

ОЦЕНКА УРОВНЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА АПАТИТОВЫХ РУДНИКАХ*

Предложена вербальная шкала геодинамических рисков. Проведена оценка величин геодинамического риска для Хибинских апатитовых рудников. На основе значений вероятности возникновения геодинамических явлений определен уровень последствий по имеющейся базе данных геодинамических явлений, официально зарегистрированных комиссиями по горным ударам на рудниках АО «Апатит» за период 1981–2015 гг. Показано, что наибольший ущерб от геодинамических проявлений причиняется горным выработкам, то есть технологическому процессу. Поэтому наряду с прогнозом и оценкой геодинамических рисков первостепенное значение имеют вопросы управления этими рисками.

Ключевые слова: геодинамические риски, апатитовые рудники, горные выработки, техногенное воздействие.

Среди множества проблем современной горнодобывающей промышленности острейшей по-прежнему остается техногенная сейсмичность — горные удары и техногенные землетрясения, которые определяют геодинамические риски. Эта проблема актуальна как для ряда регионов России, так и для многих горнорудных провинций Австралии, ЮАР, Канады, США, Южной Америки и др.

Общее понятие риска включает в себя два четко различимых компонента:

Частота (вероятность) $F(P)$ ожидаемого нежелательного события (аварии), которая выражается числом событий в единицу времени (или безразмерна).

Последствия (ущерб) C , которые являются мерой серьезности нежелательного события (аварии). Последствия могут быть выражены различными показателями: гибелью или причинением ущерба здоровью людей, а так же нарушением технологии производств и соответствующим ущербом.

* Исследования выполнены в рамках гранта по приоритетному направлению деятельности РНФ «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» № 14-17-00751.

Таким образом риск — это функция двух переменных:

$$Риск = f(F, C)$$

где F — частота, C — последствия.

При этом нередко при оценке величины риска ограничиваются значением вероятности реализации негативного события.

В системе Ростехнадзора РФ используется следующие определения рисков и ущерба [1]:

Технический риск — вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта.

Индивидуальный риск — частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий.

Потенциальный территориальный риск — частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории.

Коллективный риск — ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенный период времени.

Социальный риск (или F/N — кривая) — зависимость частоты возникновения событий F , в которых пострадало на определенном уровне не менее N человек. Характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей.

Представляет практический интерес классификация рисков по времени актуализации (реализации) динамического события:

- оперативные риски — период реализации на превышает одного, в крайнем случае, несколько дней (контроль удароопасности инструментальными методами);
- тактические риски — период реализации превышает от нескольких дней до нескольких месяцев, но не более одного года (оценка опасности на крупномасштабных моделях, планах отработки блоков, целиков);
- стратегические риски — период реализации превышает несколько месяцев и может иметь продолжительность до нескольких и более лет (оценка опасности на мелкомасштабных моделях при перспективном планировании).

Для горнодобывающего предприятия наиболее употребительным нормативным показателем риска является индивидуальный риск, характеризующий частоту аварий со смертельным исходом. При анализе рисков используется принцип при-

емлемого риска, согласно которому «спектр» риска разбивают на три области в соответствии с принципом светофора [2]: «красная» область — недопустимый риск, «желтая» область — приемлемый риск, «зеленая» область — пренебрежимый риск.

Принятые в сфере геодинамической безопасности классификации и показатели риска носят в основном качественный характер. Уровни геодинамического риска, в зависимости от возможного геодинамического явления, этапа развития опасной ситуации, описания возможного опасного процесса — подразделяются на «низкий», «средний», «высокий».

Это объясняется сложностью физического процесса формирования очага и реализации динамического явления, большим числом взаимно влияющих факторов и трудностью математической формализации для определения количественных параметров уровня опасности. Поэтому достаточно широко применяются в промышленности вербальные оценки уровня риска, например в [1, 3–5].

В табл. 1 приведена вербальная шкала геодинамических рисков, различающихся по масштабу последствий при их реализации. Следует обратить внимание на то, что горно-тектонический удар и техногенное землетрясение по мощности проявления и тяжелым последствиям представляют собой катастрофу [3, 4]. В отечественной литературе не обозначена четкая граница между этими двумя явлениями, но за рубежом отношение к ним неоднозначное в разных странах. Так, например, в материалах Австралийского центра геомеханики есть упоминание о том, что техногенное землетрясение может и не сопровождаться разрушением горных выработок [4].

