

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
РЕГИСТРАЦИИ МЕДЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН
ЛАЗЕРНЫМ ДЕФОРМОГРАФОМ

И.Ю. Рассказов, В.А. Луговой*, Д.И. Цой

ФГБУН Институт горного дела ДВО РАН, 680000 Хабаровск, Россия.

E-mail: *Lugovoy@dst.khv.ru

Аннотация

В статье представлены экспериментальные исследования по обнаружению медленных деформационных волн, интенсифицирующих геомеханические процессы в массиве горных пород, с применением высокочувствительных лазерных измерений. Проведены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния удаленных землетрясений на состояние горного массива Стрельцовского рудного поля, регистрации удаленных землетрясений и их предвестников. Приведены результаты регистрации землетрясения в заливе Аляска. Установлено влияние удаленных землетрясений на акустическую активность горного массива, которое проявляется в виде значительного увеличения количества акустических событий и их энергии после регистрации сейсмической волны. Выявлено, что наличие деформационных и сейсмических волн от удаленных землетрясений можно отнести к дополнительным факторам, инициирующим деформационные процессы в горном массиве. Своевременная регистрация данных волн и корректная их интерпретация позволят значительно повысить достоверность прогноза энергетических геодинамических событий в удароопасных массивах горных пород при разработке месторождений в целях предотвращения катастрофических событий.

Ключевые слова: Деформационное поле, деформационные волны, комплексный геодинамический мониторинг, лазерные высокоточные измерения, удароопасность

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF REGISTRATION OF SLOW DEFORMATION WAVES BY A LASER STRAINMETER

I.Y. Rasskazov, V.A. Lugovoy*, D.I. Tsoi

*Federal Publicly Funded Institution of Science “Institute of Mining” of Far East Division
of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk city, 680000, Russia*

E-mail: *Lugovoy@dst.khv.ru

Abstract

The article presents experimental investigations on the detection of slow waves intensifying geomechanical processes in rock massif, with the application of high-sensitivity laser measurements. The results of experimental research for the evaluation of remote earthquakes impact on the condition of rock massif of “Streltsovskoe” ore field, registration of remote earthquakes and their forerunners are given. The results of the earthquake in the Gulf of Alaska, is represented in the article. The influence of distant earthquakes on the rock mass acoustic activity, which manifests itself in the form of a significant increase in the number of acoustic events and their energy after the registration of a seismic wave, is established. It is revealed that the presence of deformation and seismic waves from distant earthquakes can be attributed to additional factors that initiate deformation processes in the rock massif. Timely recording of these waves and their correct interpretation will significantly improve the accuracy of the prediction of energy geodynamic events in shock-hazardous rock masses when developing fields in order to prevent catastrophic events.

Keywords: Deformation field, stress-related waves, comprehensive geodynamic monitoring, high-precision laser measurements, rock-bump hazard.

Введение

Высокая интенсивность горных работ на рудниках ПАО “Приаргунское производственное горно-химическое объединение” (ПАО “ППГХО”) привела к формированию обширной зоны техногенной нарушенности геосферы, что явилось одной из причин активизации геодинамических процессов в массиве горных пород, вмещающем отработываемые месторождения.

Проявления горного давления при обработке глубоких горизонтов месторождений протекают на фоне высокой современной геотектонической активности региона.

Для комплексных исследований по изучению геодинамической и сейсмической обстановки, на месторождениях ПАО «ППГХО» силами ряда академических институтов создана и совершенствуется многоуровневая система комплексного геодинамического мониторинга, объединившая сейсмический, геоакустический и деформационный методы и измерительные комплексы в единую измерительную сеть.

В процессе создания многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга в 2012 г. в горной выработке на месторождении «Антей» ПАО «ППГХО» на глубине 300 м. установлен 50-метровый лазерный деформограф (рис. 1) [2]. Оптическая часть деформографа собрана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона неравноплечего типа с длиной рабочего плеча 50 м, ориентированного на северо-восток под углом 30° , и частотно-стабилизированного лазера фирмы MellesGriott. Данный прибор способен регистрировать смещения земной коры с точностью до 0.1 нм в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц [12].

