

УДК 622.831.32:004.94

**Ломов Михаил Андреевич**

младший научный сотрудник,  
Институт горного дела ДВО РАН,  
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51  
e-mail: [9241515400@mail.ru](mailto:9241515400@mail.ru)

**Сидляр Александр Владимирович**

научный сотрудник,  
Институт горного дела ДВО РАН  
e-mail: [alex-igd@mail.ru](mailto:alex-igd@mail.ru)

**ОЦЕНКА ФАКТОРОВ УДАРООПАСНОСТИ  
НИКОЛАЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ  
3D МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО  
МОНИТОРИНГА**

**Аннотация:**

Исследование свойств и состояния природно-технических систем требует проведения междисциплинарных исследований, подразумевающих обработку и совместный анализ различных данных, а также работу с инструментальными сетями наблюдений, измерительными системами и т.д., что требует разработки эффективных алгоритмов, технологий и высокопроизводительных компьютерных систем для работы с разнородными наборами научных данных, которые должны обеспечить комплексное решение задач по сбору, интеграции и обработке больших объемов информации.

В этой связи представляется весьма актуальной постановка научно-исследовательской работы, направленной на развитие научно-методических основ и технических средств оценки и мониторинга опасных геомеханических процессов для снижения риска техногенных катастроф при освоении месторождений полезных ископаемых.

В целях установления основных факторов, определяющих проявления удароопасности и техногенной сейсмичности на глубоких горизонтах Николаевского месторождения проведены исследования, заключающиеся в сопоставлении результатов сейсмоакустического мониторинга с геологическими особенностями Николаевского месторождения, с использованием 3D модели.

Данный способ отличается от известных тем, что в нем используются прямые измерения исследуемых характеристик.

Для проведения исследований построены детальные карты изогипс и изопакит контуров четырех основных геологических пород, которые отражают современную глубинную архитектуру основных горизонтов Николаевского месторождения и имеют разные физико-механические характеристики.

Основываясь на проведенной работе, можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим удароопасность глубоких горизонтов Николаевского месторождения, является приуроченность ведения горных работ к тектоническим структурам.

**Ключевые слова:** геомеханика, горное давление, напряженное состояние, горные удары, прогноз, методы, контроль, 3D моделирование..

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.064

**Lomov Mikhail A.**

Junior Researcher, Mining Institute, Far Eastern Branch of RAS, 680000 Khabarovsk, 51 Turgenev Str.  
e-mail: [9241515400@mail.ru](mailto:9241515400@mail.ru)

**Sidlyar Alexander V.**

Researcher,  
Mining Institute, Far Eastern Branch of RAS  
e-mail: [alex-igd@mail.ru](mailto:alex-igd@mail.ru)

**ESTIMATION OF ROCKBURST HAZARD  
FACTORS OF THE NIKOLAEV DEPOSIT  
WITH THE USE OF 3D MODELLING  
RESULTS OF SEISMOACOUSTIC  
MONITORING**

**Abstract:**

The study of the properties and state of natural and technical systems requires interdisciplinary research involving the processing and joint analysis of various data, as well as working with instrumental observation networks, measurement systems, etc. This requires the development of efficient algorithms, technologies, and high-performance computer systems to work with heterogeneous volumes of scientific data, which should provide a comprehensive solution to the problems of collecting, integrating and processing large amounts of information.

In this regard, it is very relevant to formulate research work aimed at developing scientific and methodological foundations and technical means for assessing and monitoring dangerous geomechanical processes to reduce the risk of man-made disasters in the development of mineral deposits.

In order to establish the main factors that determine the manifestations of rock bump danger and technogenic seismicity in the deep horizons of the Nikolaevsky field, studies were conducted which consist in comparing the results of seismic and acoustic monitoring with the geological features of the Nikolaevsky field, with the use of 3D models.

This method differs from the known ones because it uses direct measurements of the studied characteristics.

Detailed maps of isohypse and isopachyte contours of the four main geological rocks, which reflect the modern deep architecture of the main horizons of the Nikolaevsky field and have different physical and mechanical characteristics, were constructed for the research.

Based on the work carried out, we can conclude that the main factor determining the rock bump danger of the deep horizons of the Nikolaevsky field is the timing of mining operations to tectonic structures.

**Key words:** geomechanics, mountain pressure, stress state, mountain impacts, forecast, methods, control, 3D modeling.

### Введение

На Николаевском месторождении с 2011 г. зарегистрировано более 250 случаев динамических проявлений горного давления в различных формах: от стрельяния пород до собственно горных и горно-тектонических ударов. За счет применения методов и средств геомеханического мониторинга и своевременного проведения разгрузочных мероприятий на месторождении «Николаевское» в 2013 г. удалось значительно уменьшить количество динамических проявлений по сравнению с 2011 – 2012 гг. Несмотря на достигнутые в 2013 г. положительные результаты, в последующие годы на Николаевском месторождении наблюдалось качественное изменение и усложнение геомеханической ситуации (рис. 1).

