

ИНТЕНСИВНОСТЬ И ХАРАКТЕР СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ КОСТОМУКШСКОГО ГОК

А. А. Лебедев

Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Россия

Аннотация: Представлены результаты двухлетних исследований по изучению сейсмических воздействий от Костомукшского ГОК (СЗ части Карельского кратона). Дана краткая характеристика Костомукшского рудного района. Показаны возможности регистрации промышленных взрывов Карельской сейсмической сетью на различных расстояниях от эпицентров. Проведен анализ интенсивности и временной динамики взрывных работ в карьерах, который позволил оценить ее стабильность и выработать основные критерии оценки влияния взрывных работ на геологическую среду, а также заложить основы оценки современной геодинамической обстановки региона в перспективе. На территории Карелии преобладает техногенная сейсмичность, основной вклад вносят взрывные работы. Актуальным до сих пор остается вопрос идентификации таких событий и отделения их от землетрясений. Построенные графики показывают зависимость роста значений магнитуды от общего заряда. Проведено разделение и анализ данных по карьерам и типу используемого ВВ, а также высказано несколько предположений об интенсивности проводимых взрывных работ. Изложен подход к уменьшению негативного сейсмического воздействия промышленных взрывов. Высказаны предположения о перспективных направлениях в области развития и использования сейсмического мониторинга для оценки сейсмического воздействия взрывов на ближайшее будущее.

Ключевые слова: взрывные работы, геодинамика, магнитуда, общий заряд, техногенная сейсмичность, промышленная безопасность, короткозамедленное взрывание, сейсмический мониторинг, Карельский кратон.

Благодарности: исследование проведено в рамках государственного задания Института геологии КарНЦ РАН, темы НИР АААА-А18–118020290086–1.

Для цитирования: Лебедев А. А. Интенсивность и характер сейсмических воздействий Костомукшского ГОК // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 142–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_142.

Intensity and nature of seismic impact of Kostomuksha GOK

A. A. Lebedev

Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

Abstract: The results of the two-year study into seismic impacts of Kostomuksha GOK (NW part of the Karelian craton) are presented. A brief description of Kostomuksha ore region is given. The possibilities of industrial blasting recording by the Karelian seismic network at various distances from the epicenters are shown. The analysis of the intensity and temporal

dynamics of blasting operations in open pits was carried out. That made it possible to assess exposure stability, to develop the main criteria of the impact generated by blasting operations on the geological environment, as well as to provide a foundation for the long-term assessment of regional geodynamics. Induced seismicity prevails in the territory of Karelia, and the main contribution is made by blasting. The question of identifying induced seismic events and separating them from earthquakes is still topical. The plotted graphs show the dependence of the increase in the seismic event magnitude on the total charge. The collected data are classified by open pits and by the type of explosives. A few assumptions were made concerning the intensity of blasting operations. An approach to reducing the negative seismic impact of industrial explosions is presented. Some suggestions are made for the short-term and promising trends in advancement and application of seismic monitoring to assess seismic impact of explosions.

Key words: blasting operations, geodynamics, magnitude, total charge, induced seismicity, industrial safety, seismic monitoring, short-delay blasting, Karelian craton.

Acknowledgements: The study was carried out in the framework of the state contract with the Institute of Geology, Karelian Research Center, Russian Academy of Sciences, Topic No. AAAA-A18-118020290086-1.

For citation: Lebedev A. A. Intensity and nature of seismic impact of Kostomuksha GOK. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):142–151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_142.

Введение

На территории Карелии преобладает техногенная сейсмичность, которая в основном включает активные взрывные работы. На данный момент функционирует порядка 30 промышленных карьеров, в которых производится добыча полезных ископаемых открытым способом.

