

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.34

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА,  
УСТАНОВЛЕННОГО В ЗАБАЙКАЛЬЕ

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

<sup>1</sup> Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,  
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, 690950, Владивосток, ул. Суханова, 8, Россия

<sup>3</sup> Институт горного дела ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Тургенева, 51, Россия

Описан 50-метровый лазерный деформограф, установленный на глубине 300 м в подземном руднике ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (г. Краснокаменск), а также продемонстрированы его возможности по регистрации колебаний и волн инфразвукового и звукового диапазонов. В ходе обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных исследована природа колебательных процессов Забайкальского региона, начиная от микросейсмического диапазона до приливного.

*Лазерный деформограф, региональные колебания и шумы, микросейсмь, землетрясения, «бухтообразные» возмущения, собственные колебания геоблоков, собственные колебания Земли, сейши, приливы.*

A 50 M LASER STRAINMETER SYSTEM INSTALLED IN TRANSBAIKALIA: TESTING RESULTS

G.I. Dolgikh, S.G. Dolgikh, I.Yu. Rasskazov, V.A. Lugovoy, and B.G. Saksin

We report testing results for a 50 m laser strainmeter installed 300 m under the ground in a mine of PJSC Priargunsky Industrial Mining and Chemical Union (Krasnokamensk) and demonstrate its ability to record microseisms and waves of infrasonic–sonic bandwidths. Processing and interpretation of the collected data provides information about microseismic to tidal strain changes in the Transbaikalian region.

*Laser strainmeter, regional oscillations and noise, microseisms, earthquakes, bay signal, free oscillations of geoblocks, Earth's background free oscillations, seiche, tides*

ВВЕДЕНИЕ

В 2012—2013 гг. в подземном руднике ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (г. Краснокаменск) на глубине более 300 м был установлен и испытан 50-метровый лазерный деформограф, оптическая часть которого собрана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона и частотно-стабилизированного лазера фирмы MellesGriot. Данный лазерный деформограф, способный регистрировать вариации деформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью  $10^{-10}$ , вошел в состав комплекса, предназначенного для обнаружения готовящихся техногенных катастроф в зоне действующих и строящихся урановых рудников [Рассказов и др., 2012, 2013]. Кроме прикладного значения полученные экспериментальные данные предполагается использовать для решения различных фундаментальных задач. Для адекватной интерпретации новых экспериментальных результатов, полученных с помощью лазерного деформографа, необходимо его протестировать при регистрации известных процессов широкого диапазона частот, начиная от приливного диапазона и заканчивая искусственными сигналами звукового диапазона, вызванными работой в руднике известных механизмов. Учитывая уникальные амплитудно-частотные характеристики лазерных деформографов можно предположить, что наряду с известными процессами будут обнаружены новые особенности колебательных процессов Забайкальского региона, которые не были известны до

настоящего времени, особенно в инфразвуковом диапазоне. Данные надежды связаны не только с конструктивными особенностями этого лазерного деформографа, но главным образом с теми результатами, которые были получены на приборах подобного типа, расположенных в различных регионах Земли. В настоящее время значительная часть созданных лазерных деформографов различных модификаций применяется для изучения геофизических и геодинамических процессов [Багаев и др., 1992; Takemoto Shuzo et al., 2001; Долгих и др., 2002; Milyukov et al., 2005; Jahr et al., 2006; Garoi et al., 2007], поиска оригинальных сигналов и явлений внеземного происхождения [Laser..., 2009]. Разработанные и созданные лазерные деформографы одно- и двухкоординатного вариантов [Долгих и др., 1998], вертикального и горизонтального типов [Долгих и др., 2002] используются для изучения предвестников землетрясений [Долгих и др., 2007 а], физики возникновения инфразвуковых процессов Земли [Давыдов, Долгих, 1995; Алексеев и др., 2003; Долгих, Привалов, 2009], определения степени цунамигенности землетрясений [Долгих и др., 2007б], решения различных гидроакустических задач [Долгих, 1998] и исследования влияния атмосферных и гидросферных процессов на уровень микродеформаций земной коры [Давыдов, Долгих, 1993; Давыдов и др., 1994; Долгих и др., 2001, 2015]. Уникальность амплитудно-частотных характеристик лазерных деформографов позволяет надеяться на решение проблемы краткосрочного прогноза коровых землетрясений [Долгих, Мишаков, 2011]. Кроме указанных выше задач, решаемых с помощью лазерных деформографов, успешно исследуются такие тонкие эффекты, как состояние и динамика магматических структур влк. Эльбрус [Милуков, 2006], деформационные процессы, связанные с неравномерностью вращения Земли [Милуков и др., 2011], особенности собственных колебаний Земли [Милуков, 2005; Милуков и др., 2015].

Учитывая уникальные характеристики лазерных деформографов, в отличие от приборов, обладающих более узким рабочим диапазоном частот [Дреннов и др., 2013], можно надеяться, что при обработке и интерпретации полученных экспериментальных данных будут получены новые результаты широкого диапазона частот, характерные для Забайкальского региона.