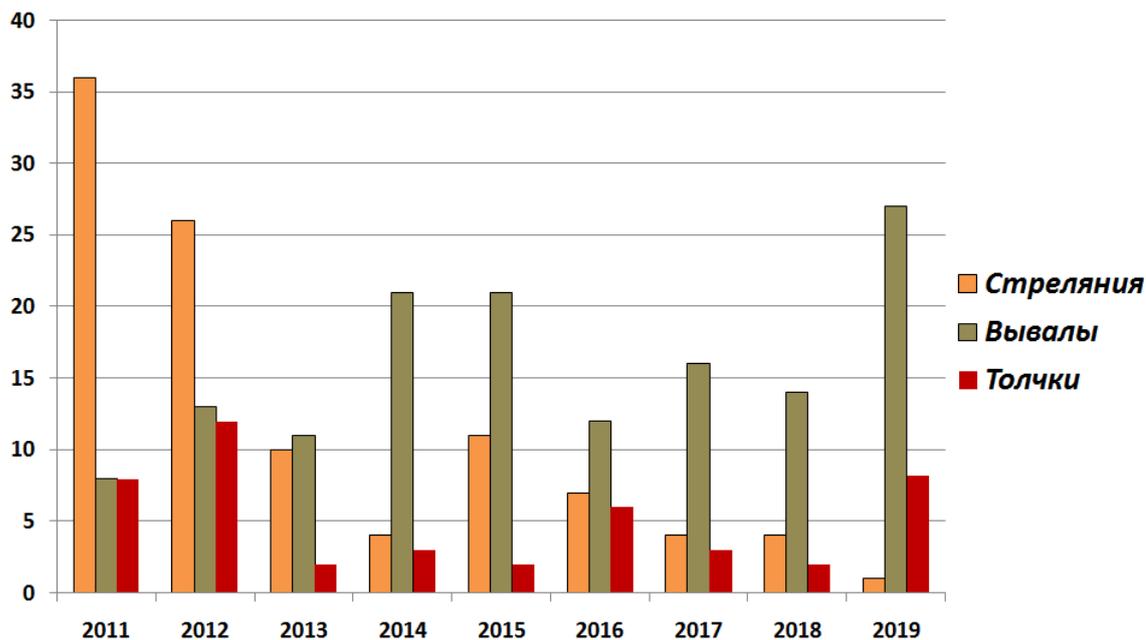


Рис. 1. Распределение количества динамических проявлений горного давления (толчки, стрельяния, вывалы) на месторождении «Николаевское» в 2011 – 2019 гг.

Начиная с октября 2015 г. на Николаевском месторождении зарегистрирован целый ряд крупных геодинамических явлений, включая серию событий в период с 5 октября по 7 октября 2015 г. Наиболее сильное геодинамическое явление, которое может классифицироваться как горно-тектонический удар, произошло 5 октября 2015 г. в 9 часов 45 минут в районе блока Север-8 (координаты эпицентра  $X=57550$  м;  $Y=77300$  м;  $Z=-390$  м) и сопровождалось сейсмическими эффектами, разрушениями участков выработок (объемы выброшенной породы изменялись от первых кубических метров до  $18 \text{ м}^3$ ), проявляющимися в пределах всей нижней части месторождения от гор. -220 м до гор. -420 м. В течение нескольких часов после горно-тектонического удара в подземных горных выработках наблюдались мощные звуковые проявления, щелчки и треск в массиве, падение заколов на различных участках на гор. -360, -380, -390, -406, -420 м рудника. К числу наиболее характерных динамических проявлений горного давления относятся: выброс  $13 \text{ м}^3$  горной массы с бортов и кровли штрека Транспортный 8 на гор. -406 м; выброс  $4 \text{ м}^3$  породы из бортов и кровли штрека Вскрывающий 1 на гор. -360 м с нарушением крепления; выброс  $15 \text{ м}^3$  породы на участке сопряжения штрека Транзитный 5-2 блока 40 с вентиляционной сбойкой и другие проявления.

Для проведения исследований построены детальные карты изогипс и изопахит контуров четырех основных геологических пород, которые отражают современную

глубинную архитектуру основных горизонтов Николаевского месторождения и имеют разные физико-механические характеристики.

Наиболее информативными оказались карты, отражающие морфологические особенности верхних (вмещающих рудное тело Харьковское) и нижних (вмещающих рудное тело Восток) метасоматитов, а также карта изогипс кровли олистолита известняков. Кровля олистолита представлена на рис. 2.