Наиболее интенсивно разрабатывается 6 карьеров по добыче железистых кварцитов в Костомукшском рудном районе. В этих карьерах производят наиболее мощные взрывы (до 1250 тонн ВВ). В других районах Карелии количество ВВ при промышленных взрывах варьируется от 5 до 65 тонн [1]. Костомукшский рудный район расположен на границе восточной Финляндии и западной Карелии, уникален по своему строению, рудоносности, геологическому развитию и сложен архейскими и протерозойскими комплексами пород, перекрытых маломощным чехлом четвертичных отложений. В состав этого района включены три месторождения Карельского кратона:

Костомукшское, Корпангское и Межозерское. Костомукшский рудный район является крупнейшим промышленным центром Карелии, получившим свое название благодаря открытию залежей магнетитовых кварцитов. Товарной продукцией компании «Карельский окатыш» являются офлюсованные окатыши железорудные с содержанием железа 65,5 % [2, 3].

Материалы и методы

Сейсмический мониторинг исследуемой территории проводится сетью из 4 широкополосных сейсмических станций [4] Карельской сейсмической сети (рис. 1). В отдельных случаях в обработку событий подключаются станции Пулково и КНЦ РАН. Регистрация взрывов, производимых Костомукшским ГОК в течение 2018–2019 гг., проводилась сейсмическими станциями KOS6, PAAN, PITK, PTRZ, расположенными на расстояниях ~ 15, 120, 340 и 370 км от карьеров ГОК соответственно. Описание и координаты карьеров представлены в [5].

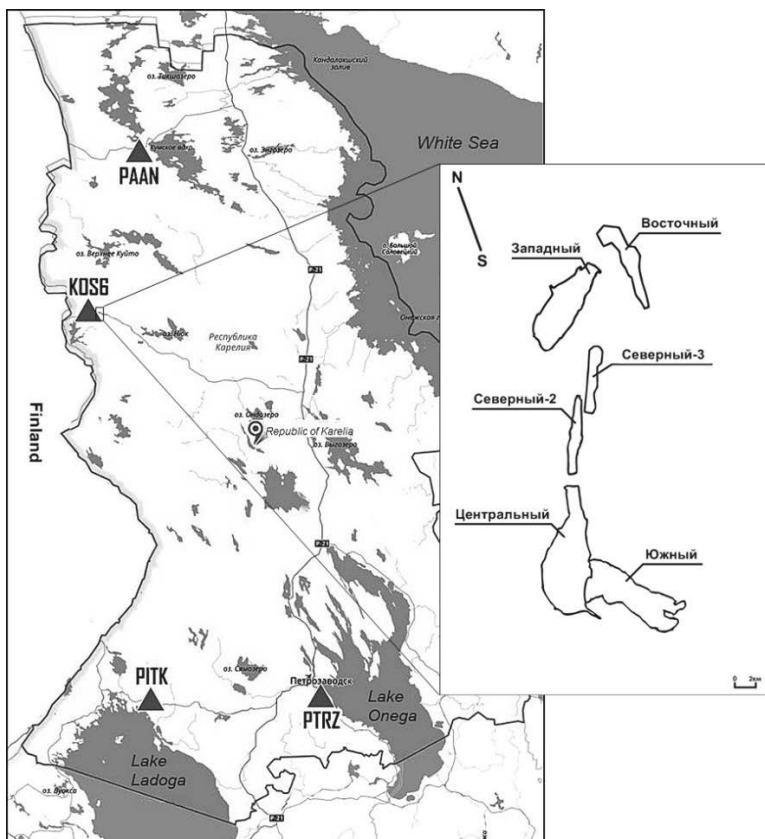


Рис. 1. Схема расположения станций Карельской сейсмической сети и карьеров Костомукшского ГОК [5]

Fig. 1. Location of seismic stations in the territory of Karelia and open pits of Kostomuksha GOK [5]

Пример регистрации взрыва на карьере «Центральный» станциями Карельской сети показан на рис. 2.

Ежегодно станции Карельской сейсмической сети регистрируют более 300 промышленных взрывов. В карьерах Костомукшского ГОК на протяжении последних десятилетий проводят буровзрывные работы, что позволяет изучить динамику взрывных работ на разных карьерах, оценить ее стабильность и выработать основные критерии оценки влияния взрывных работ на геологическую среду. Согласно временной динамике взрывных работ, взрывы на карьерах производят круглогодично. Количество взрывов в течение

недели распределено неравномерно, но видна тенденция проведения большинства взрывных работ по вторникам, четвергам и пятницам, как в 2018, так и 2019 гг. В выходные дни взрывы не производятся. Похожая динамика наблюдается и в настоящее время. Общее количество взрывов достигает 100 в год (рис. 3).

