

УДК 662.831:550.34

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА  
В СИСТЕМЕ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
В РАЙОНЕ СТРЕЛЬЦОВСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ**

**И. Ю. Рассказов<sup>1</sup>, Г. И. Долгих<sup>2</sup>, В. А. Петров<sup>3</sup>, В. А. Луговой<sup>1</sup>,  
С. Г. Долгих<sup>2</sup>, Б. Г. Саксин<sup>1</sup>, Д. И. Цой<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: adm@igd.khv.ru,  
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

<sup>2</sup>*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,  
ул. Балтийская, 43, 690043, г. Владивосток, Россия*

<sup>3</sup>*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
пер. Старомонетный, 35, 119017, г. Москва, Россия*

Представлены результаты применения лазерного деформографа в составе системы комплексного геодинамического мониторинга в пределах Стрельцовского рудного поля. Рассмотрены технические характеристики и конструктивные особенности деформографа. Показана принципиальная возможность проведения высокоточных измерений параметров деформационного поля в шахтных условиях действующего горнодобывающего предприятия. Описаны особенности проявления собственных колебаний Земли и установлены значения деформации породного массива в зависимости от энергии источника разрушения.

*Техногенная сейсмичность, геомеханический мониторинг, лазерный деформограф, напряженно-деформированное состояние, деформационное поле*

Крупномасштабная и интенсивная техногенная деятельность, к которой относится выемка и перемещение больших объемов горных пород при разработке месторождений твердых полезных ископаемых, оказывает значительное влияние на естественное напряженно-деформированное состояние верхней части земной коры и способна приводить к активизации геодинамических процессов в этих районах.

Проявлением геодинамической активизации могут быть горно-тектонические удары, техногенная и наведенная сейсмичность и другие динамические события, прогнозирование которых представляет собой актуальную и одновременно весьма сложную проблему. Это обусловлено многофакторностью условий и причин этих опасных явлений, многообразием горно-геологических и горнотехнических характеристик исследуемых объектов, неоднородностью напряженно-деформированного состояния и значительными вариациями физико-механических свойств массивов горных пород, изменяющихся при интенсивном техногенном воздействии. Надежный прогноз таких катастрофических событий затруднен еще и потому, что поведение предельно напряженного массива горных пород, расчлененного тектоническими нарушениями, породными контактами и содержащего горные выработки различных форм и размеров, не всегда может быть описано аналитическими методами.

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»). Здесь отрабатываются подземным способом урановые месторождения Стрельцовского рудного поля (юго-восточное Забайкалье) [1, 2]. В настоящее время массив горных пород рудного поля в значительной степени нарушен горными работами. Оработку месторождений ведут четыре подземных рудника, на которых горные работы достигли глубин 500–900 м. На них зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления, вплоть до сильных и разрушительных горных ударов [2].

Высокая интенсивность горных работ на этих рудниках привела к формированию обширной зоны техногенной нарушенности геосреды, что явилось одной из причин активизации геодинамических процессов в массиве горных пород, вмещающем отработываемые месторождения. На месторождениях ПАО «ППГХО» в последние годы наблюдаются проявления техногенной сейсмичности, регистрируемые не только в подземных горных выработках, но и на поверхности. Всего за период 2010–2015 гг. на месторождениях зарегистрировано более 20 мощных, и в основном разрушительных геодинамических явлений.

Проявления горного давления при отработке глубоких горизонтов месторождений протекают на фоне высокой современной геотектонической активности региона (рис. 1).