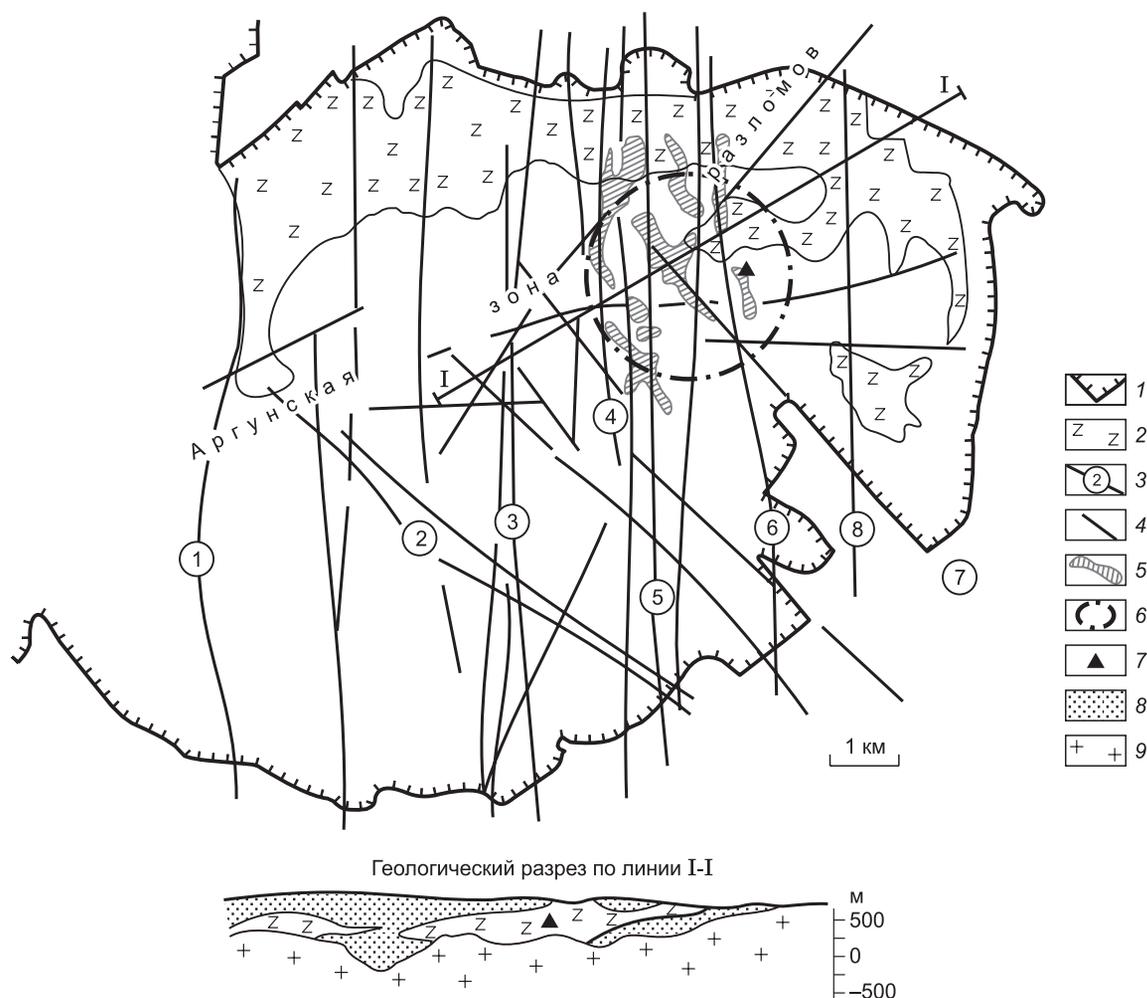
### ЛАЗЕРНЫЙ ДЕФОРМОГРАФ

Лазерный деформограф вошел в состав многоуровневой системы контроля геодинамической обстановки в Стрельцовском рудном районе [Рассказов и др., 2013]. В настоящее время здесь действуют три подземных рудника, на которых горные работы достигли глубин 500—900 м. С развитием очистных работ и их переходом на более глубокие горизонты резко возросла интенсивность динамических проявлений горного давления. Наблюдается техногенная сейсмичность, являющаяся следствием активизации геодинамических процессов под влиянием крупномасштабных горных работ.

С современных геотектонических позиций Стрельцовский рудный узел, в состав которого входят месторождения Антей и Стрельцовское, размещается в пределах Центрально-Азиатского орогенного пояса. Пояс «зажат» между двумя древними планетарными структурами земной коры — Северо-Азиатским и Сино-Корейским кратонами — и находится в зоне активного взаимодействия с Сино-Индонезийской областью наибольшей сейсмической и вулканической активности новейшего времени. Рудный узел расположен в западном блоке Амурской литосферной плиты (Юго-Восточное Забайкалье). Активная глубинная геодинамика определила сложные геодинамические процессы, результатом которых явилось возникновение блоковых, сдвиговых и надвиговых деформаций (включая послойные срывы), а также сводово-глыбовых перемещений. Длительное существование на территории орогенного геотектонического режима сопровождалось мощным проявлением эндогенных процессов. В результате по сравнению с соседними площадями здесь резко увеличена неоднородность геологической среды (как в вещественном, так и структурном отношении).

В процессе геологического развития на значительной части описываемой территории на уровень современного эрозионного среза выведены большие объемы полнокристаллических магматических комплексов палеозоя, формирующих крупный Шилка-Аргунский гранитоидный ареал. Выделяемый в районе Уктуйский гранитоидный массив является частью названного ареала. В мезозойский этап развития на этом жестком основании заложился Монголо-Забайкальский вулканический пояс, одной из вулканотектонических структур которого является Тулукуевская кальдера.