Временной срез производства взрывных работ в течение суток показывает, что большинство взрывных работ на карьерах Костомукшского ГОК производят примерно в одно и то же время. В интервале времени 09:00–10:00 (UTC) зарегистрировано 85 % взрывов (рис. 4). Данный фактор стано-

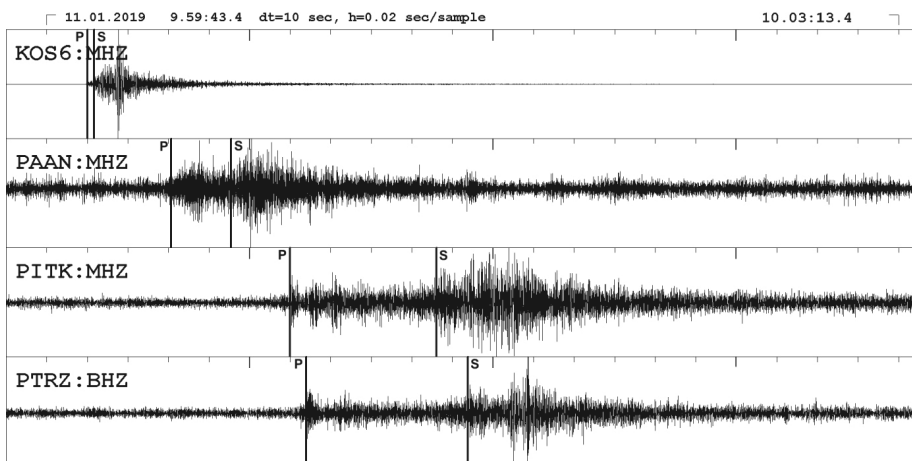


Рис. 2. Волновые формы взрыва на карьере «Центральный» от 11.01.2019
 Fig. 2. Waveforms of explosion in the open pit "Central" from 11.01.2019

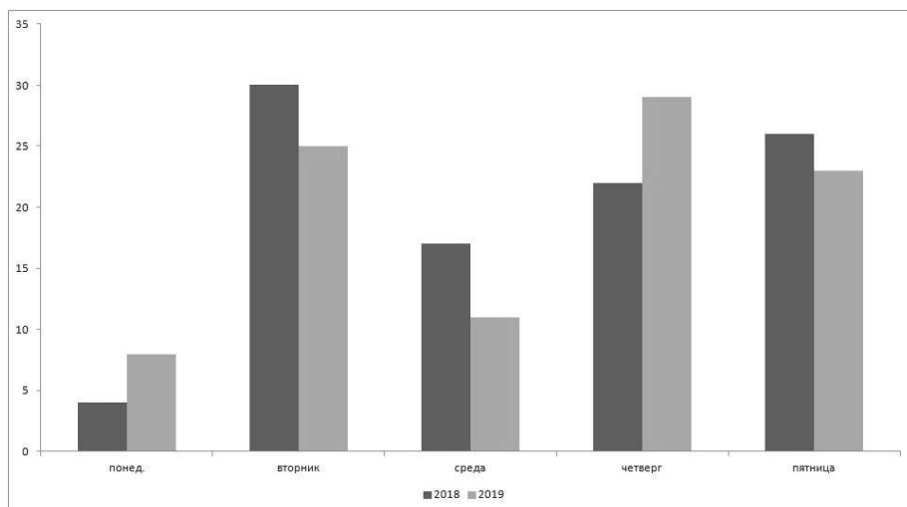


Рис. 3. Распределение количества взрывов по дням недели
 Fig. 3. Distribution of the number of explosions by days of the week

вится важным для проведения будущих работ по определению современной геодинамической ситуации.

Обсуждение результатов

По результатам непрерывных наблюдений были составлены сводные каталоги [6] сейсмических событий с магнитудами 1,2 – 2,6. Для сравнения были взяты данные Финской сейсми-

ческой сети [7] за тот же период, которые показали незначительный разброс и достоверность получаемых данных (рис. 5).