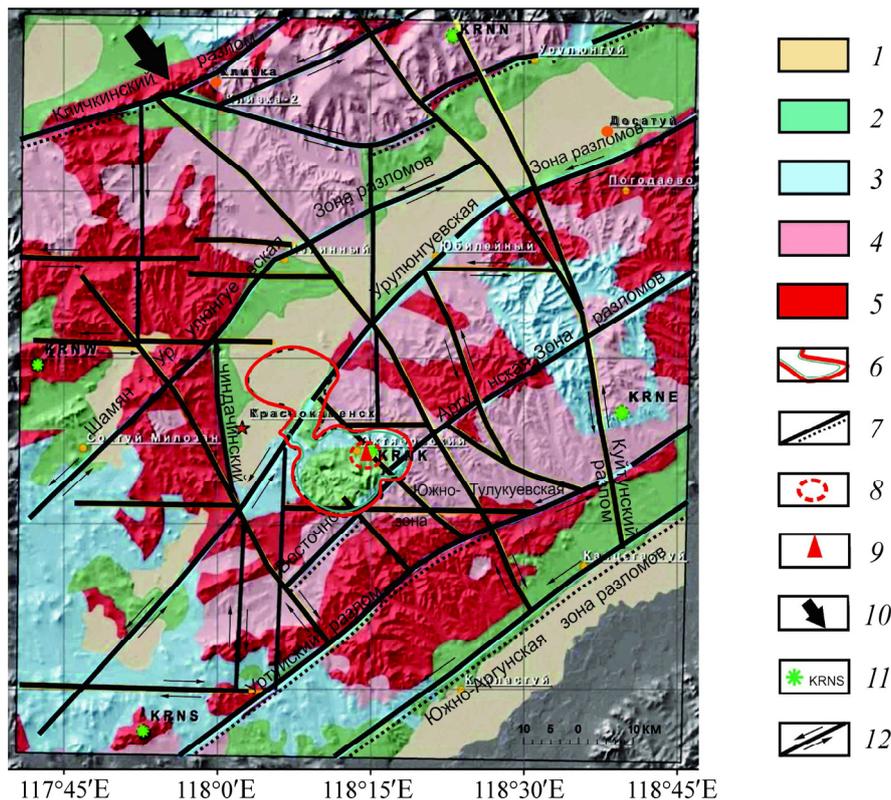


Рис. 1. Схема расположения лазерного деформографа в современной разломно-блоковой структуре в юго-восточной части Забайкальского блока Амурской плиты: 1 — рыхлые отложения (N–Q); 2 — осадочно-вулканогенные отложения (K); 3 — вулканогенно-осадочные отложения (MZ); 4 — гранитоиды (интрузия) (MZ–PZ); 5 — гранито-гнейсы и комплексы магматических пород (AR–PR–PZ1); 6 — контуры Тулукуевской кальдеры; 7 — активные участки разломов; 8 — контур зоны контроля; 9 — положение деформографа; 10 — направление перемещения Байкальского тектонического потока; 11 — действующие пункты GPS геодезии (измерения ИЗК СО РАН); 12 — главные блокообразующие тектонические нарушения и предполагаемые неотектонические перемещения по ним

Активность обусловлена тем, что положение Тулукуевской кальдеры, к которой относится Стрельцовское рудное поле, приурочено к пересечению глубинных трансблоковых меридиональных, широтных, северо-восточных и северо-западных разломов, где в разные геологические эпохи концентрировались тектоно-магматические события и сейсмические явления. Положение района в пределах планетарного Монголо-Охотского подвижного пояса определяет современную повышенную сейсмическую активность геологических структур и неоднородность напряженно-деформированного состояния породных массивов [3].

Следует отметить, что этот тектонически активный регион Юго-Восточного Забайкалья слабо изучен, а постоянные наблюдения за протеканием сейсмических и деформационных процессов до недавнего времени практически не проводились, за исключением отдельных работ Института земной коры СО РАН. Для этой территории необходимы комплексные исследования по изучению геодинамической и сейсмической обстановки, учет которой позволяет точнее оценивать характер и параметры поля тектонических напряжений, особенно в районе интенсивного ведения горных работ [4, 5].

Для выполнения подобных исследований 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 [6, 7].

В состав этой системы входит многоканальная автоматизированная геоакустическая система контроля горного давления «Prognoz ADS», которая позволяет регистрировать и определять параметры АЭ-событий в частотном диапазоне 0.5 – 12 кГц [6]. В настоящее время на 6 нижних горизонтах (на глубине 570–870 м) месторождения Антей расположено 35 акселерометров, регистрирующих АЭ-события с энергией от 10 до  $10^4$  Дж. Район месторождения и прилегающий к нему участок массива горных пород объемом более  $12 \text{ км}^3$  контролируется автоматизированной широкодиапазонной микросейсмической системой «Prognoz S», включающей 12 сейсмопавильонов, установленных в подземных выработках на горизонтах с V по XIV в районе Стрельцовского рудного поля. Микросейсмическая система «Prognoz S» позволяет регистрировать сейсмоакустические события с энергией до  $10^7$  Дж в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц [8]. В качестве первичных преобразователей применяются трехкомпонентные сейсмоприемники электродинамического типа GMT-12.5, чувствительность которых составляет  $30 \text{ В/м}\cdot\text{с}^{-1}$ , полоса рабочих частот — от 10 до 500 Гц.

