

УДК 622.831.1:534

Цой Денис Игоревич

научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51
e-mail: adm@igd.khv.ru

Рассказов Максим Игоревич

научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: adm@igd.khv.ru

Гладырь Андрей Владимирович

старший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: rush3112@mail.ru

Терешкин Андрей Александрович

научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: adm@igd.khv.ru

Константинов Александр Викторович

младший научный сотрудник,
Институт горного дела ДВО РАН
e-mail: adm@igd.khv.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ДЛИННОПЕРИОДНЫХ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН
НА ГЕОАКУСТИЧЕСКУЮ
АКТИВНОСТЬ ГОРНОГО МАССИВА***Аннотация:*

Представлены измерительные комплексы: лазерный деформограф и нанобарограф, установленные в горной выработке на глубине 300 м. Данные комплексы входят в многоуровневую систему мониторинга, созданную на месторождениях ПАО «ППГХО». По результатам экспериментальных исследований лазерного деформографа при регистрации деформационных возмущений в горном массиве установлено, что данное оборудование уверенно регистрирует как колебания породного массива, вызванные взрывными работами, так и возвратно-поступательное движение тектонических блоков. Приведены результаты регистрации землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Для оценки влияния землетрясений на состояние горного массива в районе ведения горных работ на урановом месторождении «Антей», отработки методики регистрации землетрясений и предвестников землетрясений были предприняты экспериментальные исследования с участием лазерного деформографа, лазерного нанобарографа и многоканальной автоматизированной геоакустической системы контроля горного давления «Prognoz ADS». 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. Оценка влия-

DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.066

Tsoy Denis I.

Researcher, Institute of Mining,
Far East Branch of RAS,
680000, Khabarovsk, 51 Turgeneva Str.
e-mail: adm@igd.khv.ru

Rasskazov Maksim I.

Researcher, Institute of Mining,
Far East Branch of RAS,
e-mail: adm@igd.khv.ru

Gladyr Andrey V.

Senior Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: rush3112@mail.ru

Tereshkin Andrey A.

Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: adm@igd.khv.ru

Konstantinov Aleksandr V.

Junior Researcher,
Institute of Mining, Far East Branch of RAS
e-mail: adm@igd.khv.ru

**STUDY OF INFLUENCE
OF LONG-PERIOD
DEFORMATION WAVES
ON GEOACOUSTIC
ACTIVITY OF ROCK MASS***Abstract:*

The paper presents the measurement systems: laser deformograph and nanobarograph installed in a 300 m deep mine. These systems are part of the multilevel monitoring system created at the deposits of JSC PPGHO. According to the results of experimental studies of the laser deformograph in the registration of deformation disturbances in the rock mass, it was established that this equipment confidently registers both rock mass vibrations caused by blasting operations and reciprocating motion of tectonic blocks. The paper describes the results of registration of earthquakes in the Baikal rift zone. In order to assess the impact of earthquakes on the state of the rock mass in the area of mining operations at the Antey uranium deposit, to develop the methods of registration of earthquakes and earthquake precursors, the experimental studies have been undertaken using the laser deformograph, the laser nanobarograph and the multichannel automated geoaoustic system for monitoring rock pressure Prognoz ADS. The influence of remote earthquakes on the acoustic activity of the rock mass, which appears in the form of a significant increase in the number of acoustic events and their energy after the registration of the seismic wave. Assessing the impact of distant earthquakes on the state of the rock mass was carried out based on the results of measurements of the laser deformograph, laser nanobarograph and geoaoustic rock pressure monitoring system. It has been revealed that the

ния удаленных землетрясений на состояние горного массива осуществлялась по результатам измерений лазерного деформографа, лазерного нанобарографа и геоакустической системы контроля горного давления. 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: лазерный деформограф, лазерный нанобарограф, геоакустическая система, горное давление, деформационные волны, отдаленное землетрясение, геоакустическая активность, триггерный эффект.