При обосновании места размещения павильона для лазерного деформографа учтен широкий спектр горно-геологических и горно-технических условий, а также ряд технологических факторов. По результатам проработки и сравнения нескольких вариантов размещения было принято решение о создании наблюдательного павильона в подземной части рудника № 1 Стрельцовского рудного поля, находящегося в 1.5 км от мест активного ведения очистных работ, с тем, чтобы эффект техногенного влияния был наименьшим (рис. 1). В геологическом отношении эта позиция соответствует придонной части восточного блока Тулукуевской кальдеры, а также периферии шахтного поля месторождения Стрельцовское (см. рис. 1). Азимут направления измерительной части лазерного деформографа составляет 30°,



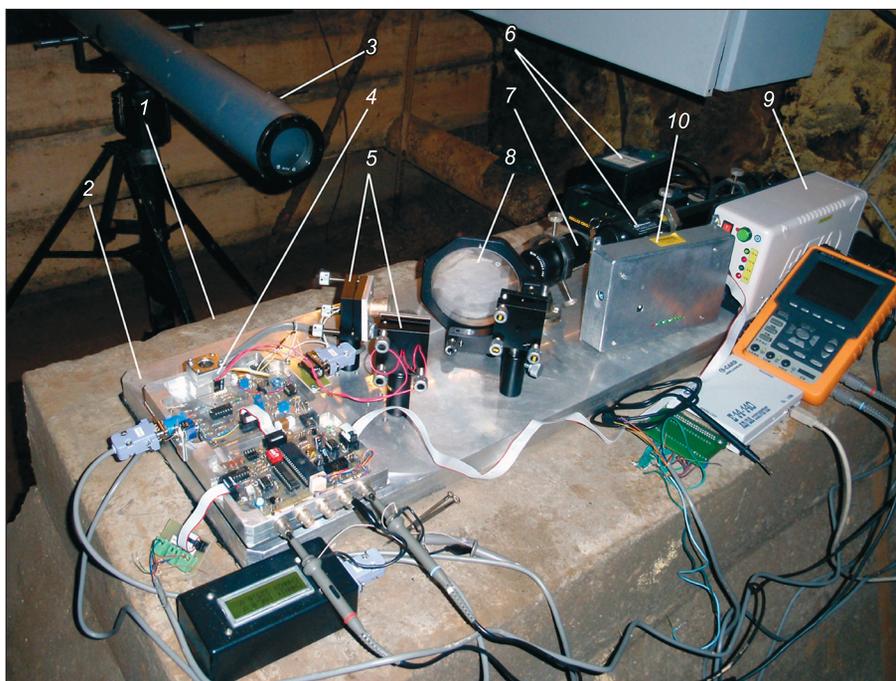
**Рис. 1. Положение лазерного деформографа и зоны контроля в структуре вулканитов Тулукуевской кальдеры [Ищукова, 2007].**

*1* — контур вулканитов на современной эрозионной поверхности; *2* — выходы на современную поверхность горизонта нижних трахитацитов; *3* — осевые швы основных зон разломов и их номера: 1 — Меридианальная, 2 — Тулукуевская, 3 — Малотулукуевская, 4 — Западная, 5 — Центральная, 6 — Восточная, 7 — Стрельцовская, 8 — Широндукуйская; 4 — прочие разломы; 5 — контуры рудных залежей месторождения Стрельцовское; 6 — область комплексного геодинамического контроля; 7 — положение лазерного деформографа; 8 — нерасчлененные вулканогенно-осадочные породы чехла; 9 — нерасчлененные кристаллические породы фундамента кальдеры чехла.

т. е. своей осью он ориентирован навстречу современному перемещению Байкальского тектонического потока и ортогонально к Байкальской сейсмической зоне [Рассказов и др., 2014]. Лазерный деформограф находится в пределах пород вулканогенного чехла (покровы лав и туфов среднего и основного составов) в тектоническом блоке площадью около 10 км<sup>2</sup>, который ограничен Центральным (с востока) и Малотулукуевским (с запада) разломами меридионального направления. Границей блока с юга является Тулукуевский разлом северо-западной ориентировки, а с севера — бортовые кольцевые разломы кальдерной постройки. Позиция деформографа в рельефе погребенного фундамента определяется его расположением над склоном локального выступа жесткого основания кальдеры.

При более детальном рассмотрении выясняется, что лазерный деформограф находится в подземной горной выработке, которая пройдена горизонтально в теле горизонта нижних трахитацитов. Этот горизонт локализован в северной половине кальдеры (см. рис. 1), где он занимает площадь порядка 60 км<sup>2</sup> и имеет пологое залегание. Мощность горизонта варьирует от 60—120 до 450—500 м.

Оптическая часть лазерного деформографа создана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона неравноплечего типа, его оптические элементы смонтированы на двух бетонных блоках, жестко соединенных с основным пластом шахты. Рабочее плечо прибора имеет длину 50 м. На одном из бетонных блоков установлен уголкового отражателя, а на другом центральный узел интерфе-



**Рис. 2. Центральный интерференционный узел во время настройки.**

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.

рометра Майкельсона (рис. 2), состоящий из частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера фирмы MellesGriot, обеспечивающего стабильность частоты в десятом знаке, системы экстремального регулирования (система регистрации и резонансный усилитель) и других конструктивных и оптических элементов лазерного деформографа. Между двумя бетонными блоками луч лазера распространялся по герметичному лучеводу, состоящему из состыкованных труб внутренним диаметром 9 см.