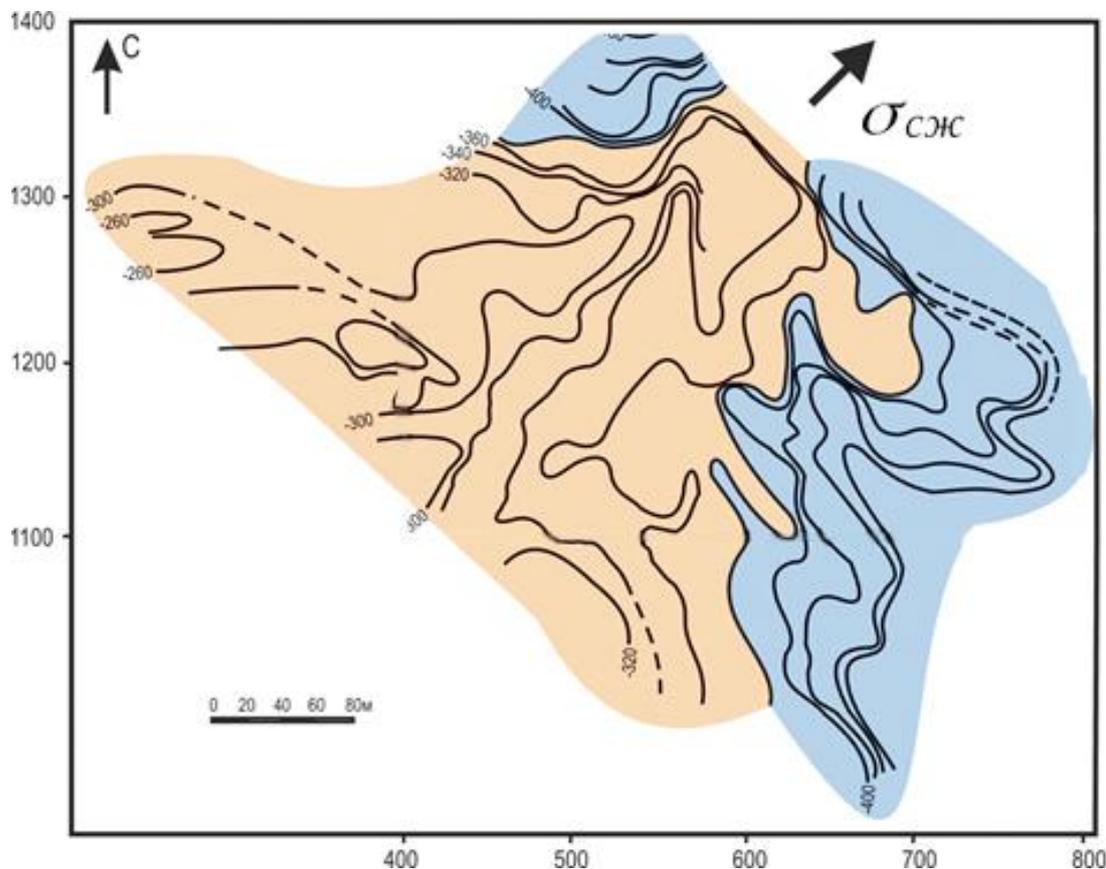


Рис. 2. Схематическая карта изогипс кровли крупного олистолита известняков

Сложность решения проблемы предупреждения природных и техногенных катастроф при интенсивном природопользовании связана с многофакторностью условий и причин возникновения катастрофических событий, значительными вариациями свойств и состояния геосфер, отсутствием надежных критериев и предвестников опасных динамических явлений.

Современный научный подход к решению этой проблемы заключается в моделировании процессов, позволяющих адекватно описывать состояние изменяющихся природно-технических систем с последующей верификацией результатов теоретических исследований инструментальными методами. Еще больший эффект приносит совместное применение натуральных и теоретических методов, объединенных общей идеологией и максимально адаптированных к условиям решаемой задачи, что обеспечивает непрерывный многопараметрический мониторинг геофизических полей и процессов в геосферах [1 – 5].

В свою очередь исследование свойств и состояния природно-технических систем требует проведения междисциплинарных исследований, подразумевающих обработку и совместный анализ различных данных, а также работу с инструментальными сетями наблюдений, измерительными системами и т.д. Это требует разработки эффективных алгоритмов, технологий и высокопроизводительных компьютерных систем для работы с разнородными наборами научных данных, которые должны обеспечить ком-

плексное решение задач по сбору, интеграции и обработке больших объемов информации [6].