Для контроля деформационного поля в рудничном поле и прилегающих участках массива горных пород в системе геомеханического мониторинга применяется лазерный деформограф.

#### **КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА**

Природные деформационные процессы относятся в основном к медленным — инфразвукового диапазона. Они оказывают влияние на характер формирующегося в результате ведения горных работ техногенного поля напряжений и часто выступают одним из факторов, способствующих подготовке и реализации крупных геодинамических явлений [9, 10]. Для прецизионных измерений вариаций деформационного поля в инфразвуковом диапазоне применяются лазерные деформографы различных модификаций: вертикальные и горизонтальные, равноплечего и неравноплечего типа, одно- или двухкоординатные, а также основанные на разнесенном варианте их размещения [11 – 19].

В рамках создания многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга в районе Стрельцовского рудного поля в 2012 г. установлен 50-метровый лазерный деформограф (рис. 2) [20].

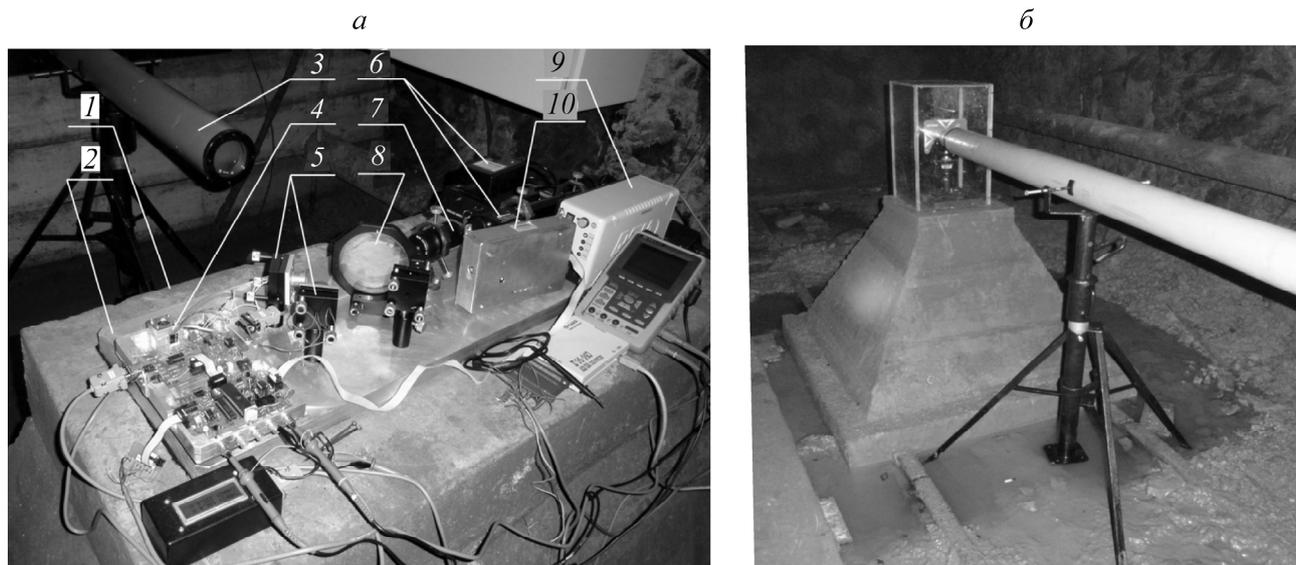


Рис. 2. Лазерный деформограф, установленный на геодинамическом полигоне в районе Стрельцовского рудного поля: *а* — интерференционный узел; *б* — уголкового отражателя и фрагмент воздушнонаполненного световода: 1 — бетонное основание; 2 — оптическая скамья; 3 — лучевод; 4 — система регистрации; 5 — пьезокерамические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

Он расположен в подземной горной выработке на глубине более 300 м. Оптическая часть деформографа собрана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона неравноплечего типа с длиной рабочего плеча 50 м, ориентированного на северо-восток под углом  $30^\circ$ , и частотно-стабилизированного лазера фирмы MellesGriott. Интерферометр способен регистрировать смещения земной коры с точностью до 0.1 нм в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц [19, 20].