Следует отметить, что геодинамическое явление может и не приводить к разрушениям горных выработок, но наличие таких

Таблица 1
Вербальная шкала геодинамических рисков в рудниках

Характеристика геодинамических явлений	Этап развития опасной ситуации	Уровень геодинамического риска
Шелушение, стреляние, динамическое заколообразование	угроза	низкий
Микроудар	инцидент	низкий
Горный удар	авария	средний
Горно-тектонический удар, техногенное землетрясение	катастрофа	высокий

событий однозначно свидетельствует об опасности для ведения горных работ.

Совершенно очевидно, что последствия геодинамического явления для рудника будут определяться не только мощностью события, но и координатами очага [6]. При достаточно удаленном от горных работ очаге будет иметь место толчок, звук и сотрясение от которого будут определяться энергией события; при расположении очага вблизи горных работ будет иметь место горно-тектонический удар в его общепринятой формулировке. То есть имеет место влияние различных факторов, которые необходимо учитывать при оценке риска:

1. Чем дальше зона геодинамической активности удалена от зоны влияния фронта очистных работ, тем меньше вероятность разрушения выработок. Если выработка находится на расстоянии меньше 50 м от фронта очистных работ, то под воздействием приближающегося фронта могут создаваться условия концентрации напряжений на данном участке, что в свою очередь может привести к реализации динамических событий в массиве горных пород вблизи контура выработки, а соответственно и к нарушению ее устойчивости.

2. Чем дальше зона геодинамической активности удалена от зоны влияния разрывного нарушения, тем меньше вероятность разрушения выработок, находящихся в этой зоне. При приближении горных работ к разрывному нарушению на расстояние меньше 50 м могут создаются условия концентрации напряжений на данном участке, что может привести к реализации динамических событий вблизи контура выработки. В этом случае необходим учет зоны влияния разрывного нарушения, поскольку эта зона переходит в зону региональной сейсмической опасности.

3. Чем дальше выработка удалена от зоны геодинамической активности, тем меньше вероятность ее разрушения в случае динамических проявлений горного давления. Ориентировочно минимальное безопасное расстояние гипоцентра геодинамического явления в Хибинском массиве от контура незакрепленной выработки для разных энергетических диапазонов этих явлений соответствует: 10^6 Дж — 100 м; 10^7 Дж — 200 м; 10^8 Дж — 400 м.

В соответствии с изложенными принципами проведена оценка геодинамического риска для Хибинских апатитовых рудников.

Породы и руды апатитовых месторождений в зависимости от предела прочности при сжатии подразделяются на различные

категории прочности (степени крепости от «высшей степени крепких» до «очень слабых»). Также породы и руды классифицируются по интенсивности трещиноватости и, в зависимости от категорий прочности и трещиноватости — по устойчивости. На этой основе разработана классификация состояний горных выработок, где каждой категории состояния поставлен в соответствие качественный (вербальный) показатель уровня геодинамического риска [6].

Основными параметрами количественных показателей опасных геодинамических явлений являются: местоположение очага, магнитуда, интенсивность (сила) колебаний, сейсмическая энергия, площадь и/или объем разрушений, экономический ущерб, на основе которого предложены различные классификации геодинамических явлений [7].

Для оценки уровня геодинамического риска в условиях апатитовых рудников рассчитана вероятность возникновения геодинамического явления и определена степень последствий по имеющейся базе данных геодинамических явлений, официально зарегистрированных комиссиями по горным ударам на рудниках АО «Апатит» за период 1981–2015 гг. На рис. 1 показано распределение количества этих событий в течение всего рассматриваемого периода.

Представленные данные демонстрируют отклик массива на техногенное воздействие. Провалы в регистрации явлений объясняются различными технологическими (корректировкой технологии отработки месторождений и замедлением ведения горных работ в этот период), социальными и экономическими факторами, которые здесь не анализируются.