Луч лазера (6), пройдя коллиматор (7) с оптическим затвором, попадает в интерференционный узел (5, 8), где разделяется на полупрозрачном зеркале (8) на два луча. Первый луч направляется по воздушнонаполненному герметичному световоду на уголкового отражателя, от которого возвращается на полупрозрачное зеркало. Второй луч, пройдя интерференционный узел, возвращается на полупрозрачное зеркало. Возвращенные лучи сбиваются на полупрозрачном зеркале, образуя интерференционную картину, вариации последней регистрируются фотодиодом. Для уменьшения угловой расходимости лазерного пучка и расширения его до размеров, при которых удобно вести юстировочные работы, используется коллиматор (7), увеличивающий диаметр лазерного луча до 8—10 мм. Оптический затвор, состоящий из диафрагмы, поляроида и пластины  $\lambda/4$  исключает влияние паразитных отражений на стабильность частоты лазера. Для уменьшения влияния паразитных отражений на стабильность частоты лазера ось лазера расположена под небольшим углом к оси остальных оптических систем интерферометра. Кроме того, отраженные от уголкового отражателя лучи сдвинуты параллельно на 2—3 см относительно выходящего из лазера луча, что также обеспечивает непопадание отраженных лучей в лазер и не оказывает влияние на стабильность его работы. Весь путь луча лазера, за исключением 30 см, расположен в герметичном световоде, в котором поддерживается постоянное давление, равное 1200 ГПа. В местах сочленения труб предусматривается большая герметичность, обеспечиваемая применением высококачественной вакуумной резины и У-образным замком. С обоих концов световод имеет прозрачные герметично закрепленные кварцевые окна.

Система регистрации лазерного деформографа измеряет смещение одного устоя относительно другого. В нашем случае при двулучевой интерферометрии используется гомодинный метод отслеживания информации. При этом интенсивность излучения, попадающего на фотодиод, описывается следующим выражением [Долгих, Привалов, 2009]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left\{ \frac{4\pi(L_2 - L_1)}{\lambda} \right\}, \quad (1)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  — интенсивности интерферирующих лучей;  $L_1$  и  $L_2$  — оптическая длина пути первого и второго лучей соответственно;  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения.

Приведенная зависимость  $I$  от  $\Delta L = L_2 - L_1$  является периодической с периодом  $\lambda/2$ . Такая зависимость позволяет осуществить привязку к одному из экстремумов интенсивности интерференционной картины для измерения изменения разности длин плеч  $\Delta L$  интерферометра, счета интерференционных полос и их доли при автоматической подстройке интерферометра к ближайшему экстремуму интерференционной картины. Система регистрации обеспечивает автоматическую подстройку интерферометра и выдает сигнал, пропорциональный разности длин плеч интерферометра в долях  $\lambda/2$ . Система регистрации выдает сигнал в пределах  $\Delta l = \pm\lambda/2$  при равенстве  $\Delta l = \Delta L - k\lambda/2$ , где  $k$  — целое, равное целой части  $2\Delta L/\lambda$ . Изменение  $\Delta L$  равно [Долгих, Привалов, 2009]:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} \left[ (k_+ - k_-) + \frac{U_2 - U_1}{U_{\lambda/2}} \right], \quad (2)$$

где  $k_+$  и  $k_-$  — число сбросов положительной и отрицательной полярности, возникающих при изменении  $\Delta L$  на величину  $\pm\lambda/2$ ;  $U_{\lambda/2}$  — нормирующий множитель в вольтах;  $U_1, U_2$  — значения выходного напряжения в начальный и конечный моменты времени.

После установки прибора в течение нескольких суток проводились тестовые измерения вариаций уровня деформаций земной коры. Полученные экспериментальные данные накапливались на твердом носителе с частотой дискретизации, варьирующейся в зависимости от задач эксперимента в диапазоне 1—2500 Гц, и в дальнейшем обрабатывались с целью определения технических характеристик лазерного деформографа, которые свелись к следующему: точность измерения смещения находится на уровне фона и составляет величину порядка 0.1 нм, а предельный порог чувствительности —  $1.2 \times 10^{-12}$ . Динамический диапазон выделенных колебаний составил величину около 120 дБ, в другие периоды измерений он может быть и шире с учетом технических особенностей сброса уровней системы регистрации лазерного деформографа, позволяющей значительно расширять его динамический диапазон [Долгих, Привалов, 2009].

По окончании тестовых испытаний лазерный деформограф был подвергнут профилактике, а затем запущен в режим проведения непрерывных измерений вариаций деформаций земной коры с техническими перерывами, связанными с профилактическими и ремонтными работами отдельных узлов прибора. В режиме реального времени полученные экспериментальные данные непрерывно поступали в центр сбора информации, находящийся на поверхности Земли, и записывались на винчестер компьютера в последовательные файлы данных длительностью по 1 ч с частотой дискретизации 1000 Гц с привязкой к точному времени с точностью 1 мс. После того как файл сохранялся на компьютере, он становился доступным по телекоммуникационным линиям сотрудникам институтов, находящимся в Хабаровске и Владивостоке. В дальнейшем полученные экспериментальные данные подвергались обработке с помощью специально созданного пакета прикладных программ DEFORMOGRAF, состоящего из полного комплекса программ спектрального и статистического оценивания.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