Оптические элементы деформографа смонтированы на двух бетонных блоках, жестко соединенных с породным массивом. На одном из них установлена оптико-электронная часть интерферометра, состоящая из частотно-стабилизированного лазера, системы экстремального регулирования (системы регистрации и резонансного усилителя) и других конструктивных и оптических элементов лазерного деформографа (рис. 2*а*), на другом — уголкового отражателя. Между двумя бетонными блоками луч лазера распространялся по воздушнонаполненному световоду, состоящему из состыкованных труб внутренним диаметром 0.1 м (рис. 2*б*).

Для обеспечения необходимых условий по влажности и температуре выработка перегородкой разделена на две секции: аппаратная секция и секция для размещения световода. Установленный в аппаратной секции осушитель воздуха Ballu BDH-25L обеспечивает его влажность на уровне 50–60%. Температурный режим аппаратной и световодной секций достаточно стабилен, с вариацией температуры  $\pm 2^\circ\text{C}$ , что позволяет уверенно работать с интерференционной картиной.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе экспериментальных исследований с применением лазерного деформографа определялись его технические характеристики, включая разрешающую способность, динамический диапазон, диаграмму направленности, оценивались размеры зоны надежного контроля, а также исследовались возможности деформографа при регистрации колебаний и волн природного и техногенного происхождения.

Результаты испытаний показали, что лазерный деформограф обеспечивает измерения вариаций уровня деформаций земной коры со следующими характеристиками: величина шума, измеренная в единицах смещения, около 59 пм; предельный порог чувствительности (деформация на 50-метровой базе деформографа)  $1.2 \cdot 10^{-12}$ ; динамический диапазон 120 дБ. На расстоянии 1 км и более от деформографа его можно рассматривать как точечный приемник с круговой диаграммой направленности. При этом чувствительность деформографа описывается выражением  $\eta = \eta_0 \cos \alpha$ , где  $\eta_0$  — чувствительность по оптической оси интерферометра;  $\alpha$  — угол между направлением, с которого пришел сигнал, и оптической осью.

По результатам измерений формируются записи деформаций длительностью от 5 до 14 сут и более, получаемые путем сшивания часовых файлов с последующей фильтрацией низкочастотным фильтром Хэмминга. Граничная частота фильтра выбиралась в зависимости от анализируемого частотного диапазона. Так, при анализе микросейсмического диапазона (периоды от 2 до 20 с) граничная частота выбиралась равной 1 Гц, а при анализе диапазона собственных колебаний Земли — 0.01666 Гц (период равен 1 мин). Для анализа собственных колебаний Земли граничная частота высокочастотного фильтра Хэмминга составила  $1.28 \cdot 10^{-4}$  Гц (период равен 130 мин).

В процессе наблюдений деформограф регистрировал многочисленные землетрясения, происходящие в различных точках Земли. Деформационные колебания от одного из них магнитудой 7.2, произошедшего у восточного побережья Хонсю (Япония) 26 октября 2013 г. в 03:10:15 по местному времени (время в г. Краснокаменске на 10 ч отличается от всемирного времени), показаны на рис. 3 (стрелкой отмечено время землетрясения). Время прихода этих колебаний 3:21:21. Таким образом, время задержки составило 11 мин 6 с. При этом рассчитанная “кажущая” скорость деформационной волны равна 3840 м/с (расстояние от очага землетрясения до деформографа по данным сайта Planeta Scale составляет 2558 км). При спектральном анализе первых вступлений выделены доминирующие колебания на периодах 25.6 и 15.1 с.