В этой связи представляется весьма актуальной постановка научно-исследовательской работы, направленной на развитие научно-методических основ и технических средств оценки и мониторинга опасных геомеханических процессов для снижения риска техногенных катастроф при освоении месторождений полезных ископаемых [7].

На данное время специализированные программные комплексы представляют результаты сейсмоакустического мониторинга в табличном виде или графическом (плоские карты и полноценные 3D модели).

Как показывает опыт работы горнодобывающих предприятий, предпочтение отдается системам с графическим представлением результатов [8 – 15].

В ходе данной работы полученные контуры изогипс четырех основных геологических контуров пород были перенесены в среду AutoCAD. Результатом стала 3D-модель (рис. 3), которая использовалась для сопоставления с результатами сейсмоакустического мониторинга.

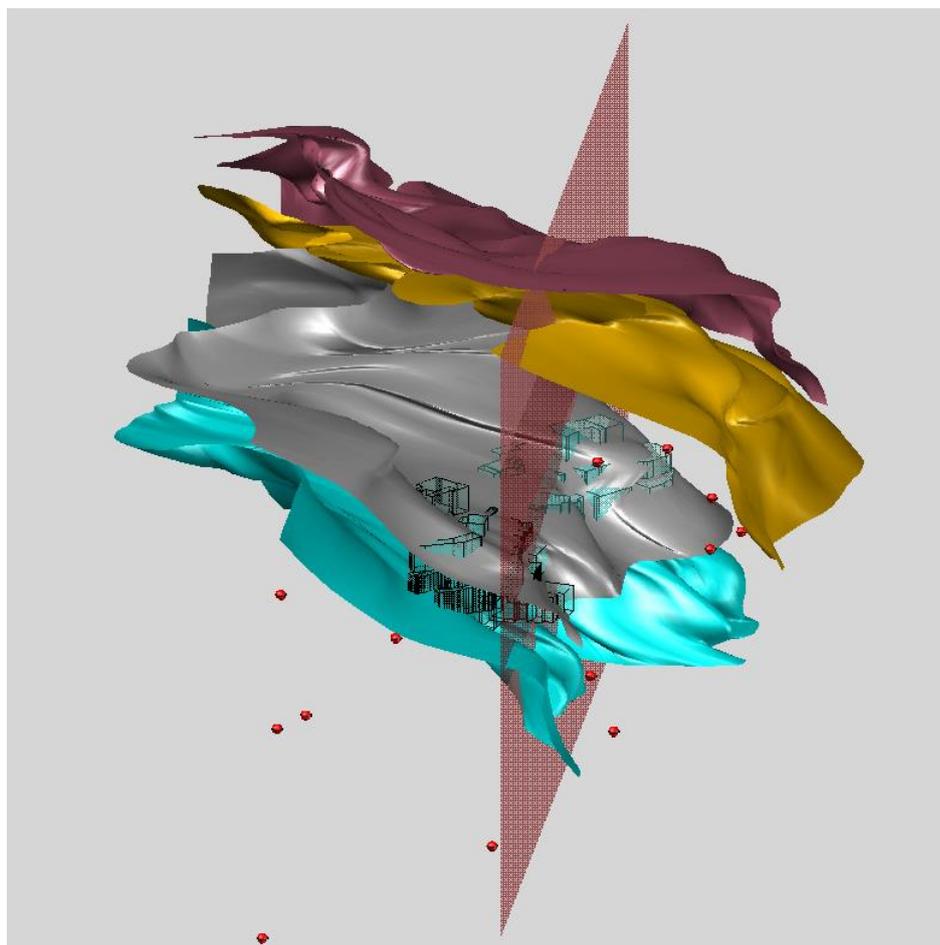


Рис. 3. 3D-модель поверхностей основных геологических пород глубоких горизонтов Николаевского месторождения (красная плоскость – тектонический разлом, красные точки – толчки)

#### *Анализ факторов удароопасности Николаевского месторождения*

В целях установления основных факторов, определяющих проявления удароопасности и техногенной сейсмичности на глубоких горизонтах Николаевского месторождения проведены исследования, заключающиеся в сопоставлении результатов сей-

смакустического мониторинга с геологическими особенностями Николаевского месторождения, используя 3D модели.

Результаты анализа данных показали, что подавляющее большинство зарегистрированных толчков (18 толчков, 37 %) расположены в непосредственной близости (от 1 до 10 м) к контурам кровли крупной пластины известняков. Размер крупной пластины (олистолита) известняков составляет  $1800 \times 700 \times 300$  м. На рис. 4 представлено расположение зарегистрированных с 2011 по 2020 г. толчков вокруг 3D-модели кровли олистолита известняков.