В качестве тестовой на рис. 3 приведена запись лазерного деформографа длительностью около 52 сут, при обработке которой в области приливных гармоник выделяются пики на периодах около 24, 12 и 8 ч, амплитуды которых на базе прибора равны 2.7, 2.7 и 1.7 мкм соответственно. Деформация ( $\epsilon = \Delta L/L$ ,  $L$  — длина измерительного плеча лазерного деформографа) на данных периодах равна  $5.4 \times 10^{-8}$  и  $3.4 \times 10^{-8}$  соответственно. Следующий значительный максимум в диапазоне приливных гармоник находится на периоде 4 ч, а ожидаемый максимум с периодом около 6 ч практически «замаскировался» среди шумовых компонент. Как видно из рис. 3, в записи лазерного деформографа доминирующими колебаниями являются колебания с большими периодами, чем период суточного прилива, амплитуды которых значительно превышает амплитуды суточного и полусуточного приливов. При спектральном анализе установлено, что доминирующий пик находится на частоте, соответствующей периоду около 13.5 сут, его амплитуда равна около 42.4 мкм ( $\epsilon = 85 \times 10^{-8}$ ).

В более высокочастотном диапазоне вплоть до периодов 90 мин при спектральной обработке всего указанного ряда, приведенного на рис. 3, выделяется группа мощных максимумов с периодами около 160, 144, 119, 108, 97, 91 мин. Данные периоды можно связать с так называемыми сейсмогравитационными колебаниями Земли [Петрова, 1999]. В этом диапазоне периодов крайне интересен пик с периодом 160 мин, который присутствует практически во всех записях лазерного деформографа.

Указанный на рис. 3 ряд данных лазерного деформографа был обработан с целью выделения мощных почти постоянно присутствующих максимумов с периодами, находящимися в диапазоне от 90 мин

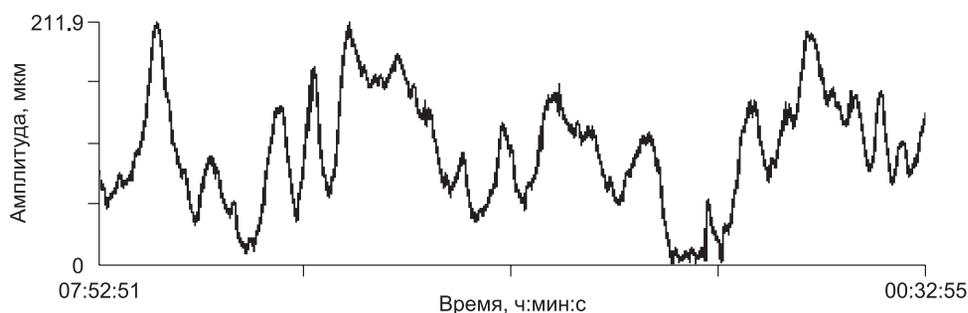
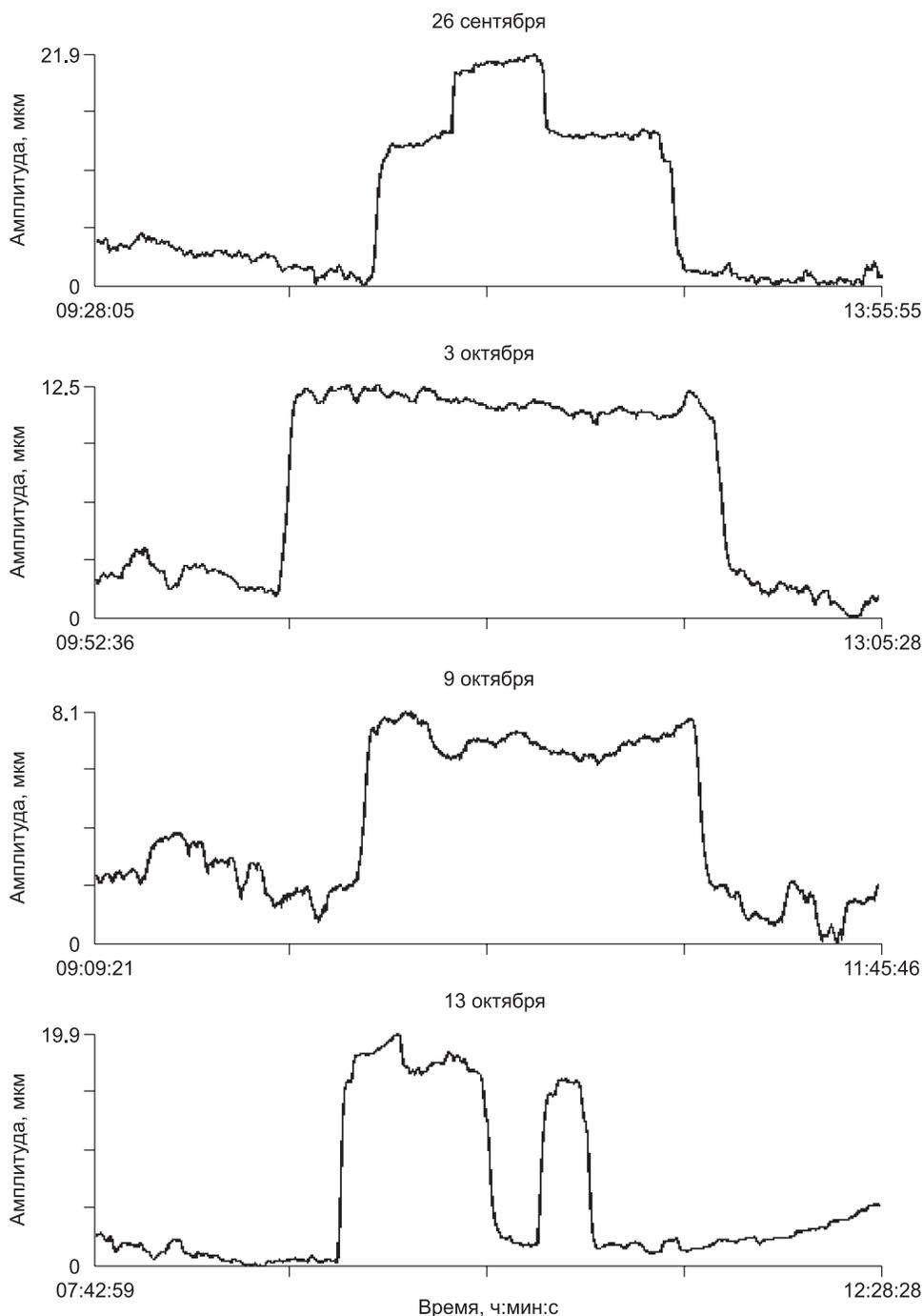