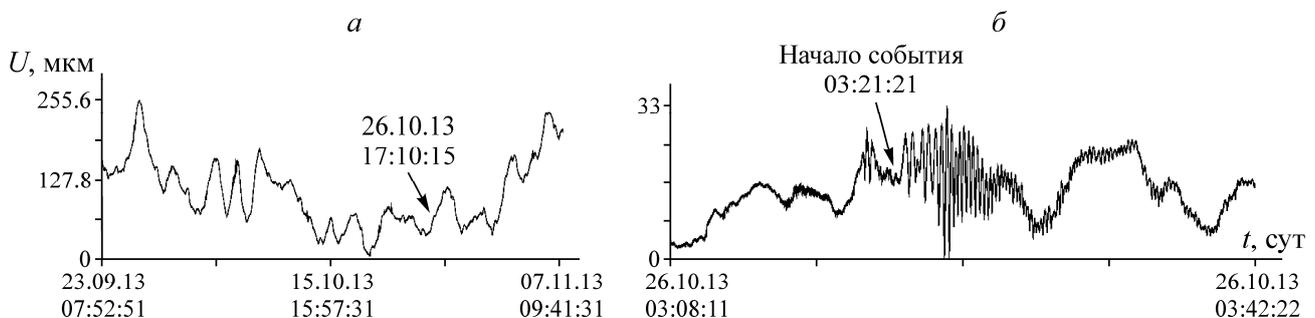


Рис. 3. Участок записи сигнала, вызванного землетрясением у восточного побережья о. Хонсю: а — в период с 23.09.13 по 7.11.13 г.; б — 26.10.13 17:10:15 (глубина очага 10 км, координаты: широта 37.27, долгота 144.73)

Для корректной интерпретации экспериментальных данных важно учитывать преобладающие для района размещения деформографа тона и обертона собственных колебаний Земли [17], обусловленные многочисленными землетрясениями в различных точках земного шара. С этой целью обработано несколько участков записи лазерного деформографа, приведенной на рис. 3а. Перед спектральной обработкой отфильтрованы высокочастотные составляющие с периодами меньше 1 мин и низкочастотные с периодами больше 130 мин, затем полученный массив данных прорежен до частоты дискретизации 0.0333 Гц (30 с). В дальнейшем проведена обработка последовательных массивов данных размером 16 384 точек (8 192 мин). При этом начало следующего

массива данных происходило на 1638 мин позже от начала предыдущего массива, т. е. соседние массивы данных перекрывались на 80%. Размер участка выбирался для получения хорошего частотного разрешения, а операция перекрытия применена для более тщательного изучения динамики выделенных периодов собственных колебаний Земли. Всего обработано и проанализировано 30 массивов данных с целью установления присутствия/отсутствия в полученных спектрах крутильных и сфероидальных собственных колебаний Земли [21].

По результатам обработки данных выявлен характерный спектр диапазона собственных колебаний Земли от основного сфероидального тона  ${}_0S_2$  до другого основного сфероидального тона  ${}_0S_0$  (рис. 4а). Данный результат подтверждает хорошие 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.

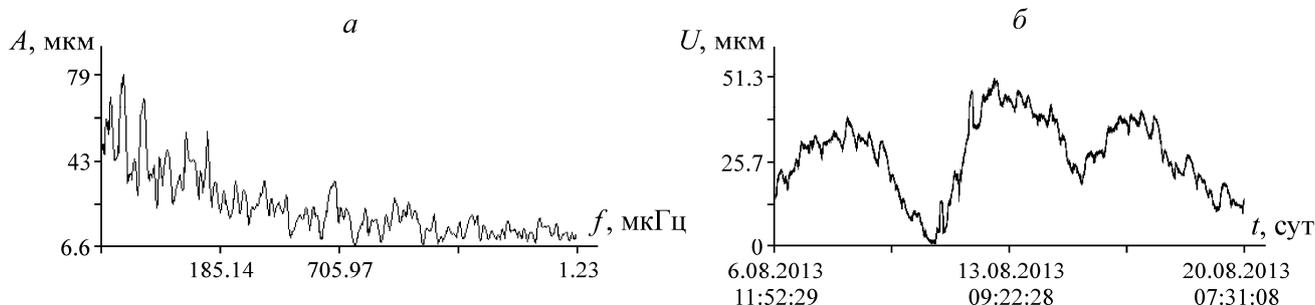


Рис. 4. Амплитудно-частотный спектр записи лазерного деформографа, отражающий собственные колебания Земли (а) и спектр 14-суточной записи с характерными суточными и полусуточными колебаниями (б)

