

УДК 622.831:551.243.2

ВЛИЯНИЕ ФЛЕКСУРЫ НА СЕЙСМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ НА ШАХТЕ «СКАЛИСТАЯ»



В. П. МАРЫСЮК,
директор, канд. техн. наук,
marysyukvp@tf.nk.nornik.ru



О. В. СИТНИКОВА,
ведущий инженер

Центр геодинамической безопасности
ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель», Норильск, Россия



С. В. ЦИРЕЛЬ,
старший научный сотрудник,
д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский
национальный минерально-
сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург, Россия



С. Н. МУЛЁВ,
зав. лабораторией,
АО «ВНИМИ»,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Известно, что проявления геодинамической активности в значительной мере сконцентрированы около тектонических нарушений как пликративного, так и дизъюнктивного характера [1]. Для быстрых геодинамических процессов, вызывающих распространение сейсмических волн, особое значение имеют различные дизъюнктивные нарушения и их системы. В работах [2, 3] показано, что концентраторами опасных геодинамических явлений на шахтах и рудниках являются как одиночные разрывные нарушения, так и их системы.

В то же время разрывные нарушения в значительной степени определяют и морфологию рудных залежей. Для массивных мощных залежей разрывные нарушения, как правило, выступают фактором, влияющим на сложность их строения, выдержанность оруденения и распределение полезных основных и попутных компонентов.

Морфология залежи, состав и свойства пород в первую очередь зависят от дорудных и внутрирудных разрывов и складок, залеченных в эпоху рудообразования и к настоящему времени в значительной мере потерявшими свою геодинамическую актив-

Рассмотрены причины сейсмической активности в шахте «Скалистая» рудника «Комсомольский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Показано, что наибольшую роль играют наложение зон опорного давления и тектоническое строение залежи. При этом делается вывод, что преобладающее влияние на сейсмическую активность оказывает флексора, формирующая горст, другим склоном которого является главный шов Норильско-Хараелахского разлома. Выдвигается предположение, что после отработки смыкающего крыла флексоры можно ожидать снижения сейсмоактивности.

Ключевые слова: горный массив, горное давление, сейсмоактивность, разлом, горст, флексора, порядок отработки.

DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.07.04

ность. Наибольшую активность в настоящее время проявляют новейшие образующиеся тектонические структуры, зачастую имеющие незначительные амплитуды, но выраженные в современном рельефе, характере растительности и др. [2–4].

Исследование влияния флексоры на сейсмическую активность

Для ведения горных работ важное значение имеют как геологическая структура залежи, так и ее геодинамическая структура, определяющие потенциальные геодинамические риски, а также напряженно-деформированное состояние рудных тел и вмещающего массива.

Само ведение горных работ усиливает геодинамические риски, когда на участки опорного давления, зоны продавливающего действия целиков и др. накладываются тектонически напряженные зоны, или наоборот: зоны, разгруженные при ведении горных работ, накладываются на тектонически разгруженные зоны или ослабленные зоны повышенной трещиноватости [3, 5]. Кроме того, ведение очистных работ не только повышает контрастность распределения напряжений, но и вызывает их перераспределение, способствующее вторичной активизации давно потерявших свою активность структур.

В качестве примера можно привести прорастание дорудных разломов, пересеченных рудной залежью, на руднике «Октябрьский» [6]. Снижение горизонтальных напряжений, вызванное очистной выемкой и заменой крепкой руды на слабый закладочный материал, вело к появлению локальных трещин, сростающихся в единый участок разлома, который был разделен на две части при формировании интрузии.

Среди тектонических нарушений, оказывающих влияние на тектоническую активность, следует особо отметить флексоры, представляющие собой переходный тип между пликративными и дизъюнктивными нарушениями. Хотя многие авторы указывают