Основными параметрами регистрируемых событий являются время в эпицентре, координаты, невязки, локальная магнитуда, тип события и количество сейсмостанций, задействованных в обработке события (табл. 1).

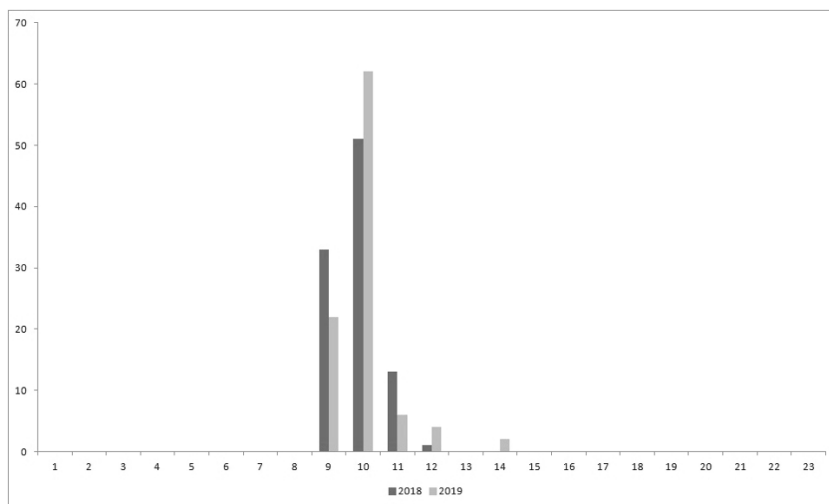


Рис. 4. Распределение количества взрывов по времени суток (время UTC)
 Fig. 4. Distribution of the number of explosions for 2018–2019 by time of day (UTC)

Таблица 1

Фрагмент таблицы записи в каталоге взрывов Костомукшского ГОК
Fragment of the catalog of explosions of the Kostomuksha GOK

Год	Мес	День	Час	Мин	Сек	$\delta t_0, c$	Шир	$\delta \varphi, ^\circ$	Дол	$\delta \lambda, ^\circ$	ML	MLф	Тип	Рай-он	С/с
2019	1	11	9	59	50,6	0,1	64,714	0,06	30,700	0,06	2,1	2,1	взрыв	Костомукшский	4

Вопрос сейсмического эффекта и воздействия промышленных взрывов поднимался в [8–17]. Снижение сейсмического воздействия промышленных взрывов достигается посредством использования эффективных схем короткозамедленного взрывания. Взрывы на карьерах производятся открытым способом 1–3 раза в неделю по утвержденным в установленном порядке проектам Костомукшского ГОК. Способ включает подготовку блока; разработку схемы расположения скважин, графического материала и таблицы параметров взрывных работ; распорядок проведения массового взрыва [5]. Вес взрывчатого вещества варьируется от 100 до 1250 т. Массовым на открытых горных работах считается взрыв, если в общую взрывную сеть смонтировано

два и более скважинных, котловых или камерных заряда. На месторождении производятся короткозамедленные взрывы сразу на 1–6 блоках одновременно. Основными типами ВВ, используемыми и производимыми ГОК, являются Сибирит 1200 и Эмулекс 7000.

Интересным является факт разброса от осредняющей прямой, а также значения $ML \geq 2,0$ на карьерах Северный (С) и Южный (Ю) при величинах ВВ от 100 до 300 т. Полученные значения сравнимы с эффектами от взрывов на карьерах Центральный (Ц) и Западный (З) при величинах ВВ от 1000 т (рис. 6). Вероятно, это связано с геологическими особенностями среды на пути «карьер – станция» или особенностями монтажа взрывной сети.