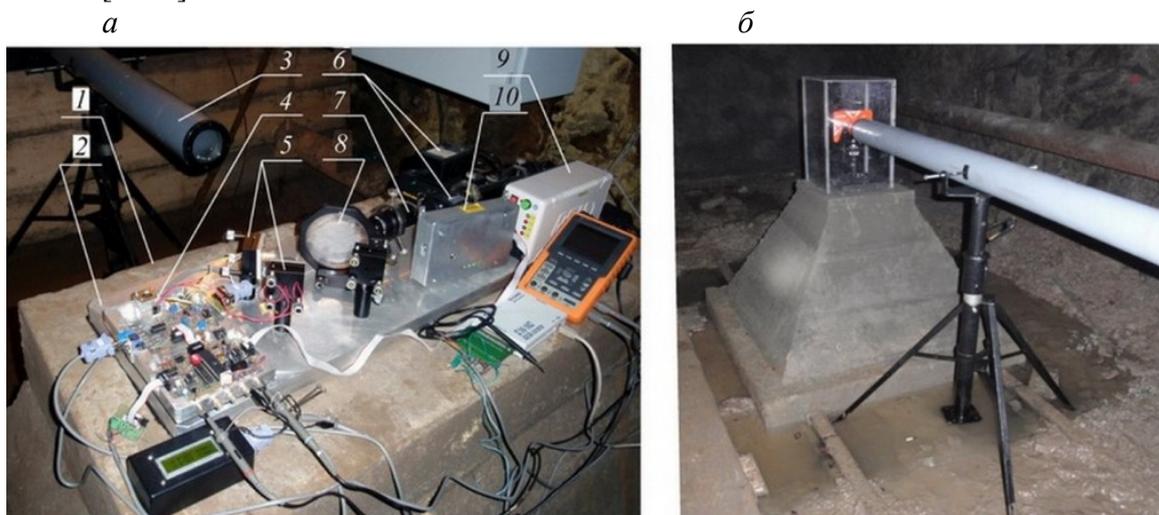
presence of deformation and seismic waves from remote earthquakes can be attributed to additional factors that initiate deformation processes in the rock mass. Timely registration of these waves and their correct interpretation will significantly increase the reliability of the forecast of energy geodynamic events in bump-hazardous rock masses during the development of deposits in order to prevent catastrophic events.

Key words: laser deformograph, laser nanobarograph, geoacoustic system, rock pressure, deformation waves, remote earthquake, geoacoustic activity, trigger effect.

Введение

Высокая интенсивность горных работ на рудниках ПАО «Приаргунскоепроизводственное 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 обрабатываемые месторождения [1].

Для комплексных исследований по изучению геодинамической и сейсмической обстановки на месторождениях ПАО «ППГХО» силами нескольких академических институтов создана и совершенствуется многоуровневая система комплексного геодинамического мониторинга, объединившая измерительные комплексы, реализующие сейсмический, геоакустический и деформационный методы в составе единой измерительной сети [2 – 4].



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

Рис. 1 – Элементы измерительного комплекса лазерного деформографа:
а – интерференционный узел; б – уголкового отражателя и фрагмент воздушнонаполненного световода

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) [5]. 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 [5 – 7].

Также в аппаратной секции располагается лазерный нанобарограф для регистрации вариаций атмосферного давления. Разрешающая способность прибора (точность) составляет 50 мкПа.

Обработка результатов измерений деформографа (нанобарографа) проводится с использованием специализированного программного обеспечения. Результаты измерений представляются в следующем виде:

- 1) зависимостью смещения базы деформографа (нанобарографа) от времени, которая позволяет оценить длиннопериодные вариации акустического поля;
- 2) спектральной характеристикой сигналов, полученной при обработке временной зависимости смещения;
- 3) динамической спектрограммой, которая иллюстрирует поведение спектральных составляющих сигнала во времени.

Экспериментальные исследования деформационных возмущений

При проведении тестовых и пусконаладочных работ в процессе внедрения лазерного деформографа в измерительный цикл по результатам обработки данных выявлен характерный спектр диапазона собственных колебаний Земли от основного сфероидального тона ${}_0S_2$ до другого основного сфероидального тона ${}_0S_0$, что подтверждает высокие технические характеристики лазерного деформографа. В более высокочастотном диапазоне (от 1 мин до периода основного сфероидального тона ${}_0S_0$) может наблюдаться совпадение периодов собственных колебаний Земли с периодами собственных колебаний геоблоков земной коры, что необходимо учитывать при проведении горных работ ввиду возможных резонансных и околорезонансных эффектов [8, 9].