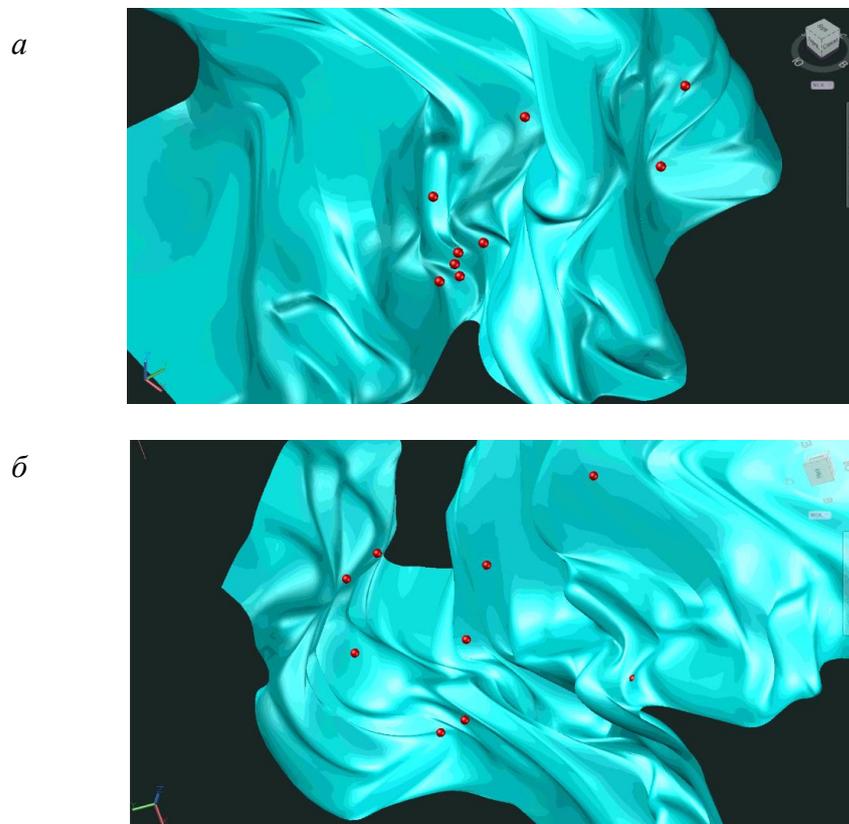


Рис. 4. Расположение зарегистрированных с 2011 по 2020 г. толчков вокруг 3D-модели кровли олистолита известняков:  
*а* – вид сверху, *б* – вид снизу

Крупная пластина известняков выступает в структуре Николаевского месторождения в качестве главной физико-механической неоднородности геологической среды рудного поля, морфологические особенности которой определяют общую структуру месторождения и направление ее активизации в современный период [16].

Таким образом, благодаря созданной 3D модели мы определили то, что основным фактором, определяющим удароопасность глубоких горизонтов Николаевского месторождения, является приуроченность ведения горных работ тектоническим структурам. В 91 % случаев формирование удароопасных ситуаций происходит на пересечении их с контурами очистных блоков или кровлей олистолита известняков.

Геодинамически активный в настоящее время периферийный район олистолита, кроме того, характеризуется наличием ущелий в рельефе кровли северо-западного направления, а также увеличением градиента погружения ее абсолютных отметок. Изложенное выше свидетельствует об увеличении мелкоблоковости строения тела олистолита по направлению к периферической зоне, что обуславливает повышение удароопасности в юго-западном направлении с понижением глубины отработки [17, 18].

По результатам изучения данных регистрации крупных динамических проявлений горного давления установлено, что 89 % из них (43 толчка) приурочены к элементам тектонической структуры; 51 % (24 толчка) зарегистрированы на пересечении с разломом ТН-3; 17 % (8 толчков) – вдоль разлома ТН-2; 15 % (7 толчков) – в районе дайковых тел и 6 % (3 толчка) – у Северо-западных нарушений блока Крайний. Координаты оставшихся 11 % (5 толчков) не принадлежат элементам тектонической структуры и располагаются в массиве горных пород (рис. 5).