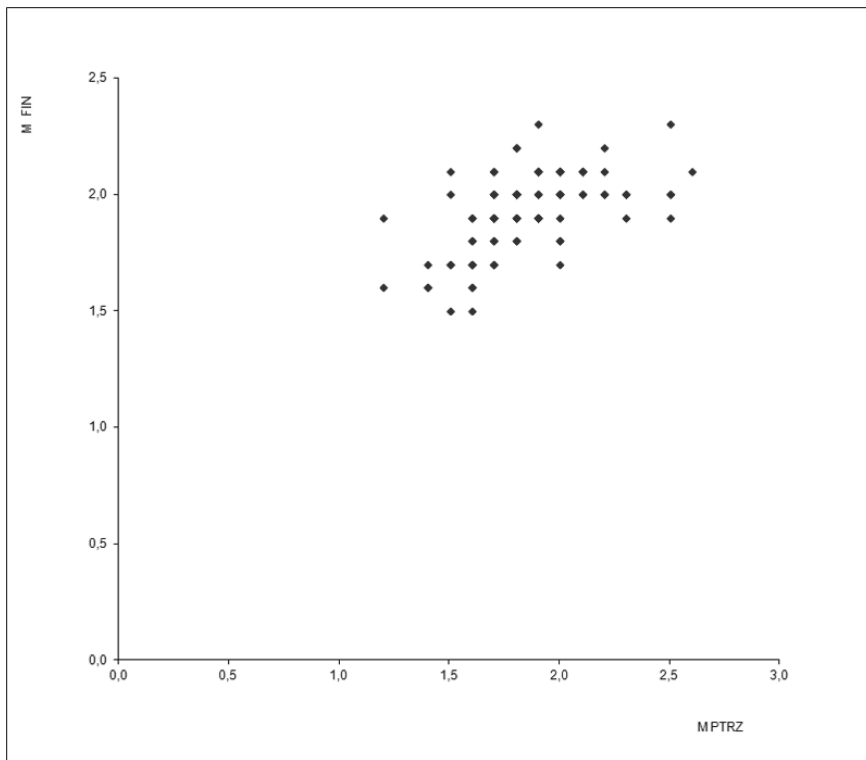


Рис. 5. Распределение магнитуд техногенных событий в Костомукшском рудном районе по данным станций Карельской (PTRZ) и Финской (FIN) сейсмологической сети
 Fig. 5. Distribution of the magnitudes of technogenic events in the Kostomuksha ore region according to the data of the stations of the Karelian (PTRZ) and Finnish (FIN) seismological networks

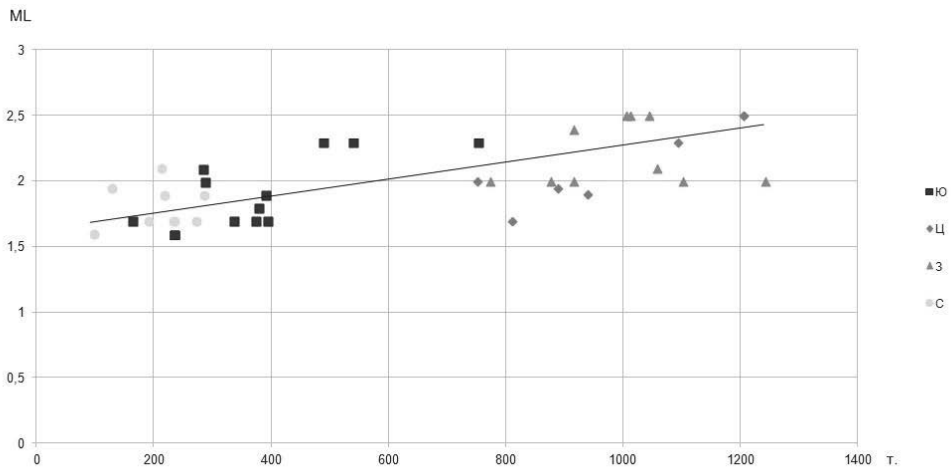


Рис. 6. Зависимость магнитуды от общего заряда ВВ на карьерах Костомукшского ГОК
 Fig. 6. Dependence of magnitude on the total weight of explosives open pits of Kostomuksha GOK

Накопленные данные помогут в вопросе об идентификации и разделении землетрясений от взрывов [18–20], учитывая нарастающую техногенную нагрузку Костомукшского рудного района.

