печенев Ю. Г., Михайлюкова А. И., Севастьянов А. Б. Особенности механизма детонации эмульсионных взрывчатых веществ // Вестник технологического университета. 2016. №19. С. 28-33.

11. Виноградов, В.Н. Промышленная оценка рассеянных элементов в комплексных рудах. - М.: Недра, 1972. - 150 с.
12. Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Блейман И.Л. Производство массовых взрывов. - М.: Недра, 1977. 312 с.
13. Nguyen Dinh An., Tran Quang Hieu., Do Ngoc Hoan., Tran Dinh Bao., Belin V.A. Analysis and evaluation of research result of experimental blasting at Nui Beo surface coal mine to reduce of ground vibration and air blast near residents. International Conference on Advances in Mining and Tunneling in Vung Tau - VietNam, from 18-24 October 2014. pp. 79-82.
14. Катанов И. Б. Модель для изучения процесса перемещения горной массы взрывом // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. №6. С. 51-53.
15. Казикаев Д.М., Девятень А.А. Алгоритм и решение задачи по управлению качеством добываемой руды при комбинированной разработке. Горный информационно-аналитический бюллетень (отдельные статьи). 2010. №9. С. 8 - 12
16. Гагулин М. В. Исследование влияния глубины и диаметра взрывных скважин на качество дробления // Взрывное дело. 1969. №67/24.
17. Ernesto SALAS GARCIA, Alan D?AZ BUTR?N. Tunnels: Blasting Optimization for advance 100%, with overbreak and underbreak lower than 5%. 2017. URL: <http://dnablast.com/isee-2017-how-to-achieve-100-advance-in-tunnel/?lang=en> (дата обращения: 23.04.2022).
18. Thierry Bernard. The Real Relationship Between Cracks and Vibrations: Are Cracks in Buildings Really Created by Vibrations? 2019. URL: <http://dnablast.com/efee-2019-nueva-tecnologia-para-comprender-el-vinculo-entre-las-grietas-y-vibraciones/?lang=en> (дата обращения: 23.04.2022).
19. Thierry Bernard. 479 Charges, 13 Decks...120 Meters Above a Crushing Plant. 2015. URL: <http://dnablast.com/isee-2015-479-loads-13-decks-120-meters-near-a-crushing-plant/?lang=en> (дата обращения: 23.04.2022).
20. Thierry BERNARD Philippe DOZOLME. New convincing results in the reduction of fines obtained thanks to digital simulation. 2013. URL: http://dnablast.com/wpq-content/uploads/2019/01/TBT_EFEE_-2013_Story_A3LT.pdf (дата обращения: 23.04.2022).