Рис. 3. Запись 50-метрового лазерного деформографа, 23 сентября—13 ноября 2013 г.

до основного сфероидального тона  ${}_0S_2$ . При этом при обработке всего ряда целиком выделены максимумы на периодах 86.5, 84.8, 79.3, 75.5, 72.8, 69.5, 65.8, 63.8, 61.5, 59.8, 58, 55.8 мин. Указанные периоды в соответствии с [Петрова, 1999; Петрова, Любимцев, 2006] можно отнести к сейсмогравитационным колебаниям Земли. Но нельзя отбрасывать возможное возбуждение некоторых колебаний в диапазоне от периода основного сфероидального тона  ${}_0S_2$  до 160 мин нагружающим воздействием на земную кору атмосферных процессов [Швед и др., 2013], а также собственных колебаний близлежащих водоемов. Как было отмечено ранее [Давыдов, Долгих, 1995; Долгих и др., 2011], сейшевые колебания различных водоемов оказывают нагружающее воздействие на уровень микродеформаций земной коры, что прослеживается в спектрах записей лазерных деформографов [Долгих и др., 2011]. Как известно, в данном диапазоне выделенных периодов находятся трехузловая (84 мин) и четырехузловая (59 мин) сейши оз. Байкал [Гранин, 2014]. Отсутствие остальных мод, или малые величины их амплитуд, вероятно, связано с особенностями их возбуждения. Колебания атмосферного давления могут играть главную роль как в генерации колебаний водоемов соответствующих периодов, так и при возбуждении колебаний в земной коре аналогичных периодов. Так, например, при обнаружении цугов волн с периодами в диапазоне 4—20 мин в зал. Петра Великого Японского моря, зарегистрированных термогирилами, их приписывали короткопериодным морским внутренним волнам. Но при проведении синхронных измерений вариаций атмосферного и гидросферного давлений, а также деформаций земной коры было установлено, что основная масса их вызывается колебаниями атмосферного давления [Долгих и др., 2015].