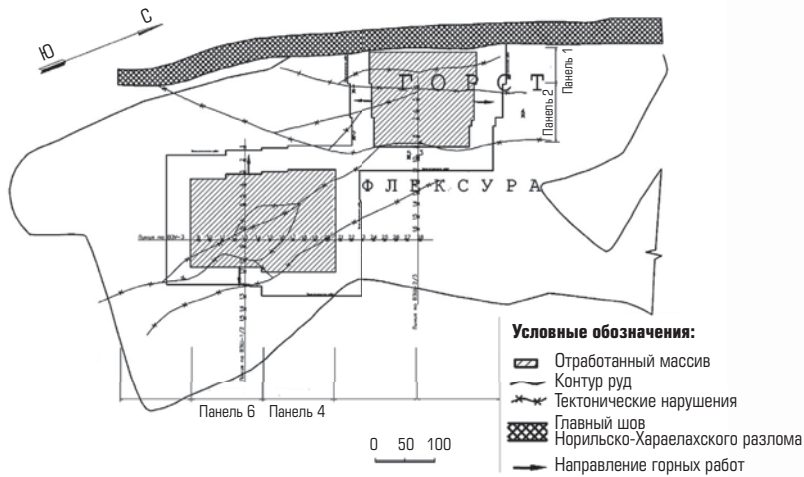


Рис. 1. Начальный этап отработки шахты «Скалистая»

на сейсмогенность и тектоническую активность флексур [7–9], но все же все флексуры выделяются среди сейсмогенных структур существенно реже, чем разломы и даже синклинали и антиклинальные складки. В то же время ведение горных работ оказывает очень существенное влияние на флексуры [3, 10], приводя к их активизации, прежде всего заключающейся в том, что смыкающее крыло флексуры (центральный отрезок ступеньки) «стремится» либо превратиться в поверхность скольжения (а сама флексура — в разлом), либо, наоборот, распрямиться. В западной геологической литературе менее принято выделять флексуры как отдельные тектонические структуры; для них и близких к ним структур используются различные названия — monocline, monoform, homocline, homoclinal structure, uniclinal,

uniclinal и др., и, соответственно, реже указывается на их роль в сейсмотектонических процессах. Тем не менее в ряде современных работ, посвященных горной геодинамике, указывается на геодинамическую активность подобных тектонических форм при добыче полезных ископаемых [11–13].

Данное явление оказало существенное влияние на геодинамическую активность рудника «Скалистый», обрабатывающего залежь С-1, западная часть которой представляет собой горст. Его западный склон — это главный шов Норильско-Хараелахского разлома в купе с вторичными субпараллельными ветвями и оперяющими разломами. Восточный склон горста представляет флексуру (рис. 1) с нереализованным геодинамическим потенциалом. Оработка запасов залежи С-1 была начата на двух участках по двум взаимно перпендикулярным направлениям [14, 15]: широтная разрезка в панелях 1 и 2 была произведена по ленте 5, где движение очистных фронтов происходит в направлении на север и юг; меридиональная разрезка в панелях 4 и 6 была произведена по ленте 14, где движение очистных фронтов происходит в направлении на запад и восток. При этом восточный склон горста (флексура) оставался не затронутым горными работами.

На начальном этапе применялась слоевая система разработки (нисходящая и комбинированная), созданием защитного слоя обеспечивали низкую геодинамическую и сейсмическую активность залежи и вмещающего массива. Наибольшие проблемы возникали из-за высокого уровня нарушенности участка, непосредственно прилегающего к Норильско-Хараелахскому разлому,