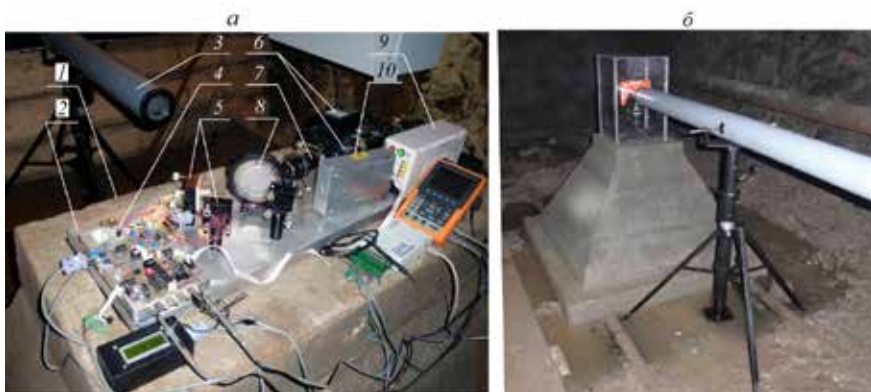


Рис. 1 Лазерный деформограф, установленный на геодинамическом полигоне в районе Стрельцовского рудного поля: а — интерференционный узел; б — уголкового отражателя и фрагмент воздушонаполненного световода: 1 — бетонное основание; 2 — оптическая скамья; 3 — лучевод; 4 — система регистрации; 5 — пьезокерамические узлы; 6 — лазер с блоком питания; 7 — коллиматор; 8 — делительная пластина; 9 — блок питания системы регистрации; 10 — резонансный усилитель.

Постановка проблемы

Важнейшей задачей деформографических наблюдений является обнаружение предвестников землетрясений и горных ударов, которые могут выступать в качестве спускового механизма высокоэнергетических сейсмических событий в удароопасном горном массиве.

В рамках модели иерархии блоков [5, 11] наряду с быстрыми сейсмическими волнами, генерируемыми в результате разрушения твердой породы, существуют медленные деформационные волны, сопровождающие процесс распространения энергии упругой деформации посредством взаимодействия отдельных блоков, имеющих собственные колебательные степени свободы.

Как показали работы исследователей [3, 9, 10, 13] деформационно-волновые процессы в земной коре, являются триггерным механизмом различных высокоэнергетических сейсмособытий (землетрясений, горных ударов и т.д.). Одновременно, они могут являться предвестниками этих событий. Актуальной становится задача их обнаружения и регистрации. Результаты проведенных исследований показывают, что при наличии необходимых измерительных средств регистрации деформационно-волновых процессов, а также, соответствующих методических разработок по выделению медленных деформационных волн появляется возможность контролировать динамико-кинематические характеристики последних в региональном и планетарном масштабе.

Основные результаты деформографических наблюдений медленных деформационных волн сводятся к следующему [1,5]:

- получено подтверждение существования явления возбуждения деформационной раскочки с периодами колебаний в полосе 0.5–2 часа за 1.5–2 суток перед сейсмособытиями;
- имеет место корреляционная связь между графиками изменения деформаций земной коры и атмосферного давления;
- характерный диапазон скоростей медленных деформационных волн для землетрясений энергетических классов $K = 14.1 \div 14.6$ определен величинами порядка $0.5 \div 2$ м/с.
- зафиксировано возмущенное, с точки зрения ежедневного спокойного суточного хода, поведение деформационного процесса (поведение геоакустической эмиссии) [5],– резкие колебания, которые имели большую амплитуду, около 1 мкм. Явление зарегистрировано

за сутки до сильного сейсмического события, и его длительность составила 8 часов. Оценка скорости деформационных возмущений составила 0.1 м/с, что соответствует скорости медленных деформационных волн.

Проблема снижения риска техногенных катастроф при крупномасштабных горных работах актуальна для Дальневосточного региона России, где разрабатываются месторождения, опасные по горным ударам. К числу предприятий, эксплуатирующих удароопасные месторождения, относится ПАО “Приаргунское производственное горно-химическое объединение” (ПАО “ППГХО”, юго-восточное Забайкалье) [6, 7].