На 14-суточной записи зарегистрированы суточные и полусуточные колебания (величина которых составляет 23 ч 18 мин и 11 ч 53 мин, соответственно) на фоне длиннопериодных колебаний. Уверенная регистрация суточных и полусуточных колебаний свидетельствует о стабилизации основания, на котором установлена оптическая скамья и уголкового отражателя деформографа, и о возможности регистрировать длиннопериодные смещения массива горных пород.

Установлено, что деформограф уверенно регистрирует колебания породного массива, вызванные взрывными работами на рудниках. Для оценки параметров взрывных воздействий на деформационное поле в районе лазерного деформографа проведена серия опытных взрывов, с помощью которых исследовались диаграмма направленности и ее влияние на чувствительность лазерного деформографа и степень затухания сигнала в массиве горных пород.

Установлено, что практически на всех участках записей деформаций присутствуют колебания различной амплитуды с периодом около 2 мин, что может быть обусловлено собственными частотами одного из геоблоков в районе установки деформографа. Внешние воздействия приводят к колебаниям тектонических блоков (деформографом зарегистрировано их возвратно-поступательное движение с частотой 2 и 3 мин), которые, в свою очередь, могут привести к резонансным явлениям, способным инициировать деформационные волны, провоцирующие динамическое разрушение высоконапряженных участков массива горных пород [8, 10].

Результаты исследования влияния медленных деформационных волн от удаленных землетрясений на состояние горного массива

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 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. Положительный результат в поисках таких волн позволил бы развить новые методики прогнозирования опасных геодинамических событий [11 – 13].

Как показали работы исследователей [3,4], деформационно-волновые процессы в земной коре являются триггерным механизмом различных высокоэнергетических сейсмических событий (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.

Для оценки влияния землетрясений на состояние горного массива в районе ведения горных работ на месторождении «Антей», отработки методики регистрации землетрясений и предвестников землетрясений были предприняты экспериментальные исследования с участием лазерного деформографа, лазерного нанобарографа и многоканальной автоматизированной геоакустической системой контроля горного давления «PROGNOZADS», которая позволяет регистрировать и определять параметры АЭ-событий в частотном диапазоне 0,5 – 12 кГц.

Исследования проводились в течение 2015 – 2017 гг.

В качестве примера рассмотрим результаты регистрации лазерным деформографом, лазерным нанобарографом и геоакустической системой землетрясений в районе озера Байкал 22 ноября 2016 года магнитудой $M=4,6$ на расстоянии 738 км от района наблюдения (рис. 2).

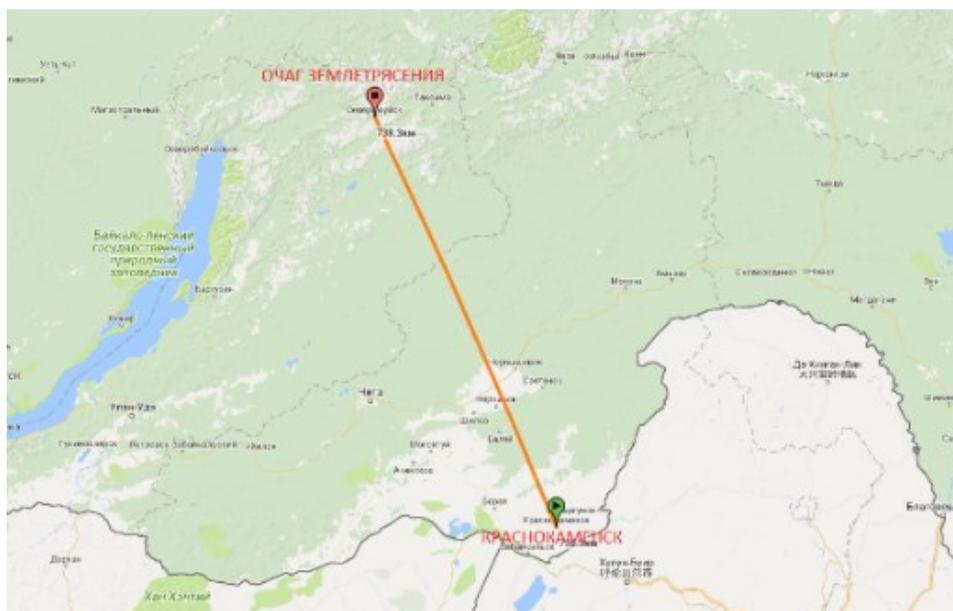


Рис. 2 – Расположение очага землетрясения в Байкальской зоне и точки регистрации деформационных волн (г. Краснокаменск)

На рис. 3, 4 приведена временная запись момента землетрясения в Байкальской зоне. Регистрация осуществлялась лазерным деформометром и лазерным нанобарографом. На оси абсцисс отложено время регистрации с указанием начала и окончания процесса регистрации. На оси ординат для рис. 3 отложено относительное смещение базы деформографа (U , мкм) за время регистрации. На оси ординат для рис. 4 отложено относительное изменение атмосферного давления (P , Па) за время регистрации.