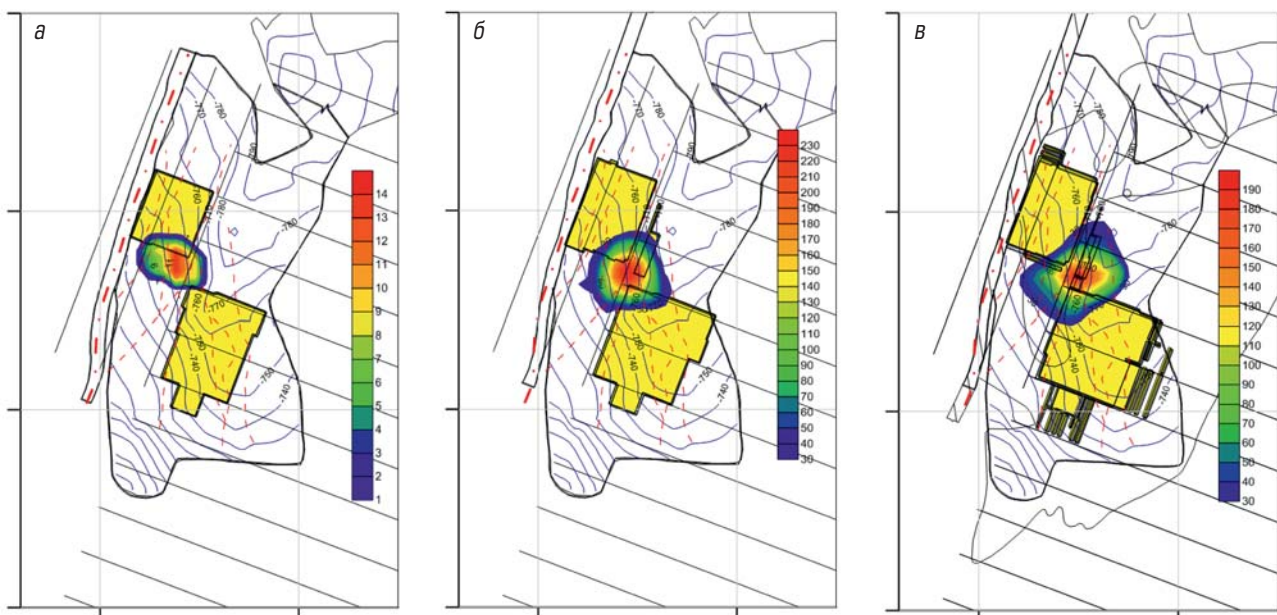


Рис. 2. Развитие сейсмической активности на шахте «Скалистая»: а — 2012 г.; б — 2013 г., в — 2015 г.

где наблюдались трещинообразование в стенках выработок, заколообразование, пучение почвы.

Однако по мере приближения очистных работ к флектуре стали учащаться (сперва низкоэнергетические) сейсмические события, появилось шелушение стенок выработок. Поэтому в 2007 г. было принято решение начать сейсмический мониторинг с помощью южноафриканской сейсмостанции ISS. Неудачный опыт использования этого метода заставил перейти на оценки активности, аналогичные применяемым на рудниках «Октябрьский» и «Таймырский» с помощью параметра F [16]. Но из-за малого числа сейсмических событий оценки производились раз в 3 месяца, как принято на вышеупомянутых рудниках. В настоящее время интервал оценки параметра сокращен до одного месяца.

Первые наблюдения выявили, кроме локальных мигрирующих центров сейсмоактивности, устойчивые участки повышенной активности на углах зон очистной выемки, прилегающих к флектуре. В 2010–2012 гг. сейсмическая активность по-прежнему имела невысокий уровень, однако по мере развития очистных работ устойчивые пятна сейсмоактивности сливаются в единую зону в краевой части флексуры на пересечении зон опорного давления двух отработанных участков.

Осенью 2013 г. произошла резкая активизация сейсмической активности данной зоны (рис. 2). Повысилась как частота событий, так и энергия отдельных событий (суммарная энергия за день доходила до десятков килоджоулей), а гипоцентры сейсмоактивности охватывали значительную часть флексуры. При этом усилились динамические проявления горного давления в выработках — стрельяния, деформации выработок, обыгрывание и затягивания анкеров [17].

Принятые мероприятия позволили снизить интенсивность динамических проявлений горного давления, но в конце 2015 г. начинается второй подъем сейсмической активности, отличающийся не только несколько меньшими абсолютными значениями выделившейся сейсмической энергии и комплексного показателя F , но и более широким распространением сейсмических событий по склону флексуры [18, 19].

Вполне очевидно, что описанные проявления геодинамической активности, как и другие ее проявления на шахтах и рудни-

ках, имеют двойную природу. С одной стороны, они вызываются ведением горных (в первую очередь очистных) работ и связанными с ним перераспределениями горного давления. С другой стороны, техногенные изменения напряженно-деформированного состояния накладываются на тектонические нарушения, различия структур, состояния, состава и свойств горного массива и сформированные ими зоны повышенных и пониженных тектонических напряжений.

Также очевидно, что техногенные и тектоногенные пространственно-временные вариации напряженного состояния массива могут как ослаблять (частично компенсировать), так и усиливать друг друга, причем второй, более опасный вид событий встречается чаще, чем первый. Тем не менее для адекватного выбора противоударных мероприятий представляет интерес получить хотя бы грубое соотношение ролей этих двух факторов в формировании зон сейсмоактивности. С этой целью была составлена карта всех взрывных работ, проведенных на шахте в 2015 г.