Основные результаты

Для оценки влияния землетрясений на состояние горного массива и регистрации горных ударов в районе ведения горных работ на урановых месторождениях Стрельцовского рудного поля, отработки методики регистрации сейсмособытий и их предвестников были предприняты экспериментальные исследования с участием лазерного деформографа [8] и многоканальной автоматизированной геоакусти-

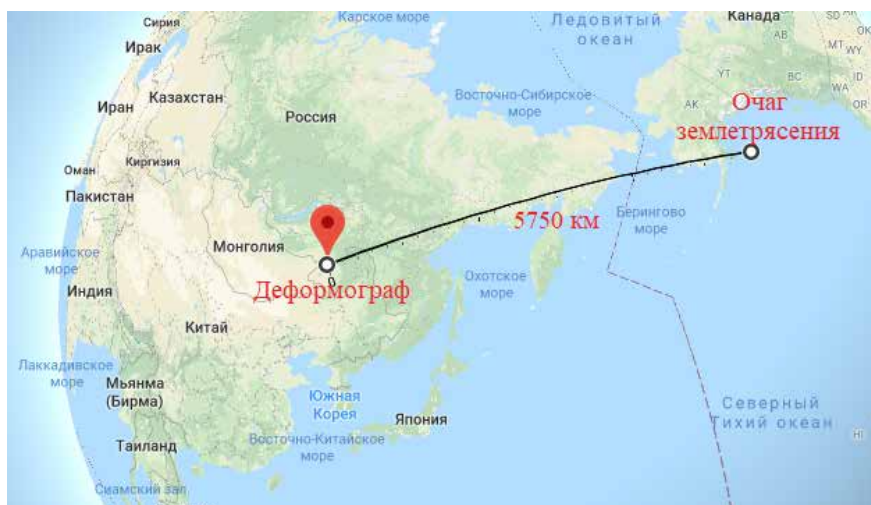


Рис. 2 Расстояние от очага землетрясения (залив Аляска) до места установки деформографа)

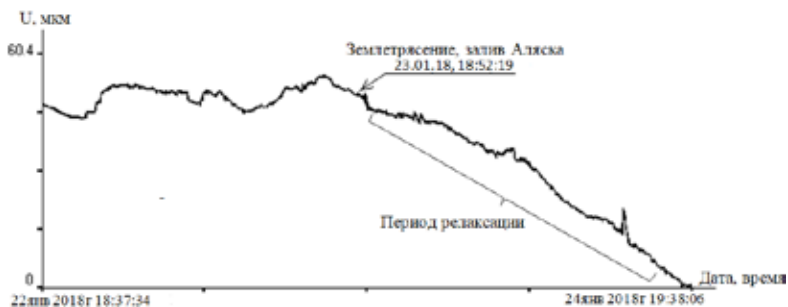


Рис. 3 Двухсуточная запись лазерного деформографа (за сутки до землетрясения и сутки после)

ческой системой контроля горного давления “PROGNOZ ADS”, которая позволяет регистрировать и определять параметры АЭ-событий в частотном диапазоне 0.5 – 12 кГц.

Исследования проводились в течение 2015 – 2018 года.

В качестве примера, далее представлены результаты воздействия на горный массив крупного удаленного землетрясения магнитудой 7,8, произошедшего в заливе Аляска 23 января 2018 г. в 18:31:39 местного времени на расстоянии 5750 км от района наблюдения (рис. 2).

На рис. 3 представлена двухсуточная запись лазерного деформографа (за сутки до землетрясения и сутки после). На рисунке видно, что после землетрясения произошла разгрузка массива, при этом время релаксации составило около суток.

На рис. 4 представлены результаты влияния землетрясения в низкочастотной области (децимация 10000).

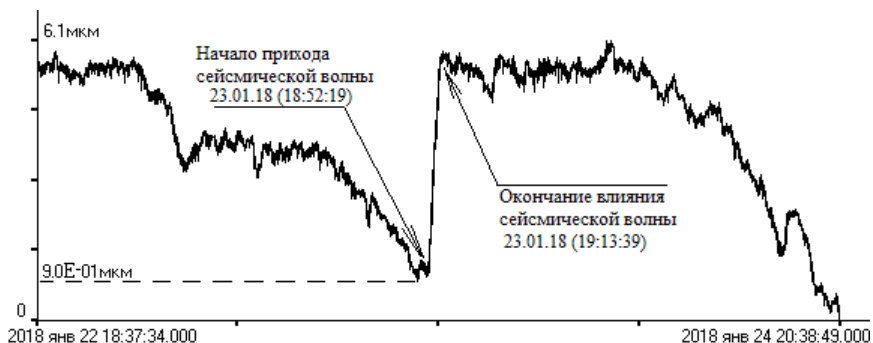


Рис. 4 Результаты влияния землетрясения в низкочастотной области (децимация 10000)

Можно наблюдать, что в результате землетрясения произошло резкое увеличение смещения с 0,9 мкм до 6,1 мкм, с момента начала прихода сейсмической волны до момента окончания ее влияния на горный массив в течение 21 мин.