В рассматриваемом диапазоне периодов собственных колебаний Земли наблюдаются периоды основных сфероидальных тонов  ${}_0S_2$  (53.32 мин) и  ${}_0S_0$  (20.40 мин). Из 30 обработанных участков записи они обнаружены соответственно в 18 и 19 случаях (мощные пики), что указывает на надежную работу прибора с хорошей амплитудно-частотной характеристикой в широком диапазоне частот. Не выделены записи основных сфероидальных тонов соответственно в 5 и 4 случаях.

На 14-суточной записи (рис. 4б) видны 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. Масса ВВ (аммонита 6ЖВ) опытных взрывов, размещаемого в вертикальных скважинах глубиной до 10 м и диаметром 105 мм, изменялась от 9 до 30 кг. Схема расположения экспериментальных взрывных скважин и лазерного деформографа на гор. V (глубина 300 м) приведена на рис. 5.

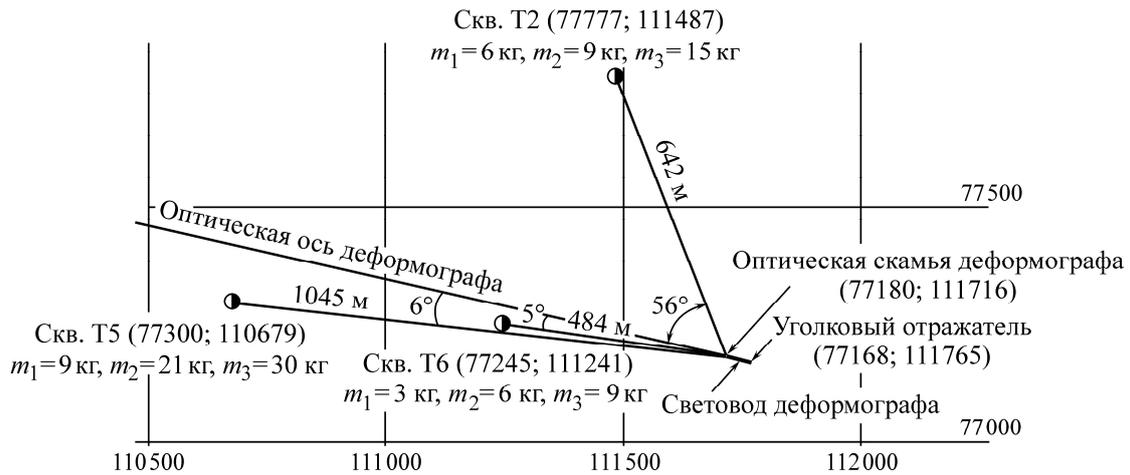


Рис. 5. Схема расположения экспериментальных взрывных скважин и масса зарядов ВВ опытных взрывов в районе установки лазерного деформографа на гор. V Стрельцовского рудного поля

Эксперимент показал, что взрывные воздействия существенно влияют на характер поля деформаций в районе деформографа. На рис. 6 представлена запись взрыва 30 кг ВВ в скважине № 5, удаленной на расстояние 1045 м от деформографа. Смещение в акустической волне составило 2.95 мкм, а амплитуда 10 мкм. Рассчитанные коэффициент затухания этих колебаний и добротность равны соответственно 0.005 и 86. Полученные результаты свидетельствуют о том, что размер зоны эффективного контроля деформографа в поперечнике составляет не менее 10 км.

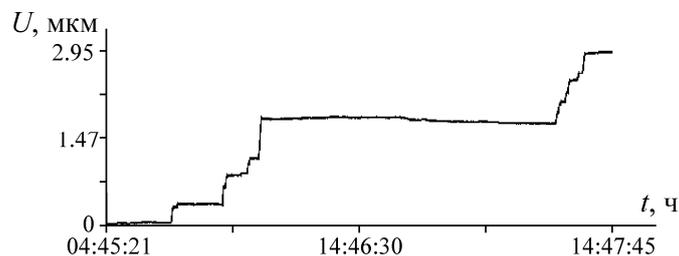


Рис. 6. Пример записи взрыва 30 кг аммонита 6ЖВ (в скважине № 5, удаленной на расстояние 1045 м от места измерения) лазерным деформографом