Заключение

Сопоставление карты взрывных работ с местоположением флексуры и отработанных зон позволило сделать следующие выводы:

- непосредственное ведение взрывных работ (в том числе при осуществлении очистной выемки) не оказывает решающего влияния на сейсмоактивность и может служить, при отсутствии других противодействующих факторов, даже средством разгрузки массива;
- наложение зон опорного давления, окружающих два отработанных участка массива, играет сопоставимую роль с тектоническим строением (наличием флексуры), в то же время резкая активизация при ведении горных работ на самом смыкающем крыле флексуры все же указывает на ведущую роль тектонического фактора;
- в ходе отработки зоны смыкающего крыла флексуры можно ожидать существенных проявлений геодинамической активности (снижающихся по мере отхода от «двойной» зоны опорного давления), однако после ее отработки можно предположить общее понижение геодинамической активности (при некотором росте опасности на замыканиях флексуры).

Библиографический список

1. *Аглонов С. В.* Геодинамика. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. — 360 с.
2. Геодинамическое районирование недр: методические указания / под ред. И. М. Петухова, И. М. Батугиной. — Л.: Изд. ВНИМИ, КузПТИ, 1990. — 129 с.
3. *Шабаров А. Н., Дулак Ю. Н., Цирель С. В.* и др. Практические приложения геодинамики недр // Горная геомеханика и маркшейдерия в III тысячелетии. — СПб.: ВНИМИ, 2004. — С. 137–161.
4. *Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Цирель С. В.* Генезис и развитие природно-техногенной сейсмоактивности Кузбасса // Уголь. 2013. № 10. С. 53–59.
5. *Шабаров А. Н., Дулак Ю. Н., Ватутин А. С.* Тектонически напряженные и разгруженные зоны в горном массиве // Уголь. 1994. № 7. С. 28–30.
6. *Arshavsky V. V., Badtiev B. P., Tsirel S. V., Shabarov A. N.* Analysis and methods of controlling the geodynamics situation in the mines of MMC Norilsk Nickel Group // Proc. of 2nd Saint Petersburg International Conference and Exhibition. — Houten, 2006. Vol. 1. P. 576–581.
7. Геологический словарь. Т. 3. — СПб.: ВСЕГЕИ. — 300 с.
8. *Свириденко Л. П.* Флексура Полканова и ее роль в геодинамике Восточно-Европейской платформы // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными: матер. XIV Междунар. конф., Ч. 2. — Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 171–173.
9. *Ежова И. Т., Ефременко М. А., Трегуб А. И.* Сейсмическая активность и неотектоника Воронежского кристаллического массива // Вестник ВГУ. Сер.: Геология. 2010. № 1. С. 229–231.
10. *Гарбер И. С., Григорьев В. Е., Дулак Ю. Н.* и др. Разрывные нарушения угольных пластов (по материалам шахтной геологии). — Л.: Недра, 1979. — 190 с.
11. *You Z. M., Chen J. P.* Inversion analysis of initial geostress in tunnel of DaPing mountain // Disaster Advances. 2013. Vol. 6. Iss. 3. P. 56–61.
12. *Suorineni F. T., Hebblewhite B., Saydam S.* Geomechanics challenges of contemporary deep mining: a suggested model for increasing future mining safety and productivity //

- Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2014. Vol. 114. No. 12. P. 1023–1032.
13. Fischer K., Henk A. A workflow for building and calibrating 3-D geomechanical models. A case study for a gas reservoir in the North German Basin // *Solid Earth*. 2013. Vol. 4.2. P. 347–355.
 14. Карелин В. Н., Марысюк В. П., Наговицын Ю. Н., Вильчинский В. Б., Звездкин В. А. Исследование геомеханического состояния рудопородного массива в поле рудника «Скалистый» // *Горный журнал*. 2010. № 6. С. 63–65.
 15. Snelling P. E., Godin L., McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. P. 166–179.
 16. Яковлев Д. В., Цирель С. В., Мулев С. Н. Закономерности развития и методика опер-