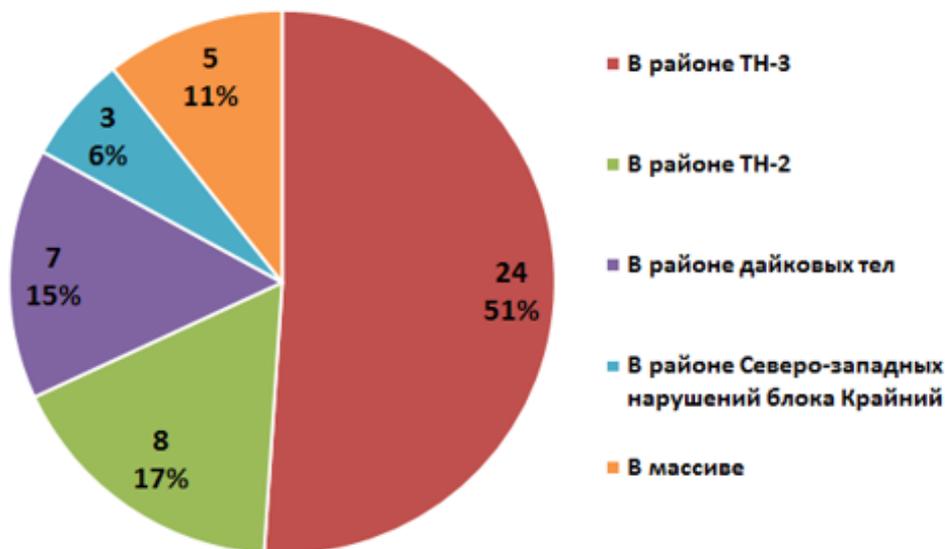


Рис. 5. Диаграмма приуроченности зарегистрированных толчков к элементам тектонической структуры Николаевского месторождения

К ходе изучения принадлежности расположения толчков к геологическим контурам пород выявлено, что 37 % от общего количества (18 толчков) расположены в непосредственной близости (от 1 до 10 м) к контурам кровли олистолита известняков (рис. 6).

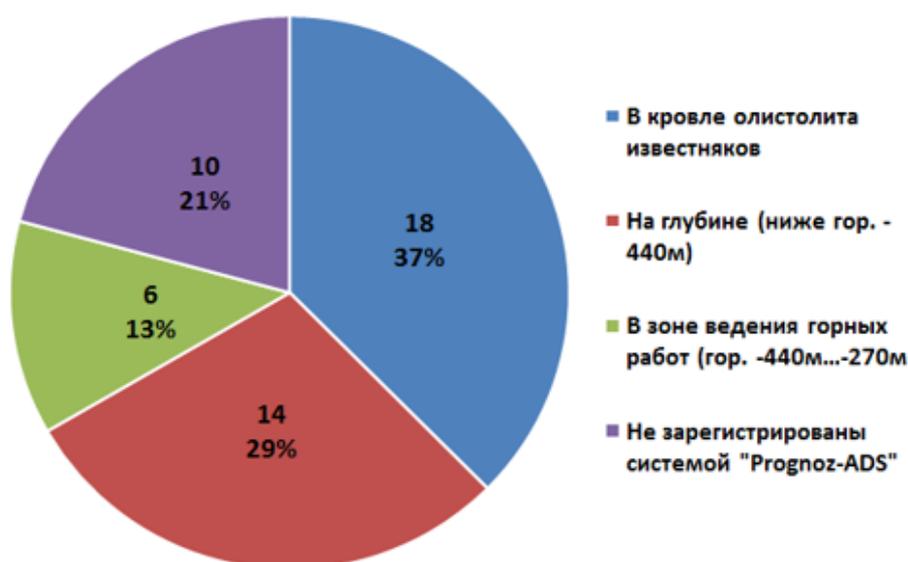


Рис. 6. Диаграмма приуроченности зарегистрированных толчков к геологическим контурам кровли олистолита известняков

### Заключение

По результатам изучения геолого-структурных особенностей скарново-полиметаллического месторождения Николаевское построена 3D-модель контуров основных геологических пород, позволяющая более надежно интерпретировать данные сейсмоакустического мониторинга, отражающего геомеханические процессы в разрабатываемом массиве горных пород.

Данный способ отличается от известных тем, что в нем используются прямые измерения исследуемых характеристик. В этой связи можно предположить, что погрешности измерений будут меньше, а достоверность выше, тем самым предотвратив как можно большее количество чрезвычайных ситуаций на горных предприятиях. К достоинствам способа можно отнести также снижение влияния человеческого фактора.

Основываясь на проведенной работе, можно сделать вывод, что основным фактором, определяющим удароопасность глубоких горизонтов Николаевского месторождения, является приуроченность ведения горных работ к тектоническим структурам. В 91 % случаев формирование удароопасных ситуаций происходит на пересечении их с контурами очистных блоков или кровлей олистолита известняков.