Результаты анализа влияния удаленных землетрясений на геодинамическую активность Стрельцовского рудного поля, полученные с участием многоканальной автоматизированной геоакустической системой контроля горного давления “PROGNOZ ADS”, представлены на рис. 5 и 6.

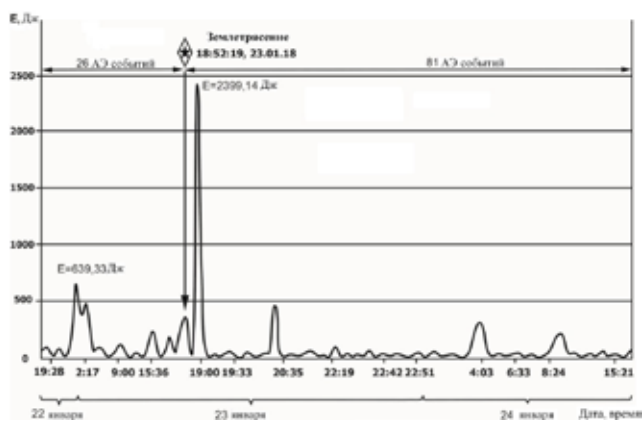


Рис. 5 График геоакустической активности до и после землетрясения.

На рис. 5 время землетрясения обозначено вертикальной стрелкой. Из рисунка видно, что число событий после землетрясения увеличилось в более чем в 3 раза, а энергетический параметр возрос до значений 2399 Дж.

На рис. 6 в проекции 9-14 горизонтов на вертикальную плоскость представлена карта геоакустической активности до и после землетрясения. При этом в результате землетрясения очаг сейсмоакустических событий переместился в соседний блок. При анализе других удаленных землетрясений ситуация менялась: очаг сейсмоакустических событий не перемещался, а его активность возрастала.

Значительные расстояния от землетрясений до зоны контроля массива не позволили зарегистрировать деформационных предвестников землетрясений, которые могли бы служить тревожным сигналом нарушений сплошности контролируемого горного массива.

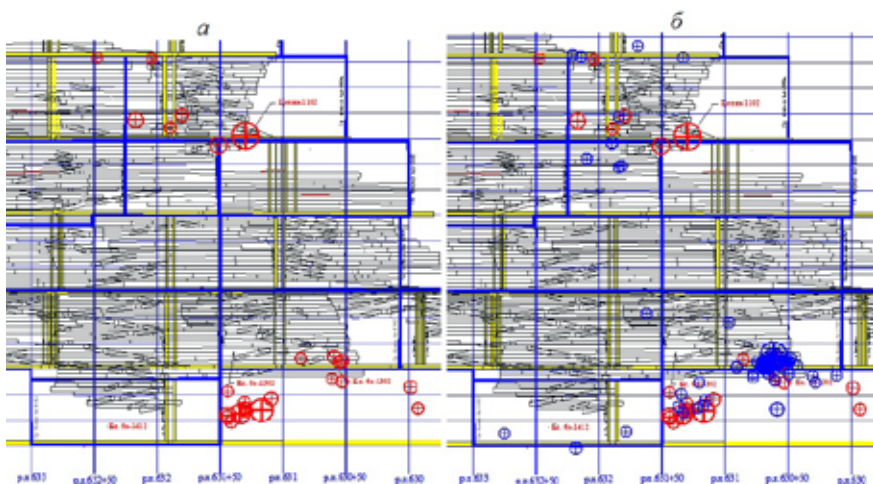


Рис. 6 Геоакустическая активность в проекции 9-14 горизонтов на вертикальную плоскость: а – до землетрясения, б – после землетрясения.

С точки зрения исследования возможности регистрации предвестников сейсмособытий в горном массиве особый интерес представляет анализ деформационных сигналов, сопутствующих горному удару в контролируемой деформографом зоне, зарегистрированному 29 февраля 2016 года (рис.7).