- ративной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // *ФТПРПИ*. 2015. № 2. С. 34–47.
17. Нестеренко Ю. М., Косолапов О. В., Нестеренко М. Ю. Сейсмическая активность районов разрабатываемых месторождений углеводородов в Южном Предуралье // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12, №1(5). С. 1240–1244.
 18. Козырев С. А., Усачев Е. А. Проявление техногенной сейсмичности при производстве массовых взрывов на подземных рудниках ОАО «Апатит» // *Вестник МГУТ*. 2014. Т. 17. № 2. С. 238–245.
 19. Соловцовский А. Н. Мониторинг геодинамических явлений разрушительного характера при освоении месторождений // *ГЕО-СИБИРЬ-2010* : материалы Междунар. научн. конгресса, 19–29 апреля 2010 г. — Новосибирск : СГГА, 2010. С. 28–31. **РЖ**

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 7, pp. 19–22
DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.07.04

Effect of flexural fold on seismic activity in Skalistaya mine

Information about author

V. P. Marysyuk¹, Director, Candidate of Engineering Sciences, marysyukvp@tf.nk.nornik.ru
O. V. Sitnikova¹, Leading Engineer
S. V. Tsirel², Senior Researcher, Doctor of Engineering Sciences
S. N. Mulev³, Head of Laboratory

¹ Center for Geodynamic Safety, Polar Division, Norilsk Nickel, Norilsk, Russia

² Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

³ VNIMI, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The article uses the case study of Skalistaya mine to consider the role of tectonic structure and mining sequence in geodynamic activity of rock mass. It is emphasized that mining affects both the faults that define the structure of a deposit and the currently most active faults.

Specifically, the scope of the article covers the influence of flexural fold — knee-folded strata or interfaces that take an intermediate position between the plicative and disjunctive faults. On the whole, with regard to the general level of seismic activity, flexural folds stand down the faults and even plicative dislocations, but removal of large volumes of rocks and placement of low-strength backfill material in mined-out voids activates flexural folds. Under mining-induced alteration of stress state, the knee branch of a flexural fold (central segment of the step) “tends” either to becoming a slide line (and the flexure fold itself — to a fault) or, vice versa, to strengthening.

In Skalistaya mine, early stage mining operations left the flexural fold aside. However, later on, the flexure fold appeared at the intersection of two zones of abatement pressure, which resulted in an increase in the seismic activity, especially when mining directly covered the area of the knee-fold of the deposit. It is hypothesized that mining in the zone of the flexural fold will induce geodynamic activation (weakening with the distance from the “double” zone of abatement pressure), and upon mining completion, geodynamic activity will abate (at a certain growth of geodynamic hazards at closing portions of the flexural fold).

Keywords: rock mass, strata pressure, seismic activity, fault, fault ridge, flexural fold, mining sequence.

References

1. Aplonov S. V. *Geodinamika* (Geodynamics). Saint Petersburg : Publishing House of Saint Petersburg State University, 2001. 360 p.
2. *Geodinamicheskoe rayonirovanie nedr : metodicheskie ukazaniya* (Geodynamic zoning of soils : methodic regulations). Under the editorship by I. M. Petukhov, I. M. Batugina. Leningrad : Publishing House of Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying (VNIMI), Kuzbass Polytechnic Institute, 1990. 129 p.
3. Shabarov A. N., Dupak Yu. N., Tsirel S. V. et al. Prakticheskie prilozheniya geodinamiki nedr (Practical applications of soil geodynamics). *Gornaya geomekhanika i marksheyderiya v III tysyacheletii* (Mining geomechanics and mine surveying in the III millennium). Saint Petersburg : Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying (VNIMI), 2004. pp. 137–161.
4. Yakovlev D. V., Lazarevich T.I., Tsirel S. V. Genesis i razvitie prirodno-tekhnogennoy seismoaktivnosti Kuzbassa (Genesis and development of natural-technogenic seismic activity of Kuzbass). *Ugol = Russian coal*. 2013. No. 10. pp. 53–59.
5. Shabarov A. N., Dupak Yu. N., Vatutin A. S. Tektonicheski napryazhennye i razgruzhennye zony v gornom massive (Tectonically stressed and unloaded zones in rock massif). *Ugol = Russian coal*. 1994. No. 7. pp. 28–30.