### Список литературы

1. Петухов И.М., Батугина И.М., 1996. *Геодинамика недр*. М.: Недра, 217 с.
2. Усиков В.И., 2011. 3D-модели рельефа и строение верхней части земной коры Приамурья. *Тихоокеанская геология*, № 6, С. 14–33.
3. Ахметсафина Р.З., 2016. Локация акустического источника в однородной среде. *Робототехника и техническая кибернетика*, № 2, С. 52 – 55.
4. Zhang F., Yang Y., Pahlavan L., 2020. Evaluation of Acoustic Emission Source Localization Accuracy in Concrete Structures. *Structural Health Monitoring*, № 6, P. 2063-2074.
5. Рассказов И.Ю., Мигунов Д.С., Гладырь А.В., Макаров В.В., Аникин П.А., Искра А.Ю., Желнин Д.О., Сидляр А.В., 2014. Совершенствование технических средств локального контроля удароопасности при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S4-2, С. 22 - 30.
6. Мельников Н.Н., Калашник А.И., Калашник Н.А., Запорожец Д.В. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, 2018, № 4, С. 3-10.
7. Шабаров А.Н., Цирель С.В., Морозов К.В., Рассказов И.Ю., 2017. Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах. *Горный журнал*, № 9, С. 59 - 64.
8. Lomov M., 2020. 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the nikolaevskoye field. *Paper presented at the E3S Web of Conferences, 8th International Scientific Conference on Problems of Complex Development of Georesources*, PCDG; Khabarovsk, 2020, Volume 192, doi:10.1051/e3sconf/202019204008.
9. Беспалько А.А., Яворович Л.В., Моисеев С.В., 2012. Исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород методом ИК-радиометрии. *Вестник науки Сибири*, № 3 (4).
10. Grobe C.U., Reinhardt H.W., 1999. Development of a Procedure for Automated Localization of Acoustic Emission Sources, *Materialpruefung*, № 9, P. 342–347.
11. Shan-chao Hu, Yun-liang Tan, Jian-guo Ning, Wei-Yao Guo, Xue-sheng Liu, 2017. Multiparameter Monitoring and Prevention of Fault-Slip Rock Burst. *Shock and Vibration*, China, Vol. 2017.

12. Суханов В.И., 2020. Компьютерный анализ содержания горной энциклопедии. *Проблемы недропользования*, № 1 (24), С. 113-119. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.01.113

13. Саммаль А.С., Анциферов С.В., Павлова Н.С., 2018. Математическое и компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния горного массива, сложенного двумя типами пород, в окрестности напорной круговой выработки. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 7, С. 37 - 44.

14. Лукичев С.В., Наговицын О.В., Свинин В.С., Ивановский Е.В., Белоусов В.В., 2001. Автоматизация маркшейдерских работ в системе моделирования объектов горной технологии geotech-3d на ОАО "Апатит". *Маркшейдерский вестник*, № 4, С. 64 - 68.

15. Мальцев М.С., Терпугов В.Н., 2011. Компьютерное 3d геометрическое и конечно-элементное моделирование на параллельных вычислительных системах многослойной среды горного массива. *Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика*, № 5 (9), С. 158 - 162.

16. Potapchuk M.I., Kursakin G.A., Sidlyar A.V., 2014. Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of eastern primorye. *Eurasian Mining*, № 1, С. 18-22.

17. Потапчук М.И., Рассказов И.Ю., Потапчук Г.М., Сидляр А.В., Рассказов М.И., 2011. Прогнозная оценка геодинамической опасности при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения. *Проблемы комплексного освоения георесурсов: Материалы IV Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых*, С. 110-118.

18. Рассказов И.Ю., Потапчук М.И., Курсакин Г.А., Болотин Ю.И., Сидляр А.В., Рассказов М.И., 2012. Прогнозная оценка удароопасности массива горных пород при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 96 - 102.

## References

1. Petukhov I.M., Batugina I.M., 1996. *Geodinamika nedr* [Geodynamics of subsurface]. М.: Nedra, 217 s.

2. Usikov V.I., 2011. *3D-modeli rel'efa i stroenie verkhnei chasti zemnoi kory Priamur'ya* [3D-models of relief and structure of the upper part of the Earth's crust of the Amur region]. *Tikhookeanskaya geologiya*, № 6, Pp. 14-33.

3. Akhmetzafina R.Z., 2016. *Lokatsiya akusticheskogo istochnika v odnorodnoi srede* [Location of the acoustic source in a single-native environment]. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika*, № 2, Pp. 52 - 55.

4. Zhang F., Yang Y., Pahlavan L., 2020. Evaluation of Acoustic Emission Source Localization Accuracy in Concrete Structures. *Structural Health Monitoring*, № 6, P. 2063 - 2074.

5. Rasskazov I.Yu., Migunov D.S., Gladyr' A.V., Makarov V.V., Anikin P.A., Iskra A.Yu., Zhelnin D.O., Sidlyar A.V., 2014. *Sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv lokal'nogo kontrolya udarootpasnosti pri vedenii gornyykh rabot v slozhnykh gornogeologicheskikh usloviyakh* [Improvement of technical means of local impact hazard control during mining operations in difficult mining and geological conditions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S4-2, S. 22 - 30.