Заключение

Учитывая большое количество производимых взрывов (более 100 в год) и высокую плотность карьеров в Костомукшском рудном районе, а также массу ВВ (от 100 до 1250 т), можно отметить значительное воздействие взрывной сейсмичности на литосферу исследуемого района. Важным становится вопрос расчета суммарной сейсмической энергии не только района, но и всей республики с постоянным увеличением количества взрывов на этой территории и разработки новых месторождений. Кроме того, производимые взрывы способны создавать сейсмические события 5–9 энергетических классов, которые распространяются на большие расстояния. Опыт регистрации сейсмических волн от карьерных взрывов показал необ-

ходимость их дальнейшего изучения при оценке сейсмической опасности.

Направление дальнейших исследований

Сейсмический мониторинг и накопление статистических данных позволит обосновать геодинамическую обстановку не только района исследований, но и юго-восточной части Фенноскандии в целом. Основное внимание должно уделяться выделению и изучению зон сейсмической активности, которые представляют непосредственную опасность в условиях развития горнопромышленного комплекса. В свою очередь, уменьшение времени пробега сейсмических волн на выбранном участке в течение заданного периода времени наблюдений может свидетельствовать об увеличении скорости распространения волн, а также являться признаком сжатия среды на данном участке в течение времени наблюдений. Это необходимо учитывать при переходе на новые технологии добычи и извлечения полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В. и др. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России. Москва: ГЕОС, 2013 г. 360 с.
2. Горьковец В. Я. Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерализация): монография. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 322 с.
3. Eilu, P., Boyd, R., Hallberg, A., Korsakova, M., Krasotkin, S., Nurmi, P. A., Ripa, M., Stromov, V. & Tontti, M. 2012. Mining history of Fennoscandia. Geological Survey of Finland, Special Paper 53, 19–32.
4. Шаров Н. В. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 353 с.
5. Зуева И. А., Лебедев А. А. Сейсмический эффект промышленных взрывов Костомукшского ГОК // Вестник МГТУ. 2020. Т. 23. № 1. С. 22–28. DOI: 10.21443/1560–9278–2020–23–1-22–28
6. Баранов С. В., Карпинский В. В., Лебедев А. А., Мунирова Л. М., Петров С. И., Пойгина С. Г. Непрерывные наблюдения. Восточная часть Балтийского щита // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 111–113.
7. The Institute of Seismology of the University of Helsinki. Seismic Bulletins. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/> (дата обращения: 24.12.2020)

8. Друкотанный М. Ф. Методы управления взрывом на карьерах. М.: Недра, 1973. 415 с.
9. Суворова Н. И., Шаров Н. В. О формировании сейсмических колебаний при массовых короткозамедленных взрывах // Сейсмические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита: сб. ст. / отв. ред. Г. Д. Панасенко. Апатиты: Кол. филиал АН СССР, 1979. С. 59–63.
10. Козырев С. А., Усачев Е. А. Проявление техногенной сейсмичности при производстве массовых взрывов на подземных рудниках ОАО «Апатит» // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 238–245.
11. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Ворона У. Ю., Серезжников Н. А. Сейсмический эффект промышленных взрывов в Западной Сибири и наведённая сейсмичность // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45, № 4. С. 5–24. DOI: 10.21455/VIS2018.4–1
12. Кутузов Б. Н., Эквист Б. В. Оценка сейсмического воздействия от массовых взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 2. – С. 219–224.
13. Конурун А. И., Еременко А. А., Филиппов В. Н. Особенности оценки состояния массива горных пород при промышленных взрывах и геодинамических явлениях взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 7. – С. 153–160. DOI: 10.25018/0236–1493–2017–7-0–153–160
14. Курленя М. В., Еременко А. А., Башков М. В. Влияние взрывных работ на сейсмические и динамические явления при подземной разработке рудных удароопасных месторождений Сибири // Горный журнал. 2015. № 8. С. 69–71. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.14
15. Ataeva G., Gitterman Y., Shapira A. The ratio between corner frequencies of source spectra of P – and S-waves – a new discriminant between earthquakes and quarry blasts // Journal of Seismology. 2017. Vol. 21. pp. 209–220. DOI: 10.1007/s10950–016–9598–0
16. Han H., Jahed Armaghani D., Tarinejad R., Zhou J., Tahir M. Random Forest and Bayesian Network Techniques for Probabilistic Prediction of Flyrock Induced by Blasting in Quarry Sites // Natural Resources Research. 2020. Vol. 29. pp. 655–667. DOI: 10.1007/s11053–019–09611–4
17. Kintner J. A., Ammon C. J., Homman K., Nyblade A. Precise Relative Magnitude and Relative Location Estimates of Low Yield Industrial Blasts in Pennsylvania // Bulletin of the Seismological Society of America. 2020. Vol. 110. pp. 226–240. DOI: 10.1785/012019163
18. Gulia L. Detection of Quarry and Mine Blast Contamination in European Regional Catalogues // Natural Hazards. 2010. Vol. 53. pp. 229–249. DOI: 10.1007/s11069–009–9426–8
19. Kortström J., Uski M., Taira T. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network // Computers & Geosciences. 2016. Vol. 87. pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.11.006
20. Асминг В. Э., Кременецкая Е. О., Виноградов Ю. А., Евтюгина З. А. Использование критериев идентификации взрывов и землетрясений для уточнения оценки сейсмической опасности региона // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2010. Т. 13. № 4/2. С. 998–1007. 