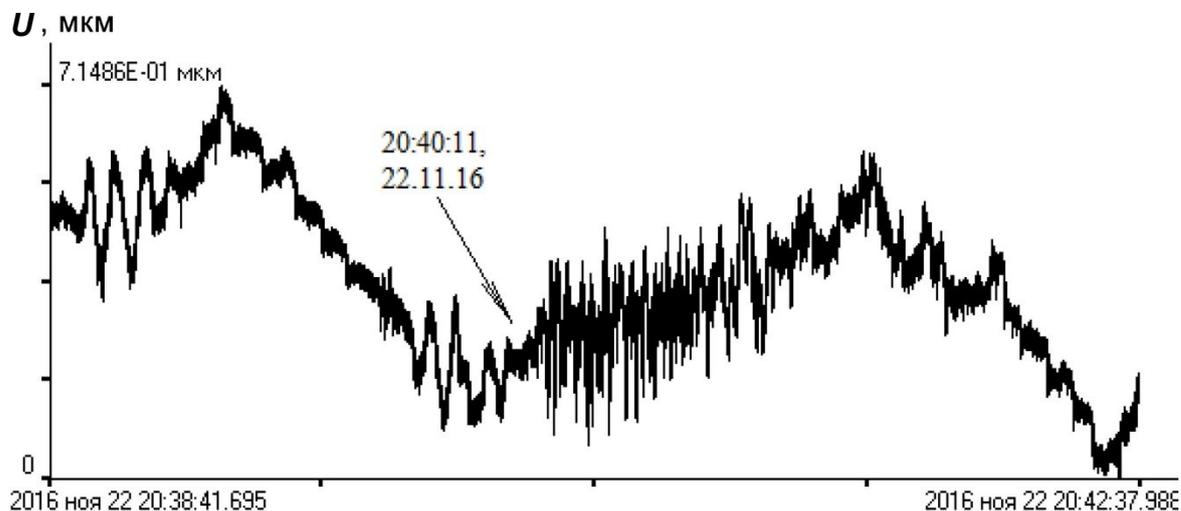


Рис. 3 – Регистрация землетрясения в Байкальской зоне средствами лазерного деформографа