REFERENCES

1. B.N. Kutuzov. Methods of conducting blasting operations. M.: Mining Book, 2018, p. 31.
2. Kojiev H.H., Lomonosov G.G. Mine quality management systems of mineral raw materials. - 2nd ed., ster. M.: Publishing House of the Moscow State Mining University, 2008. p. 18.
3. E.I. Shemyakin. Dynamic problems of the theory of elasticity and plasticity. Moscow, Lomonosov Moscow State University, NSCGP - IGD named after A.A. Skochinsky, 2007. pp. 6-13.
4. Thierry Bernard, Guy Gagnon. Blasting 1 million tons, 205 meters from a town. Gold and Technology Magazine. 2018. No. 4. pp. 92-98.
5. Thierry Bernard. A new model for realistic 3D blasting simulation. The Globus. 2019. No. 4 (58). p. 122.
6. V.A. Beilin, President of ANO NOIV, N.L. Vyatkin, Executive Director of ANO NOIV, Yu.N. Bolotova, Executive Secretary of the conference. The results of the international conference on explosives, organized by the ANO NOIV. Mining Industry magazine. 2019. No.5. pp. 64-70.
7. O.V. Stagurova. The collapse forecast and high-precision positioning of the excavator bucket are two links of the same chain. Globus. 2021. No.1 (65).q pp. 154-156.
8. A.V. Leshchinsky, E.B. Shevkun. Blasting of blast wells in quarries. Khabarovsk, TOGU Publishing House, 2008, pp. 5-37.
9. T.E. Oates, W. Spiteri. Stemming and best practice in the mining industry: A literature review. The journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. August 2021. C. 415-425.
10. V.A. Sosnin, S.E. Mezheritsky, Yu.G. Pechenev, A.I. Mikhailyukova, A.B. Sevastyanov. Features of the detonation mechanism of emulsion explosives. Bulletin of the Technological University, No.19, 2016, pp. 28-33.
11. Vinogradov, V.N. Industrial evaluation of scattered elements in complex ores. - М.: Nedra, 1972. - 150с.
12. F.A. Avdееv, V.L. Baron, I.L. Bleiman. Production of mass explosions. - Moscow: Nedra, 1977, P. 312.
13. Nguyen Dinh An., Tran Quang Hieu., Do Ngoc Hoan., Tran Dinh Bao., Belin V.A. Analysis and evaluation of research result of experimental blasting at Nui Beo surface coal mine to reduce of ground vibration and air blast near residents. International Conference on Advances in Mining and Tunneling in Vung Tau - VietNam, from 18-24 October 2014. C. 79-82.
14. I.B. Katanov. A model for studying the process of moving rock mass by explosion. Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2016, No.6. pp. 51-53.
15. Kazikaev D.M., Devyaten A.A. Algorithm and solution of the problem of quality management of mined ore in combined mining. Mining information and analytical bulletin (separate articles). 2010. No.9. pp. 8-12q.
16. M.V. Gagulin et al. Investigation of the influence of the depth and diameter of blast holes on the quality of crushing. In the collection: Explosive case, No. 67/24. - М.: Nedra, 1969.
17. Ernesto SALAS GARCIA, Alan D?AZ BUTR?N. Tunnels: Blasting Optimization for advance 100%, with overbreak and underbreak lower than 5%. 2017. URL: <http://dnablast.com/isee-2017-how-to-achieve-100-advance-in-tunnel/?lang=en> (accessed April 23, 2022).
18. Thierry Bernard. The Real Relationship Between Cracks and Vibrations: Are Cracks in Buildings Really Created by Vibrations? 2019. URL: <http://dnablast.com/efee-2019-nueva-tecnologia-para-comprender-el-vinculo-entre-las-grietas-y-vibraciones/?lang=en> (accessed April 23, 2022).
19. Thierry Bernard. 479 Charges, 13 Decks...120 Meters Above a Crushing Plant. 2015. URL: <http://dnablast.com/isee-2015-479-loads-13-decks-120-meters-near-a-crushing-plant/?lang=en> (accessed April 23, 2022).
20. Thierry BERNARD Philippe DOZOLME. New convincing results in the reduction of fines obtained thanks to digital simulation. 2013. URL: http://dnablast.com/wpq-content/uploads/2019/01/TBT_EFEE_-2013_Story_A3LT.pdf (accessed April 23, 2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Левковский Александр Иванович:
аспирант,
кафедра геотехнология освоения недр,
НИТУ МИСИС,
инженер по буро-взрывным работам;
ООО «ДНА-Бласт МСК»,
г. Москва, Россия,
e-mail: zypethewarrid@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Levkovsky Aleksandr Ivanovich:
Postgraduate student,
Department of Geotechnology of Subsurface Development,
NUST MISIS,
drilling and blasting engineer,
LLC «DNA-Blast MSK»,
Moscow, Russia,
e-mail: zypethewarrid@gmail.com



**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Аккредитованная Лаборатория ЭКОН в составе Отдела теории проектирования освоения недр ИПКОН РАН проводит НИР с подготовкой Заключений для предприятий России об опасности взрыва (воспламенения) серной или сульфидной пыли при отработке месторождений колчеданных, антимонитовых и полиметаллических руд.

Направления деятельности:

- ✦ анализ исходных данных и горно-технических условий разработки месторождений;
- ✦ анализ химического состав руд и пород;
- ✦ исследование текстурно-структурного строения керна (или крупнообломочного материала);
- ✦ изучение процессов выделения/поглощения тепла при взаимодействии пыли с нагретыми поверхностями и контакте с ВВ;
- ✦ оценка риска опасности взрыва сульфидной пыли в горных выработках рудника при ведении подземных горных работ
- ✦ разработка технологических мероприятий и рекомендаций для предотвращения взрывов сульфидной пыли и возгорания колчеданных руд и пород.



Подготовленные ранее аналогичные Заключение в составе Отчетов о НИР успешно принимаются в составе проектной документации Главгосэкспертизой.

Контакты:

Адрес: 111020, г. Москва,
Крюковский туп., д.4.
E-mail: geo-science@mail.ru
Тел: +7 (916)087-54-44
Сайт: <https://ипконран.рф/>
<http://labecomine.com/>