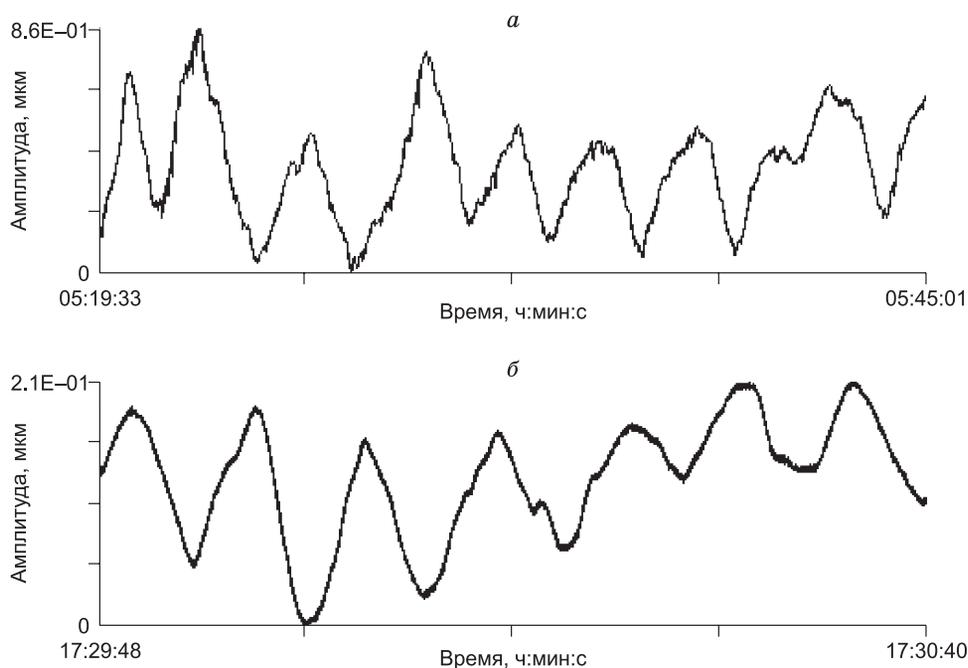
Далее остановимся на факте присутствия/отсутствия собственных колебаний Земли в диапазоне периодов от основного сфероидального тона  ${}_0S_2$  до основного сфероидального тона  ${}_0S_0$ . С этой целью был обработан указанный выше ряд. Всего было обработано и проанализировано около 40 массивов с перекрытием, каждый длительностью 8192 мин. Во время проведения измерений (23 сентября—13 ноября 2013 г.) в различных точках Земли произошла масса землетрясений средней мощности. Максимальная магнитуда одного из них, равная 7.2, соответствует землетрясению, которое произошло у восточного побережья о. Хонсю (Япония) 25 октября 2013 г. в 17:10:15.0 (по всемирному времени, которое на 10 ч отличается от времени в г. Краснокаменск). В рассматриваемом диапазоне периодов собственных колебаний Земли уверенно выделяются периоды основных сфероидальных тонов  ${}_0S_2$ ,  ${}_0S_3$  и  ${}_0S_0$ . Из 40 обработанных участков записи основной сфероидальный тон  ${}_0S_2$  уверенно выделен в 28 случаях (мощные пики), 7 — средние пики и 5 — не выделено, а для  ${}_0S_0$  — в 29 случаях мощные пики, 7 — средние пики, 4 — не выделено. Следующий максимум, соответствующий обертону  ${}_1S_2$ , уверенно выделен в 24 случаях (мощный пик), 12 — средние пики, 4 — не выделено. Также выделены максимумы, соответствующие сфероидальным собственным колебаниям Земли  ${}_0S_3$  (23 — мощные пики, 12 — средние пики, 5 — нет). Плохо выделены максимумы, соответствующие сфероидальным собственным колебаниям Земли  ${}_0S_4$  (10 — мощные пики, 9 — средние пики, 11 — нет), а также крутильным собственным колебаниям Земли  ${}_0T_2$  (13 — мощные пики, 4 — средние пики, 13 — нет),  ${}_0T_3$  (11 — мощные пики, 12 — средние, 7 — нет) и  ${}_0T_4$  (11 — мощные пики, 8 — средние, 11 — нет). Почему же не всегда уверенно выделяются отдельные тона и обертона? Причин несколько. Во-первых, плохо выделенные тона и обертона собственных колебаний Земли после маломощных землетрясений имеют малые амплитуды. Во-вторых, амплитуды их могут меняться в связи с вращением Земли, а также в связи с модуляционным воздействием более низкочастотными процессами (приливы и т.п.) [Давыдов, Долгих, 1997] и поэтому в отдельные промежутки плохо выделены.

Кроме вышеуказанных колебательных процессов из записей лазерного деформографа выделяют «бухтообразные» возмущения неизвестной природы. Так, на рис. 4 приведены участки записей лазерного деформографа, на которых видны резкие, «бухтообразные» изменения базы лазерного деформографа, вызванные процессами, происходящими в шахте или вблизи шахты. Общая длительность



**Рис. 4. Участки записи лазерного деформографа, 2013 г.**

первого процесса составила около 1 ч 47 мин, второго — около 1 ч 52 мин, третьего — около 1 ч 13 мин, четвертого — около 1 ч 35 мин. Во всех случаях произошло резкое увеличение базы деформографа, а затем ее уменьшение. Амплитуды данных процессов больше амплитуд суточного прилива, полученных после спектральной обработки записи лазерного деформографа. Возникновение данных возмущений не подвержено каким-либо периодичностям. Перед возникновением каждого «бухтообразного» возмущения хорошо прослеживаются колебания в диапазоне «инфрависитационного» шума Земли с периодом около 3 мин (рис. 5, а). Если мощные колебания с периодом около 3 мин возникают иногда, то колебания с периодом около 2 мин присутствуют практически всегда. Природа данных колебаний не совсем ясна, но, скорее всего, колебания с периодами около 3 и 2 мин соответствуют собственным колебаниям



**Рис. 5. Запись лазерного деформографа:**

*a* — 12 августа 2013 г., *б* — 26 июля 2012 г.

геоблоков земной коры зоны расположения лазерного деформографа. Определена добротность данных колебаний, минимальное значение которой равно около 106.

В микросейсмическом диапазоне (2—20 с), происхождение которых связывают в основном с ветровыми волнами, возбуждаемыми на акваториях, в записях лазерного деформографа присутствуют колебания с периодами около 7—8 и 3.0—3.5 с. На рис. 5, б приведена запись лазерного деформографа, содержащая колебание с периодом около 7.4 с. Колебания с периодом 3.0—3.5 с выделяются практически всегда, амплитуда которых иногда достигает значительной величины. Возмущение с периодом 7—8 с наблюдается не всегда, возникает спонтанно. Кроме того, колебания с периодами 7—8 и 3.0—3.5 с синхронно не наблюдаются, что говорит в пользу их неодинаковой природы. Колебания с периодом 3.0—3.5 с связаны, по-видимому, с поверхностными ветровыми волнами близлежащего к шахте оз. Умыкай, после его замерзания колебания с данными периодами исчезли, а колебания с периодом 7—8 с не исчезли. После того как лед на озере растаял, на записях деформографа вновь появились колебания с периодом 3.0—3.5 с. Природа возникновения колебаний с периодом 7—8 с может быть связана как с удаленным микросейсмическим источником, так с колебаниями местного минигеоблока, а также с физическими процессами возбуждения колебаний, описанных в [Сидоров, Тарантин, 2013].