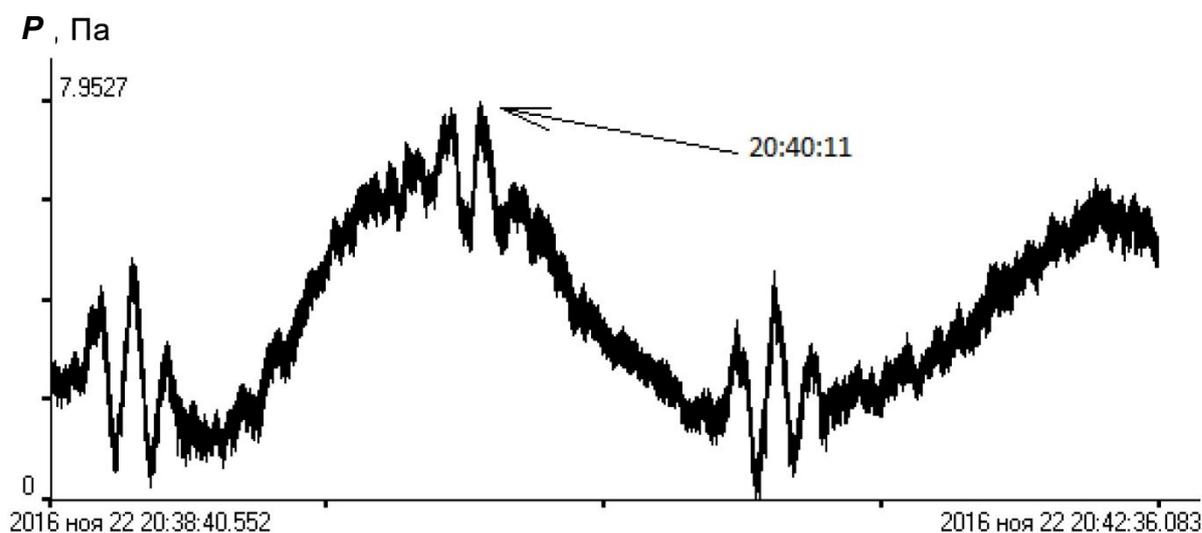


Рис. 4 – Регистрация землетрясения в Байкальской зоне средствами лазерного нанобарографа

Результаты влияния землетрясения в Байкальской зоне на геодинамическую активность горного массива в районе месторождения «Антей», полученные с участием многоканальной автоматизированной геоакустической системой контроля горного давления «PrognozADS», представлены на рис.5.

На оси абсцисс (см. рис. 5) отложено время регистрации сейсмоакустических событий системой «PrognozADS». Время землетрясения обозначено вертикальной линией. На оси ординат отложено значение энергетического показателя зарегистрированных сейсмоакустических событий. Из рис. 5 видно значительное увеличение числа событий и средней энергии событий.

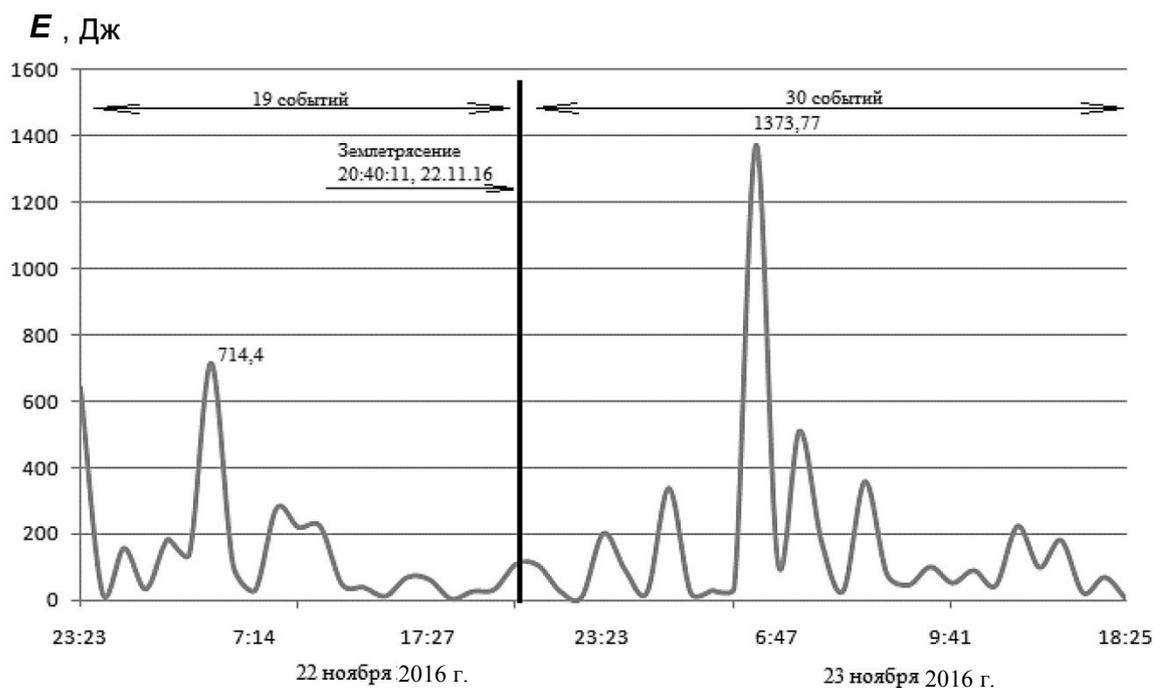


Рис. 5 – Геодинамическая активность горного массива до и после землетрясения в Байкальской зоне

При этом значительное увеличение числа событий было зарегистрировано в том же блоке выработки, в котором они наблюдались до землетрясения. На рис. 6 приведены зарегистрированные геоакустические события до землетрясения и после на плане горных выработок рудника «Глубокий» месторождения «Антей» ПАО «ППГХО» в проекции на вертикальную плоскость. Но оси абсцисс (см. рис. 6) отложены маркшейдерские координаты оси X, на оси ординат – оси Z.