6. Arshavsky V. V., Badiyev B. P., Tsirel S. V., Shabarov A. N. Analysis and methods of controlling the geodynamics situation in the mines of MMC Norilsk Nickel Group. Proceedings of 2nd Saint Petersburg International Conference and Exhibition. Houten, 2006. Vol. 1. pp. 576–581.
7. *Geologicheskii slovar. Tom 3* (Geological dictionary. Volume 3). Saint Petersburg : A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 300 p. (in Russian)
8. Sviridenko L. P. Fleksura Polkanova i ee rol v geodinamike Vostochno-Evropeyskoy platformy (Polkanov's flexure and its part in East-European platform geodynamics). *Svyaz poverkhnostnykh struktur zemnoy kory s glubinnymi : materialy XIV Mezhdunarodnoy konferentsii* (Connection of surface structures of the Earth's crust with deep ores: materials of the XIV international Conference). Petrozavodsk : Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences, 2008. Part 2. pp. 171–173.
9. Ezhova I. T., Efremento M. A., Tregub A. I. Seysmicheskaya aktivnost i neotektonika Voronezhskogo kristallicheskogo massiva (Seismic activity and neotectonics of Voronezh crystalline massif). *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Geology*. 2010. No. 1. pp. 229–231.
10. Garber I. S., Grigorev V. E., Dupak Yu. N. et al. *Razryvnye narusheniya ugolnykh plastov (po materialam shakhtnoy geologii)* (Disjunctive dislocations of coal layers (according to the materials of mine geology)). Leningrad : Nedra, 1979. 190 p.
11. You Z. M., Chen J. P. Inversion analysis of initial geostress in tunnel of DaPing mountain. *Disaster Advances*. 2013. Vol. 6, Iss. 3. pp. 56–61.
12. Suorineni F. T., Hebblewhite B., Saydam S. Geomechanics challenges of contemporary deep mining: a suggested model for increasing future mining safety and productivity. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014. Vol. 114, No. 12. pp. 1023–1032.
13. Fischer K., Henk A. A workflow for building and calibrating 3-D geomechanical models. A case study for a gas reservoir in the North German Basin. *Solid Earth*. 2013. Vol. 4.2. pp. 347–355.
14. Karelin V. N., Marysyuk V. P., Nagovitsin Yu. N., Vilchinskiy V. B. Issledovanie geomekhanicheskogo sostoyaniya rudopородного массива v pole rudnika «Skalistyy» (Investigation of geomechanical state of ore-rock massif in the field of Skalisty mine). *Gornyy Zhurnal = Mining Journal*. 2010. No. 6. pp. 63–65.
15. Snelling P. E., Godin L. McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. pp. 166–179.
16. Yakovlev D. V., Tsirel S. V., Mulev S. N. Zakonomernosti razvitiya i metodika operativnoy otsenki tekhnogennoy seysmicheskoy aktivnosti na gornyykh predpriyatiyakh i v gornodobyvayushchikh regionakh (Development regularities and methods of operative assessment of technogenic seismic activity at mining enterprises and in mining regions). *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2016. No. 2. pp. 34–47.
17. Nesterenko Yu. M., Kosolapov O. V., Nesterenko M. Yu. Seysmicheskaya aktivnost rayonov razrabatyvaemykh mestorozhdeniy uglevodородov v Yuzhnom Predural'e (Seismic activity of mined hydrocarbon deposit regions in the Southern Cis-Ural region). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010. Vol. 12, No. 1(5). pp. 1240–1244.
18. Kozыrev S. A., Usachev E. A. Proyavlenie tekhnogennoy seysmichnosti pri proizvodstve massovykh vzryvov na podzemnykh rudnikakh otkrytogo aktsionernogo obshchestva «Apatit» (Appearance of technogenic seismicity during mass explosions on underground mines of the JSC “Apatit”). *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova = Vestnik of Novosibirsk State Technical University*. 2014. Vol. 17, No. 2. pp. 238–245.
19. Solovitskiy A. N. Monitoring geodinamicheskikh yavleniy razrushitel'nogo kharaktera pri osvoenii mestorozhdeniy (Monitoring of destructive geodynamic phenomena during subsoil mastering). *GEO-SIBIR-2010 : materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa, 19–29 aprelya 2010 goda* (GEO-SIBERIA-2010 : materials of International scientific congress, April 19–29, 2010). Novosibirsk : Siberian State Geological Academy, 2010. pp. 28–31.