Внешним проявлением горного удара были значительные сотрясения поверхности земли и зданий, расположенных на поверхности вблизи шахты. При осмотре специалистами горных выработок в

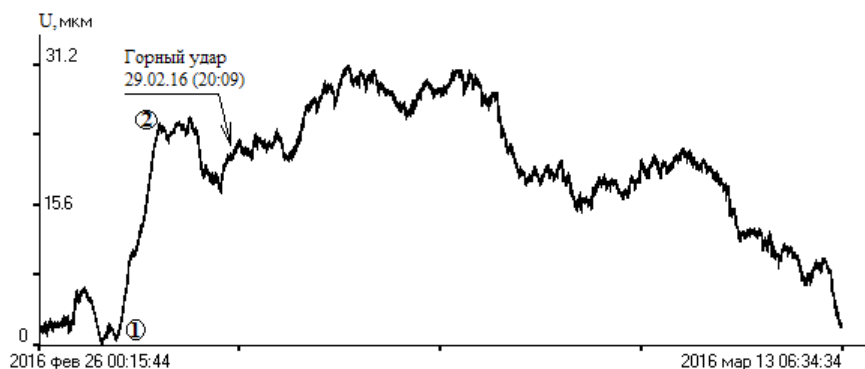


Рис.7 Двухнедельная запись лазерного деформографа.

опасном блоке было обнаружено заколообразование, вывал горной породы, отслоение горной породы и принято решение об отстое блока до улучшения геомеханической обстановки.

Запись деформационного сигнала от горного удара лазерным деформографом (рис.7) охватывает интервал времени от 26 февраля до 13 марта 2016 года. Децимация при анализе сигнала порядка 10 000, что определяет частотный диапазон анализа до 50 мГц.

Интересным представляется участок записи, отмеченный цифрами 1 и 2. Его следует интерпретировать, как значительное сжатие горного массива, предшествующее горному удару. Цифра 1 – начало сжатия – 27 февраля 13 часов 33 мин. Цифра 2 – окончание сжатия – 28 февраля 19 часов 57 мин. Таким образом, примерно за 1,5 суток до удара зафиксировано аномальное поведение горного массива в зоне контроля лазерного деформографа. Далее, вплоть до 13 марта лазерный деформограф регистрирует разгрузку массива и возвращение к первоначальному состоянию, зарегистрированному 26 февраля.

Таким образом, наблюдение за деформационным сигналом с лазерного деформографа в низкочастотной области несет информацию о подготовке высокоэнергетического сейсмического события.

Заключение

В настоящее время влияние медленных деформационных волн на геоакустическую активность горного массива, выступающее зачастую в качестве возможного триггерного эффекты широко обсуждаются в работах, связанных с изучением и анализом сейсмических процессов. Наблюдения показывают, что среда с большей или меньшей степенью реагирует на различные внешние воздействия природного или техногенного характера. Для понимания триггерности процессов требуется применение комплексных методов исследования, включающих сейсмический, геоакустический, деформационный методы с применением соответствующих измерительно-регистрационных автоматизированных систем.

По результатам исследований установлено влияние удаленных землетрясения на геодинамическую активность Стрельцовского рудного поля, проявляющееся в виде значительного увеличения количества акустических событий и их средней энергии. Как показывает практика, изменение данных параметров в сторону увеличения зача-

стую приводит к активизации геодинамических процессов в горном массиве, которая может привести к динамическим проявлениям различной степени.

Таким образом, наличие деформационных и сейсмических волн от удаленных землетрясений можно отнести к дополнительным факторам, инициирующим деформационные процессы в горном массиве. Своевременная регистрация данных волн и корректная их интерпретация позволят значительно повысить достоверность прогноза энергетических геодинамических событий в удароопасных массивах горных пород при разработке месторождений в целях предотвращения катастрофических событий.

Литература

1. Багаев С.Н., Опарин В.Н., Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д. О волнах маятникового типа и методе их выделения от крупных землетрясений по записям лазерного деформографа // ФТПРПИ. 2010. № 3. С. 3-11.
2. Долгих Г. И., Рассказов И. Ю., Луговой В. А., Аникин П. А., Цой Д. И., Швецов В. А., Яковенко С. В. Краснокаменский лазерный деформограф // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 5. С. 138–139.
3. Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 1. С. 5-22.
4. Курленя М.В., Опарин В.Н. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия // ФТПРПИ. 1990. № 4.
5. Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Геоакустическая эмиссия и деформации осадочных пород. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России, Петропавловск-Камчатский, 11-17 октября 2009г.
6. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Просекин Б. А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // ФТПРПИ. 2012. № 3. С. 3-13.
7. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Шевченко Б. Ф., Усиков В. И., Гильманова Г. З. Современное напряженно-деформированное состояния верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты // Физика Земли. 2014. № 3. С. 104–113.
8. Рассказов И.Ю., Долгих Г.И., Петров В.А., Луговой В.А., Долгих С.Г., Саксин Б.Г., Цой Д.И. / Применение лазерного деформографа в системе комплексного геодинамического мониторинга в районе Стрельцовского рудного поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 6. С. 29-37.
9. Опарин В.Н. и др. Методы и системы сейсмодформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов.Т.1,2. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
10. Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н. Особенности деформаций земной коры накануне близкого сильного землетрясения по данным высокочув-