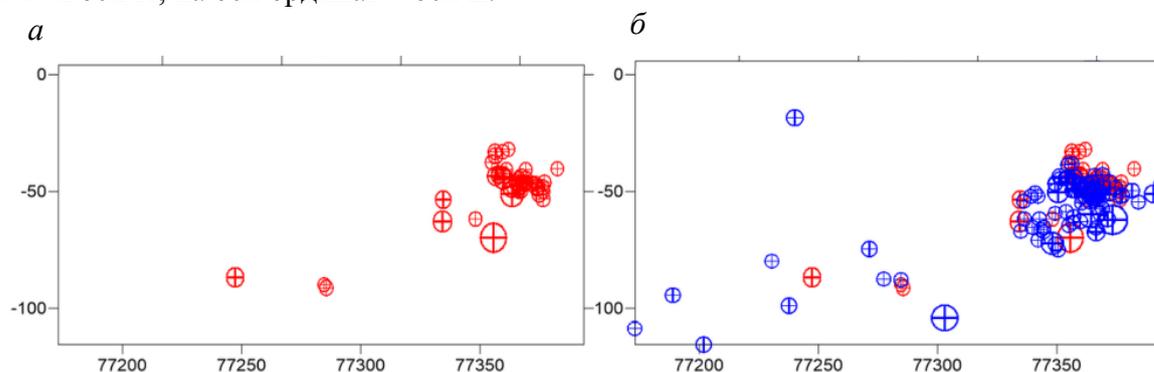


Рис. 6 – Геоакустическая активность по данным «PrognozADS»: а – до землетрясения; б – после землетрясения в Байкальской зоне

Следует отметить, что такая ситуация, при которой сохраняется акустическая активность выработок, наблюдалась не всегда. В других случаях после землетрясений увеличенная геодинамическая активность наблюдалась в соседних блоках, т.е. распространялась по выработке. Как полагают авторы, это в значительной степени зависит от направления прихода сейсмической волны.

Для установления пред- и постистории сейсмособытия анализировались двухсуточные записи, суточные записи до землетрясения и после. На рис. 7 представлены двухсуточные записи деформографа (а) и нанобарографа (б). Здесь в отличие от записей момента землетрясения обращает на себя внимание высокая степень корреляции результатов (коэффициент корреляции составляет $-0,9986$), полученных с деформографа и

нанобарографа (разница в полярности сигналов объясняется тем, что рабочие точки интерферометров нанобарографа и деформографа выбраны на разных склонах).

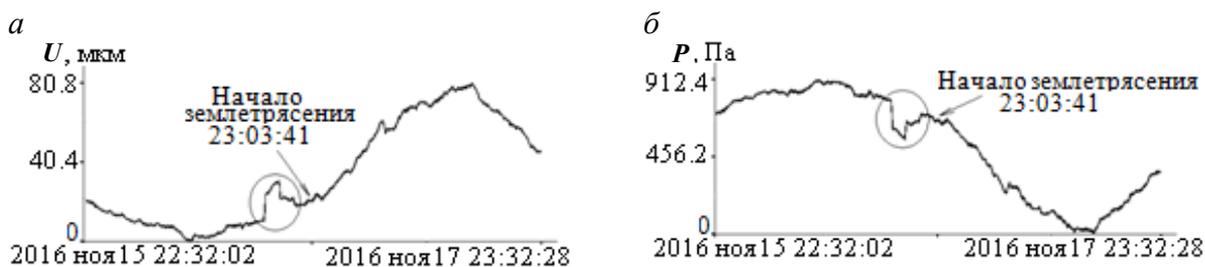


Рис. 7 – Запись сигнала деформографа (а), нанобарографа (б)

Высокая степень корреляции связана с тем, что в состав деформографа входит воздушнонаполненный световод и на механические колебания накладываются вариации показателя преломления.

Еще одной особенностью полученных результатов является наличие в каждой записи различных землетрясений бухтообразных сигналов значительной амплитуды (на рис. 6 обведены кружочком).