Согласно результатам исследований, сейсмические волны от удаленных землетрясений и взрывных работ оказывают определенное влияние на состояние массива горных пород в районе установки деформографа, на которое, в частности, указывает наличие характерных резких скачков во временной записи деформационного сигнала (рис. 7). На первом участке записи (рис. 7а) наблюдается удлинение базы деформографа и ее возврат на прежний уровень, на втором (рис. 7б) наряду с удлинением базы отмечается ее последующее уменьшение с возвратом в исходное положение.

Изменение деформационного поля от первого события (удаленного землетрясения) зарегистрировано 11 августа в 9 ч 30 мин и возврат — 11 августа в 11 ч. Удлинение базы составило 10 мкм. Во втором случае резкое увеличение базы деформографа произошло 12 августа в 5 ч 52 мин, затем база продолжала увеличиваться и резко уменьшилась в 7 ч 53 мин (этот скачок также равен 10 мкм). Возврат на первоначальный уровень произошел в 14 ч 44 мин. Перед этими резкими увеличениями базы отчетливо проявились инфрагравитационные волны с периодом около 3 мин.

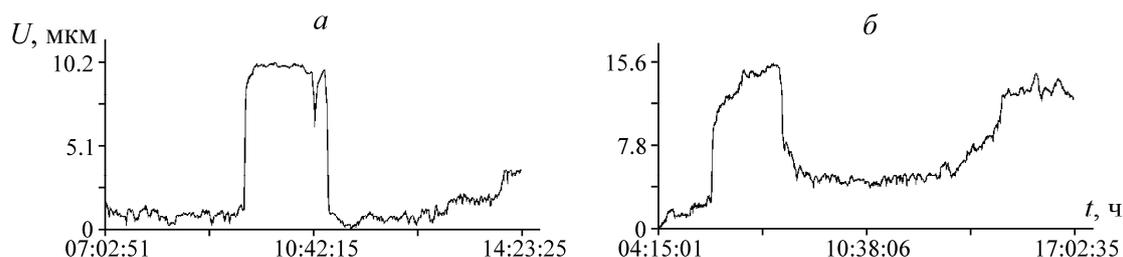


Рис. 7. Временные записи деформаций массива горных пород после проведения взрывных работ 11.08.13 (а) и 12.08.13 (б)

Показано, 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. Таким образом, 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.

По результатам выполненного этапа исследований установлена принципиальная возможность с помощью лазерного деформографа проводить высокоточные измерения параметров деформационного поля (включая определение добротности и коэффициента затухания деформационных сигналов). Изменение его параметров под влиянием внешних воздействий в зоне контроля до 10 км и более может выступать дополнительным фактором при подготовке и проявлении опасных геодинамических событий.

#### ВЫВОДЫ

Применение в подземной горной выработке Стрельцовского рудного поля на глубине 300 м 50-метрового лазерного деформографа обеспечивает прецизионные измерения (порог чувствительности измерения деформации составляет  $1.2 \cdot 10^{-12}$ , динамический диапазон — 120 дБ) в частотном диапазоне от долей до 1000 Гц.

По результатам обработки данных выявлен характерный для района установки деформографа спектр диапазона собственных колебаний Земли, соответствующий основным сфероидальным тонам  ${}_0S_2$  (53.32 мин) и  ${}_0S_0$  (20.40 мин), а также сфероидальному обертону  ${}_1S_0$ , которые вносят свой вклад в параметры деформационного поля в районе ведения интенсивных горных работ.

По результатам экспериментальных исследований и опытных взрывов установлено значение деформации породного массива в зависимости от энергии источника разрушения и расстояния до него: при заряде ВВ 30 кг на расстоянии 1.05 км от деформографа смещение массива горных пород составило 2.95 мкм. Коэффициент затухания этих колебаний — 0.005, добротность — 86, частота — 88 Гц.

Возможность по спектральным и амплитудно-временным характеристикам определять параметры деформационных сигналов, включая добротность и коэффициент затухания деформационных сигналов, позволяет выделять и классифицировать источники упругих импульсов, создавая карту деформационного поля в зоне контроля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ищукова Л. П. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. — Иркутск: Тип. «Глазовская», 2007. — 260 с.
2. 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.