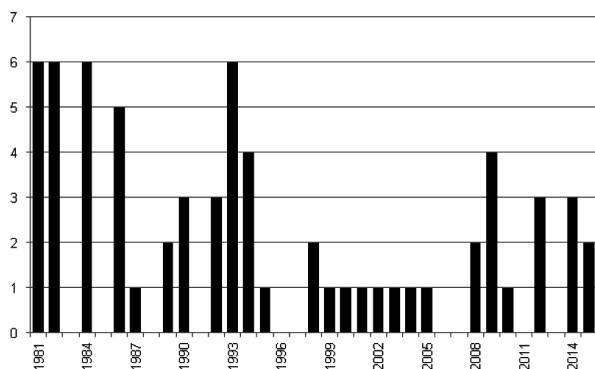


Рис. 1. Распределение количества геодинамических явлений в период 1981–2015 гг.

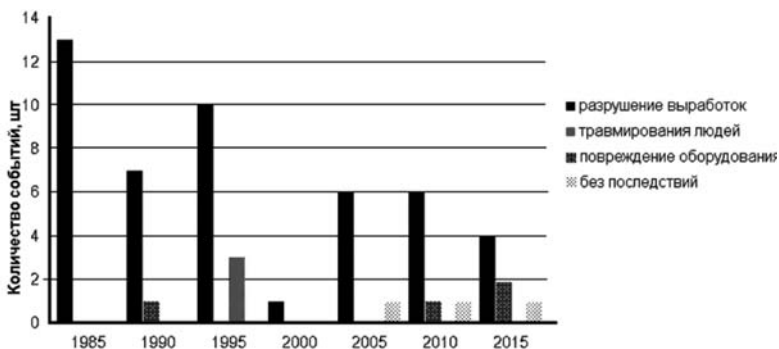


Рис. 2. Распределение количества различных последствий геодинамических явлений

За рассматриваемый временной период было зарегистрировано 67 различных геодинамических явлений, сопровождавшихся в разной степени разрушением выработок, повреждением оборудования, травмированием людей и случаями, обошедшимися без последствий. Анализ выполнен на основе 54 событий, по которым имеется исчерпывающая информация по всем актуальным параметрам (рис. 2).

Вероятности проявления последствий геодинамического события рассчитывались по следующим формулам:

1) вероятность разрушения выработок P_{bw} :

$$P_{bw} = (N_{bw} \cdot L_{bw}) / L_w,$$

где N_{bw} — количество зарегистрированных событий; L_{bw} — длина разрушенной зоны; L_w — общая длина выработок.

2) вероятность повреждения оборудования P_{be} :

$$P_{be} = N_{be} / (T \cdot N_e),$$

где N_{be} — количество зарегистрированных событий; T — временной период; N_e — общее количество оборудования, находящихся в выработках.

3) вероятность травмирования людей P_{bm} :

$$P_{bm} = N_{bm} / (T \cdot N_m),$$

где N_{bm} — количество зарегистрированных событий; T — временной период; N_m — общее количество людей, находящихся в выработках

4) вероятность отсутствия последствий P_w :

$$P_w = N_w / T,$$

Таблица 2

*Результаты статистического анализа последствий
геодинамических явлений*

Вре- менной период, лет	Всего собы- тий, шт.	Разру- шение выра- боток, шт.	Риск на- ступления события для 1 м ³ выработ- ки в год	Повреж- дение обору- дования, шт.	Риск на- ступления собы- тия в год	Трав- миро- вание людей, чел.	Риск на- ступления собы- тия в год	Без по- след- ствий	Риск на- ступления собы- тия в год
35	54	51	$9 \cdot 10^{-8}$	4	$3 \cdot 10^{-7}$	4	$6 \cdot 10^{-8}$	4	$6 \cdot 10^{-8}$
30	49	43	$9 \cdot 10^{-8}$	2	$2 \cdot 10^{-7}$	3	$5 \cdot 10^{-8}$	2	$4 \cdot 10^{-8}$
25	41	37	$9 \cdot 10^{-8}$	1	$1 \cdot 10^{-7}$	3	$7 \cdot 10^{-8}$	1	$2 \cdot 10^{-8}$
20	34	31	$9 \cdot 10^{-8}$	1	$1 \cdot 10^{-7}$	3	$8 \cdot 10^{-8}$	0	0
15	3	30	$1 \cdot 10^{-7}$	1	$2 \cdot 10^{-7}$	3	$1 \cdot 10^{-7}$	0	0
10	23	20	$1 \cdot 10^{-7}$	1	$3 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	0
5	12	12	$1 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	0	0	0

где N_w — количество зарегистрированных событий; T — рассмат-
риваемый временной период.