6. Mel'nikov N.N., Kalashnik A.I., Kalashnik N.A., Zaporozhets D.V. *Kompleksnaya mnogourovnevaya sistema geomonitoringa prirodno-tekhnicheskikh ob"ektov gornodobyvayushchikh kompleksov* [Complex multi-level geomonitoring system of natural and technical objects of mining complexes]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopae-mykh*, 2018, № 4, Pp. 3-10.

7. Shabarov A.N., Tsirel' S.V., Morozov K.V., Rasskazov I.Yu., 2017. *Kontseptsiya kompleksnogo geodinamicheskogo monitoringa na podzemnykh gornykh rabotakh* [The concept of integrated geodynamic monitoring in underground mining operations]. *Gornyi zhurnal*, № 9, Pp. 59 - 64.
8. Lomov M., 2020. 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the nikolaevskoye field. *Paper presented at the E3S Web of Conferences, 8th International Scientific Conference on Problems of Complex Development of Georesources*, PCDDG; Khabarovsk, 2020, Volume 192, doi:10.1051/e3sconf/202019204008.
9. Bepal'ko A.A., Yavorovich L.V., Moiseev S.V., 2012. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod metodom IK-radiometrii* [Investigation of the stress-strain state of a rock mass by IR radiometry]. *Vestnik nauki Sibiri*, № 3 (4).
10. Grobe C.U., Reinhardt H.W., 1999. Development of a Procedure for Automated Localization of Acoustic Emission Sources, *Materialpruefung*, № 9, Pp. 342–347.
11. Shan-chao Hu, Yun-liang Tan, Jian-guo Ning, Wei-Yao Guo, Xue-sheng Liu, 2017. Multiparameter Monitoring and Prevention of Fault-Slip Rock Burst. *Shock and Vibration*, China, Vol. 2017.
12. Sukhanov V.I., 2020. *Komp'yuternyi analiz sodержaniya gornoj entsiklopedii* [Computer analysis of the content of the mountain encyclopedia]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1 (24), S. 113-119. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.01.113
13. Sammal' A.S., Antsiferov S.V., Pavlova N.S., 2018. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornogo massiva, slozhennogo dvumya tipami porod, v okrestnosti napornoj krugovoi vyrabotki* [Mathematical and computer modeling of the stress-strain state of a rock mass composed of two types of rocks near a pressure circular mine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 7, Pp. 37 - 44.
14. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., Svinin V.S., Ivanovskii E.V., Belousov V.V., 2001. *Avtomatizatsiya marksheiderskikh robot v sisteme modelirovaniya ob'ektov gornoj tekhnologii geotech-3d na OAO "Apatit"* [Automation of surveying operations in the geotech-3d object modeling system at JSC Apatit]. *Marksheiderskii vestnik*, № 4, Pp. 64 - 68.
15. Mal'tsev M.S., Terpugov V.N., 2011. *Komp'yuternoe 3d geometricheskoe i konechno-elementnoe modelirovanie na parallel'nykh vychislitel'nykh sistemakh mnogosloinoi sredy gornogo massiva* [Computer 3d geometric and finite element modeling on parallel computing systems of a multi-layer environment of a mountain massif]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika*, № 5 (9), Pp. 158 - 162.
16. Potapchuk M.I., Kursakin G.A., Sidlyar A.V., 2014. Improvement of safety of development of bump hazardous vein deposits of eastern primorye. *Eurasian Mining*, № 1, Pp. 18-22.
17. Potapchuk M.I., Rasskazov I.Yu., Potapchuk G.M., Sidlyar A.V., Rasskazov M.I., 2011. *Prognoznaya otsenka geodinamicheskoi opasnosti pri otrabotke glubokikh gorizontov Nikolaevskogo mestorozhdeniya* [Predictive assessment of geodynamic hazard by development of the deep horizons of the Nikolaevskoye field]. *Problemy kompleksnogo osvoeniya georesursov: Materialy IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s uchastiem inostrannykh uchennykh*, Pp. 110-118.
18. Rasskazov I.Yu., Potapchuk M.I., Kursakin G.A., Bolotin Yu.I., Sidlyar A.V., Rasskazov M.I., 2012. *Prognoznaya otsenka udaropasnosti massiva gornykh porod pri otrabotke glubokikh gorizontov Nikolaevskogo mestorozhdeniya* [Predictive assessment of the impact hazard of the rock mass during the development of the deep horizons of the Nikolaevskoye field]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 4, Pp. 96 - 102.