3. **Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Шевченко Б. Ф., Усиков В. И., Гильманова Г. З.** Современное напряженно-деформированное состояние верхних уровней земной коры Амурской литосферной плиты // *Физика Земли*. — 2014. — № 3. — С. 104–113.
4. **Бортников Н. С., Петров В. А., Веселовский А. В., Кузьмина Д. А., Лексин А. Б.** Геоинформационная система (ГИС) забайкальского сектора Монголо-Охотского подвижного пояса // *Руды и металлы*. — 2012. — № 3. — С. 18–27.
5. **Petrov V. A., Leksin A. B., Sankov V. A., Pogorelov V. V., Rasskazov I. Yu.** GIS-based 3D geodynamic modelling of transbaikalia, Russia, Int. Conf. GeoFrankfurt'2014 "Earth System Dynamics". Goethe University Frankfurt a, Main. SDGG Heft 85, Abstract Volume, 2014. — P. 471.
6. **Рассказов И. Ю., Гладырь А. В., Аникин П. А., Святецкий В. С., Просекин Б. А.** Развитие и модернизация системы контроля динамических проявлений горного давления на рудниках ОАО "ППГХО" // *Горн. журн.* — 2013. — № 8 (2). — С. 9–14.
7. **Rasskazov I. Yu., Lugovoy V. A., Kalinov G. A., etc.** Development of measuring complexes for the assessment and control of burst-hazard during mining, Proceedings of the 8-th International symposium on rockbursts and seismicity in mines (Russia, Saint-Petersburg – Moscow. 1–7 September 2013), Obninsk–Perm, 2013. — P. 121–124.
8. **Гладырь А. В., Мирошников В. И., Болотин Ю. И. и др.** Техническое оснащение системы микросейсмического мониторинга нового поколения // *ГИАБ*. — 2012. — № 5. — С. 174–180.
9. **Адушкин В. В., Опарин В. Н.** От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // *ФТПРПИ*: Ч. I, 2012. — № 2; Ч. II, 2013. — № 2; Ч. III, 2014. — № 4; Ч. IV, 2016. — № 1.
10. **Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др.** Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, Т. 1, 2009; Т. 2, 2010.
11. **Berger R. J., Lovberg R. H.** Earth strain measurements with laser interferometer, *Science*, 1970, Vol. 170. — P. 296–303.
12. **Levin J., Hall J.L** Design and operation of a methane absorption stabilized laser strainmeter, *J. Geophys. Res.*, 1972, Vol. 77, No. 14. — P. 2595–2610.
13. **Алешин Л. Е., Дубров М. Н., Яковлев А. П.** Лазерный интерферометр для измерения деформаций земной коры // *ДАН СССР*. — 1980. — Т. 256. — № 6. — С. 1343–1346.
14. **Корчагин Ф. Г., Криницын Ю. М., Халяпин Ю. Н. и др.** Исследование собственных колебаний Земли с помощью оптического деформографа // *Тихоокеанская геология*. — 1986. — № 5. — С. 110–112.
15. **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.
16. **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.
17. **Долгих Г. И., Копвиллем У. Х., Павлов А. Н.** Наблюдение периодов собственных колебаний Земли лазерным деформометром // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. — 1983. — № 2. — С. 15–20.
18. **Долгих Г. И., Валентин Д. И., Долгих С. Г. и др.** Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // *Физика Земли*. — 2002. — № 8. — С. 69–73.
19. **Долгих Г. И., Привалов В. Е.** Лазеры. Лазерные системы. — Владивосток: Дальнаука, 2009. — 202 с.
20. **Долгих Г. И., Рассказов И. Ю., Луговой В. А., Аникин П. А., Цой Д. И., Швец В. А., Яковенко С. В.** Краснокаменский лазерный деформограф // *Приборы и техника эксперимента*. — 2013. — № 5. — С. 138–139.
21. **Dziewonski A. M., Gilbert F.** Observations of normal modes from 84 recordings of the Alaskan earthquake of 1964 March 28, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 1972, Vol. 27. — P. 393–446.