При этом значения вероятностей и рисков наступления по-
следствий события рассчитывались за год, а для последствий в
виде разрушения выработок — на 1 м³ выработки в год.

В табл. 2 приведены значения вероятности возникновения
определенного класса последствий геодинамических явлений
для разных временных диапазонов, где диапазон 5 лет равен
временному периоду с 1981 по 1985 гг., 10 лет — с 1981 по 1990 гг. и т.п.

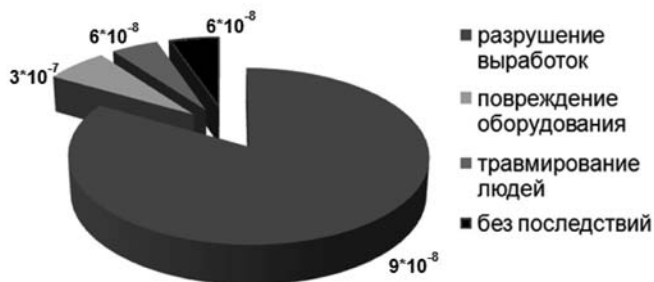


Рис. 3. Распределение значений риска основных последствий геодинамических явлений за период с 1981 по 2015 гг.

Из представленных в табл. 2 расчетных значений видно, что величины вероятностей весьма малы и уровень риска зависит не только от общего рассматриваемого периода наблюдений, но и от временных диапазонов его слагающих. Но в целом рассчитанный уровень индивидуального риска при возникновении геодинамического явления и реализации его негативных последствий для апатитовых рудников весьма низок и находится в диапазоне значений пренебрежимого уровня индивидуального риска 10^{-7} – 10^{-8} в год, находящемся в основном в зеленой области светофора.

На диаграмме (рис. 3) показаны результаты проведенной оценки риска по последствиям геодинамических явлений с их значениями вероятностей.

Приведенные данные показывают, что основной ущерб от геодинамических явлений заключается в различной степени нарушения горных выработок, при этом на остальные последствия приходится менее десяти процентов. То есть в этом случае геодинамический риск можно классифицировать как технологический.

Представляется интересным и полезным обратиться к соответствующему зарубежному опыту. Уровень смертельного риска между 1:1000 и 1:10000 соответствует максимальному уровню приемлемого риска, используемого большинством инструкций [8]. Последнее значение соответствует утверждению Вонга: «Общепринято, что риски, которые имеют коэффициент возникновения смертельных случаев 10×10^{-5} или больше, являются неприемлемыми» [5]. Приемлемые уровни индивидуального риска по данным Эриксона (для риска, связанного с хранением взрывчатых веществ в Норвегии), составляют 2×10^{-5} /год, 2×10^{-6} /год и 2×10^{-7} /год для тех работников, которые прямо подвергаются рискам, для тех, кто подвергается риску косвенно, и для тех, кто не подвергаются риску, соответственно [9]. То есть величина индивидуального геодинамического риска на апатитовых рудниках соответствует мировому уровню.

Таким образом геодинамические риски всегда имеют место при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород.

Расчеты индивидуального риска за рассматриваемый период на основе имеющегося статистического материала для условий горнотехнических систем апатитовых рудников показали, что уровень индивидуального риска при возникновении геодинамического явления и реализации его негативных последствий

весьма низок и находится в диапазоне 10^{-7} – 10^{-8} в год, который относится к значениям пренебрежимой величины, то есть находящимся в зеленой области светофора. При этом установлено, что наибольший ущерб от геодинамических проявлений причиняется горным выработкам, то есть технологическому процессу. Поэтому наряду с прогнозом и оценкой геодинамических рисков первостепенное значение имеют вопросы управления этими рисками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов*, РД 03-418-01, утверждено Постановлением Госгортехнадзора России от 10 июля 2001 г. № 30.
2. *To Choose or to Loose. National Environmental Policy Plan. The Netherlands* // The Netherlands SDU Publishers, 1988.
3. *Козырев А. А., Мальцев В. А., Федотова Ю. В., Панин В. И., Рыбин В. В., Семенова И. Э., Константинов К. Н. и др.* Указания по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам (Хибинские апатит-нефелиновые месторождения). – Апатиты-Кировск, 2010. – 117 с.
4. *Опарин В. Н.* Методы и системы сейсмодетекционного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов, том 1 / Отв. ред. Н. Н. Мельников; РАН, Сиб. Отделение, Ин-т горного дела. – Интеграционные проекты СО РАН; вып. 24 – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 304 с.
5. *Wong W.* How did that happen? Engineering safety and reliability, Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmonds, UK, 2005.
6. *Козырев А. А., Панин В. И., Федотова Ю. В.* Проблемы безопасности при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород // Записки Горного института. – 2012. – Т. 198. – С. 150–156.
7. *Коллектив авторов.* Сейсмичность при горных работах. – Апатиты: КНЦ РАН, 2002. – 325 с.
8. *Tweede Kamer.* National Environmental Policy Plan, the Hague: SDU Publishers, 1988–1989.
9. Eriksen, H-J. Fires and explosions – causes, effects and prevention. Health and Safety in Norwegian Tunnelling Society. – 2004. – №. 13. – P. 19–21. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Федотова Юлия Викторовна*¹ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: julia@goi.kolasc.net.ru,
*Панин Виктор Иванович*¹ – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник,
e-mail: trout@goi.kolasc.net.ru,