Это может быть реакция массива на промышленные взрывы. На это указывают сопутствующие колебания с частотой 95 Гц, которые уверенно фиксируются при анализе записей взрыва. Из рисунков видно, что деформация возвращается почти в исходную точку. В противном случае следовало бы предположить, что где-то происходит ее увеличение, что может привести к разрушению и обвалу массива.

Заключение

В настоящее время влияние длиннопериодных деформационных волн на геоакустическую активность горного массива, выступающее зачастую в качестве возможного триггерного эффекта, широко обсуждается 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.

На месторождении «Антей» ПАО «ТПГХО» в 2015 – 2017 гг. проводились комплексные исследования по изучению геодинамической и сейсмической обстановки, в рамках которых осуществлялось изучение влияния удаленных землетрясений на геоакустическую активность массива в зоне ведения горных работ. В исследовании использовались следующие измерительно-регистрационные средства: лазерный деформограф, нанобарограф, автоматизированная геоакустическая система контроля горного давления «Prognoz ADS».

По результатам исследований установлена высокая корреляция показаний лазерного деформографа и нанобарографа.

Установлено влияние удаленных землетрясений 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 зачастую 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 деформа-

ционные 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. Адушкин В.В. Техногенная сейсмичность - индуцированная и триггерная / В.В. Адушкин, С.Б. Турунтаев. – М.: ИДГ РАН, 2015. – 364 с.
2. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы / И.Ю. Рассказов, В.А. Петров, А.В. Гладырь, Д.В. Тюрин // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 17 - 21.
3. Использование данных сейсмоакустических наблюдений для определения характера развития очага разрушения породного массива / И.Ю. Рассказов, С.В. Цирель, А.О. Розанов, А.А. Терешкин, А.В. Гладырь // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 2. – С. 29 - 37.
4. Развитие и модернизация системы контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО "ППГХО" / И.Ю. Рассказов, А.В. Гладырь, П.А. Аникин, В.С. Святецкий, Б.А. Просекин // Горный журнал. – 2013. – № 8-2. – С. 9 - 14.
5. Результаты испытаний лазерного деформографа, установленного в Забайкалье / Г.И. Долгих, С.Г. Долгих, И.Ю. Рассказов, В.А. Луговой, Б.Г. Саксин // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 12. – С. 2240 - 2249.
6. Долгих Г.И. Аппаратно-программный комплекс для исследования динамики гидросферно-литосферных процессов / Г.И. Долгих, В.А. Чупин, А.Ф. Щербатюк // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 1. – С. 156 - 157.
7. Применение лазерного деформографа в системе комплексного геодинамического мониторинга в районе Стрельцовского рудного поля / И.Ю. Рассказов, Г.И. Долгих, В.А. Петров, В.А. Луговой, С.Г. Долгих, Б.Г. Саксин, Д.И. Цой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 29 - 37.
8. Кочарян Г.Г. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями / Г.Г. Кочарян, В.Н. Костюченко, Д.В. Павлов // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – № 1. – С. 5 - 22.
9. Долгих Г.И. Сверхнизкочастотные периодичности сейсмической активности земли / Г.И. Долгих, Ю.К. Москалюк, В.А. Чупин // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2016. – № 5 (189). – С. 128 - 130.
10. Кочарян Г.Г. Динамика деформирования блочных массивов горных пород / Г.Г. Кочарян, А.А. Спивак. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 423 с.
11. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов / В.Н. Опарин и др. – Новосибирск: Изд-во СОРАН, 2009.
12. Комплексный пространственно-разнесённый полигон на Дальнем Востоке для геонаблюдений / Г.И. Долгих, С.С. Будрин, С.Г. Долгих, А.Г. Закурко, О.В. Косарев, В.В. Овчаренко, А.А. Плотников, В.А. Чупин, В.А. Швец, С.В. Яковенко // Измерительная техника. – 2016. – № 3. – С. 34 - 36.
13. The research of remote earthquakes impact on the intensity of geomechanical processes in bump hazardous rock massif [Электронный ресурс] / V. Lugovoy, I. Rasskazov, D. Tsoj, M. Rasskazov, A. Sidliar // E3S Web of Conferences. – 2018. – Vol. 56: VII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources" (PCDG 2018), Khabarovsk, Russia, September 25-27, 2018. - URL: <https://www.e3s-conferences.org>. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185602018>. –eISSN: 2267-1242 (Web of Science, Scopus).