REFERENCES

1. Adushkin V. V. et al. *Vzryvy i zemletryaseniya na territorii Evropejskoj chasti Rossii* [Explosions and earthquakes in the European part of Russia]. Moscow, GEOS, 2013. 360 p. [In Russ.]
2. Gorkovets V.Ya. et al. *Kostomukshskij rudnyj rajon (geologiya, glubinnoe stroenie i minerageniya)* [Kostomuksha ore area (geology, deep structure and mineralogeny)]. Petrozavodsk: Karelian Research Centre, RAS, 2015. 322 p. [In Russ.]

3. Eilu, P., Boyd, R., Hallberg, A., Korsakova, M., Krasotkin, S., Nurmi, P. A., Ripa, M., Stromov, V. & Tontti, M. 2012. *Mining history of Fennoscandia. Geological Survey of Finland, Special Paper 53*, 19–32.
4. Sharov N. V. *Glubinnoe stroenie i sejsmichnost' Karelskogo regiona i ego obramleniya* [Deep structure and seismicity of the Karelian region and its framing]. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center RAS, 2004. 353 p. [In Russ.]
5. Zueva I. A., Lebedev A. A. *Sejsmicheskij effekt promyshlennyh vzryvov Kostomukshskogo GOK* [Seismic effect of industrial explosions of GOK Kostomuksha]. *Vestnik MGTU (Proceedings of MGTU)*, 2020, V. 23. no. 1, pp. 22–28. DOI: 10.21443/1560–9278–2020–23–1-22–28 [In Russ.]
6. Baranov S. V., Karpinskij V. V., Lebedev A. A., Munirova L. M., Petrov S. I. *Nepreryvnye nablyudeniya. Vostochnaya chast' Baltijskogo shchita* [Continuous observation. Eastern part of the Baltic shield]. *Zemletryaseniya Rossii v 2018 godu (Earthquakes of Russia in 2018)*, Obninsk: FIC EGS RAS, 2020. pp. 111–113. [In Russ.]
7. The Institute of Seismology of the University of Helsinki. *Seismic Bulletins*. [Electronic resource]. Available at: <http://www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/> (accessed 24 December 2020)
8. Drukovannyj M. F. *Metody upravleniya vzryvom na kar'erah* [Blast control techniques in quarries]. Moscow: Nedra, 1973. 415 p. [In Russ.]
9. Suvorova N. I., Sharov N. V. *O formirovanii sejsmicheskikh kolebanij pri massovyh korotkozamedlennyh vzryvah* [About the formation of seismic vibrations during mass short-delayed explosions]. *Sejsmicheskie i geodinamicheskie issledovaniya na severo-vostoke Baltijskogo shchita (Seismic and geodynamic studies in the north-east of the Baltic shield)*, Apatity: Kola branch of AN USSR, 1979. pp. 59–63. [In Russ.]
10. Kozyrev S. A., Usachev E. A. Occurrence of mining-induced seismicity during bulk blasts at the underground mines, “Apatit” JSC. *Vestnik MGTU*, 2014, V. 17, no. 2, pp. 238–245. [In Russ.]
11. Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Shevkunova E. V., Vorona U.Yu., Serezhnikov N. A. *Sejsmicheskij effekt promyshlennyh vzryvov v Zapadnoj Sibiri i navedyonnaya sejsmichnost'* [Seismic effect of industrial explosions in Western Siberia and induced seismicity], *Voprosy Inzhenernoi Seismologii (Problems of Engineering Seismology)*, 2018, Vol. 45, no. 4, pp. 5–24. DOI: 10.21455/VIS2018.4–1 [In Russ.]