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН.

ESTIMATION OF GEODYNAMIC SAFETY IN APATITE MINES

A verbal scale of geodynamic risks has been proposed. Magnitudes of geodynamic risks for the Khibiny apatite mines have been estimated. Based on values of probable occurrence of geodynamic events a level of consequences has been determined according to the database with geodynamic events which had been officially registered in JSC Apatit mines by rockburst commissions for 1981 – 2015. It has been shown that the largest damage by geodynamic events is inflicted on mining excavations, i.e. on a technological process. That is why, besides forecast and assessment of geodynamic risks, the tasks of risks control are of primary importance.

Key words: geodynamic risks, apatite mines, mining, anthropogenic impact.

AUTHORS

*Fedotova Yu.V.*¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: fjulia@mail.ru,
*Panin V.I.*¹, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher,
e-mail: trout@goi.kolasc.net.ru,

¹ Mining Institute of Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.

REFERENCES

1. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu analiza riska opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov, RD 03-418-01*, utverzhdeno Postanovleniem Gosortekhnadzora Rossii ot 10 iyulya 2001 g. no 30 (Methodical guidance for analyzing risk of hazardous industrial objects. RD 03–418-01, approved by State Committee for Supervision of Safe Working Practices in Industry and for Mine Supervision, 10.07.2001, no 30).
2. *To Choose or to Loose. National Environmental Policy Plan*. The Netherlands. The Netherlands SDU Publishers, 1988.
3. Kozyrev A.A., Mal'tsev V.A., Fedotova Yu.V., Panin V.I., Rybin V.V., Semenova I.E., Konstantinov K.N. *Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na mestorozhdeniyakh, sklonnykh i opasnykh po gornym udaram (Khibinskie apatit-nefelinovyie mestorozhdeniya)* (Guidance for safe mining in rockburst-prone and rockburst-hazardous deposits (Khibiny apatite-nepheline deposits)). Apatity–Kirovsk, 2010, 117 p.
4. Oparin V.N. *Metody i sistemy seysmodeformatsionnogo monitoringa tekhnogennykh zemletryaseniy i gornykh udarov*, tom 1. Otv. red. N.N. Mel'nikov; RAN, Sib. Otdelenie, In-t gornogo dela. Integratsionnye proekty SO RAN; vyp. 24 (Methods and systems of seismic deformation monitoring of mining-induced earthquakes and rockbursts, vol. 1. Mel'nikov N.N. (Ed.), Russian Academy of Sciences, sibirian Branch, Institute of mining. Integration projects SB RAS; issue 24), Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2009, 304 p.
5. Wong W. *How did that happen? Engineering safety and reliability*. Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St Edmonds, UK, 2005.
6. Kozyrev A.A., Panin V.I., Fedotova Yu. V. *Zapiski Gornogo instituta*. 2012, vol. 198, pp. 150–156.
7. Group of authors. *Seysmichnost' pri gornykh rabotakh* (Seismicity in mining). Apatity, KNTs RAN, 2002, 325 p.
8. Tweede Kamer. *National Environmental Policy Plan*, the Hague: SDU Publishers, 1988–1989.
9. Eriksen H-J. Fires and explosions causes, effects and prevention. *Health and Safety in Norwegian Tunnelling Society*. 2004, no 13, pp. 19–21.