ствительных лазерных измерений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: сборник трудов Всероссийской конференции с участие иностранных ученых (Новосибирск, 6-10 июля 2009 г.). Новосибирск, 2010. С. 30-37.

11. Paige E. Snelling, Laurent Godin, Stephen D. McKinnon. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 58. February 2013. P. 166-179.
12. Takemoto Shuzo, Momose Hideo, Araya Akito, etc. A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains, Journal of Geodynamics, 2006, Vol. 41. P. 23–29.
13. West M., J.J. Sanchez, S.R. McNutt: «Periodically Triggered Seismicity at Mount Wrangell, Alaska, After the Sumatra Earthquake». Science. 2005. Vol. 308. p. 1144–1146.

References

1. Bagaev S. N., Oparin V. N., Orlov V. A., Panov S. V., Parushkin M. D. Concerning pendulum waves and methods of their detection from major earthquakes by laser deformograph records. Journal of Mining Science. 2010. V. 46. No.3. p. 217-224.
2. Dolgikh G.I., Rasskazov I. Yu., Lugovoi V.A., Anikin P.A., Tsoi D.I., Shvets V.A., Yakovenko S.V. Krasnokamensky laser deformograph. Instruments and experimental technique. 2013. No. 5. P. 138 - 139.
3. Kocharyan G. G., Kostyuchenko V. N., Pavlov D. V.: Initiation of deformation processes in the earth's crust by weak disturbances. Physical mezomechanics, 1 (7), 5-22 (2004).
4. Kurlenia M. V., Oparin V. N., Concerning the event of alternating reaction of rocks to dynamic impacts. Journal of Mining Science. 1990. No.4.
5. Larionov I. A., Shevtsov B. M. Geo-acoustic emission and deformation of sedimentary rocks. The problems of comprehensive geo-physical monitoring of Far East of Russia. IKIR FED RAS: Petropavlovsk-Kamchatsky city, 2009.
6. Rasskazov I. Y., Saksin B. G., Petrov V. A., Prosekin B. A. Geomechanical conditions and peculiarities of dynamic occurrences of overburden stress at "Antei" deposit. Journal of Mining Science. 2012. No.3. pp. 3-13.
7. Rasskazov I. Y., Saksin B. G., Petrov V. A., Shevchenko B. F., Usikov V. I., Gilmanova G. Z. Present Day Stress Strain State in the Upper Crust of the Amurian Lithosphere Plate. Izvestia, Physics of the Solid Earth. 2014. No. 3. P. 104 – 113.
8. Rasskazov I. Y., Dolgikh G. I., Petrov V. A., Lugovoy V. A., Dolgikh S. G., Saksin B. G., Tsoi D. I.: Laser Deformograph in Integrated Geodynamic Monitoring within Streltsov Ore Field. Journal of Mining Science. 2016. No 6. 29-37.
9. Oparin V. N. and others. Methods and systems of seismo-deformation monitoring of induced earthquakes and mine bumps. Vol. 1, 2. Novosibirsk city: Publishing house of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2009.
10. Orlov V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Fomin Yu.N. Peculiarities of the Earth's crust deformations on the eve of a close strong earthquake according to highly sensitive laser measurements. Geodynamics and stress state of the Earth's interior: proceedings of the All-Russian Conference with the participation of foreign scientists (Novosibirsk, July 6-10, 2009). Novosibirsk, 2010. p. 30-37.

11. Paige E. Snelling, Laurent Godin, Stephen D. McKinnon. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 58. February 2013. P. 166-179.
12. Takemoto Shuzo, Momose Hideo, Araya Akito, etc. A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains, *Journal of Geodynamics*, 2006, Vol. 41. P. 23–29.
13. West M., J.J. Sanchez, S.R. McNutt: «Periodically Triggered Seismicity at Mount Wrangell, Alaska, After the Sumatra Earthquake». *Science* 2005. Vol. 308. p. 1144–1146.