12. Kutuzov B. N., Ekvist B. V. Effects of explosions using not electric initiation system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 2, pp. 219–224. [In Russ.]
13. Konurin A. I., Eremenko A. A., Filippov V. N. Assessment features for rock mass conditions under production blasting and geodynamic events. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 7, pp. 153–160. DOI: 10.25018/0236–1493–2017–7-0–153–160 [In Russ.]
14. Kurlenya M. V., Eremenko A. A., Bashkov V. I. *Vliyanie vzryvnyh rabot na sejsmicheskie i dinamicheskie yavleniya pri podzemnoj razrabotke rudnyh udaroopasnyh mestorozhdenij Sibiri* [Effect of blasting on seismic activity and dynamic events in rockburst-hazardous underground mines in Siberia]. *Gornyj zhurnal (Mining Journal)*, 2015, no. 8, pp. 69–71. DOI: 10.17580/gzh.2015.08.14 [In Russ.]
15. Ataeva G., Gitterman Y., Shapira A. The ratio between corner frequencies of source spectra of P- and S-waves—a new discriminant between earthquakes and quarry blasts. *Journal of Seismology*. 2017. Vol. 21. pp. 209–220. DOI: 10.1007/s10950–016–9598–0
16. Han H., Jahed Armaghani D., Tarinejad R., Zhou J., Tahir M. Random Forest and Bayesian Network Techniques for Probabilistic Prediction of Flyrock Induced by Blasting in Quarry Sites. *Natural Resources Research*. 2020. Vol. 29. pp. 655–667. DOI: 10.1007/s11053–019–09611–4

17. Kintner J. A., Ammon C. J., Homman K., Nyblade A. Precise Relative Magnitude and Relative Location Estimates of Low-Yield Industrial Blasts in Pennsylvania. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020. Vol. 110. pp. 226–240. DOI: 10.1785/012019163
18. Gulia L. Detection of Quarry and Mine Blast Contamination in European Regional Catalogues. *Natural Hazards*. 2010. Vol. 53. pp. 229–249. DOI: 10.1007/s11069–009–9426–8
19. Kortström J., Uski M., Tiira T. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network. *Computers & Geosciences*. 2016. Vol. 87. pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.11.006
20. Asming V. E., Kremeneckaya E. O., Vinogradov Yu.A., Evtyugina Z. A. *Ispol'zovanie kriteriev identifikacii vzryvov i zemletryasenij dlya utochneniya ocenki sejsmicheskoy opasnosti regiona* [Using the criteria for identifying explosions and earthquakes to refine the assessment of the seismic hazard of the region]. *Vestnik MGTU (Proceedings of MGTU)*, 2010, V. 13. no. 4/2, pp. 998–1007. [In Russ.]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Лебедев Артем Анатольевич – старший инженер-геофизик, stayxalert@gmail.com, Институт геологии КарНЦ РАН (ИГ КарНЦ РАН), Петрозаводск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Lebedev A. A., senior geophysicist, stayxalert@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7849-9337>, The Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia.

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 24.03.2021; принята к печати 10.04.2021.
Received by the editors 27.01.2021; received after the review 24.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