В динамических спектрограммах высокочастотного диапазона лазерного деформографа выделяется источник с изменяющейся со временем частотой, значение которой в течение нескольких суток последовательно увеличивалось с 294.7 до 443.7 Гц. Причем на одном участке изменение частоты произошло скачком. Данные колебания имеют искусственное происхождение и связаны с работой осушительной системы в шахте. Кроме этих искусственных колебаний в высокочастотной области спектра выделены «резонансы» на частотах около 16.0, 64.5 и 186.4 Гц, которые связаны с размерами отдельных участков шахты или с собственными частотами минигеоблоков горных пород. В отдельные промежутки времени после шумоподобных импульсных возмущений (удары, малые взрывы и т. п.) возбуждаются колебания на частотах 84.5 и 56 Гц, они предположительно вызваны собственными колебаниями конструкций лазерного деформографа и места его постановки. Наблюдаемые колебания в диапазоне частот от 294.7 до 443.7 Гц в отдельные промежутки времени испытывают модуляционные изменения по частоте, вызванные спектральной составляющей с периодом около 3 мин.

## ВЫВОДЫ

При обработке данных лазерного деформографа, функционирующего в Забайкальском регионе, было установлено, что:

1. При анализе многосуточных записей, в ходе которого выделены периоды приливного диапазона (24, 12, 8 и 4 ч) и более низкочастотного диапазона с периодом около 13.5 сут, подтверждены большие возможности установленного лазерного деформографа по регистрации колебаний и волн инфразвукового диапазона.

2. В диапазоне сейсмогравитационных колебаний Земли (от 160 мин до основного сфероидально-го тона  ${}_0S_2$ ) выделен ряд мощных пиков, их происхождение может быть приписано сейсмогравитационным колебаниям Земли. Некоторые из них могут быть вызваны нагружающим воздействием атмосферных и/или гидросферных (сейши оз. Байкал) процессов на земную кору.

3. В диапазоне сигналов и шумов местного происхождения выделены мощные спектральные составляющие на частотах 16, 56, 64.5, 84.5 и 186.4 Гц, связанные с собственными колебаниями установки и различных объектов места ее размещения, добротности которых варьируются в пределах от 120 до 322.

4. В микросейсмическом диапазоне (2—20 с) выделены колебания на периодах 7—8 и 3.0—3.5 с. Колебания с периодами около 3.0—3.5 с связаны с ветровыми волнами близлежащих водоемов (возможно оз. Умыкай), которые исчезают зимой с появлением льда. Колебания с периодом около 7—8 с могут быть связаны с удаленным микросейсмическим источником, с колебаниями местного минигеоблока или с низкочастотным рассеянием энергии упругих волн в горных породах.

5. В длительных записях обнаружены «бухтообразные» возмущения с амплитудами, превосходящими амплитуды приливных гармоник. Для каждого возмущения характерно резкое растяжение, а затем резкое сжатие базы деформографа практически до исходного состояния.

6. В спектрах записей выделены мощные спектральные составляющие на периодах около 3 и 2 мин, обусловленные, по-видимому, собственными колебаниями геоблоков земной коры Забайкальского региона.

Работа была выполнена благодаря частичной поддержке программы ДВО РАН «Дальний Восток» и РФФИ (соглашение № 14-17-00041, обработка и интерпретация полученных данных).

#### ЛИТЕРАТУРА

**Алексеев А.В., Валентин Д.И., Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Холдкевич Е.Д., Швец В.А., Яковенко С.В.** Регистрация инфрагравитационных волн на границе гидро-сфера—литосфера береговым лазерным деформографом // ДАН, 2003, т. 389, № 2, с. 244—246.

**Багаев С.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаев В.П.** Лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений // Физика Земли, 1992, № 1, с. 85—91.

**Гранин Н.Г., Радзиминович Н.А., Кучер К.М., Чечельницкий В.В.** Генерация колебаний уровня озера Байкал удаленными сильными землетрясениями // ДАН, 2014, т. 455, № 2, с. 224—228.

**Давыдов А.В., Долгих Г.И.** Изучение сейсмоакустических процессов с помощью лазерных деформографов // Оптика атмосферы и океана, 1993, т. 6, № 7, с. 844—857.

**Давыдов А.В., Долгих Г.И.** Регистрация сверхнизкочастотных колебаний 52.5-метровым лазерным деформографом // Физика Земли, 1995, № 3, с. 64—67.

**Давыдов А.В., Долгих Г.И.** Модуляционные свойства собственных колебаний Земли // Физика Земли, 1997, № 8, с. 46—49.

**Давыдов А.В., Долгих Г.И., Ильичев В.И.** Динамика и трансформация внутренних волн в шельфовой зоне // ДАН, 1994, т. 336, № 4, с. 538—541.

**Долгих Г.И.** Некоторые результаты экспериментального исследования характеристик сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых низкочастотным гидроакустическим излучателем // Акустический журнал, 1998, т. 44, № 3, с. 358—361.

**Долгих Г.И.** Принципы построения однокоординатных лазерных деформографов // Письма в ЖТФ, 2011, т. 37, вып. 5, с. 24—30.

**Долгих Г.И., Привалов В.Е.** Лазеры. Лазерные системы. Владивосток, Дальнаука, 2009, 203 с.

**Долгих Г.И., Мишаков А.В.** О возможности прогноза коровых землетрясений по вариациям напряженно-деформационного поля Земли // ДАН, 2011, т. 437, № 5, с. 691—694.

**Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В.** Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли, 1998, № 11, с. 76—81.

**Долгих Г.И., Корень И.А., Овчаренко В.В.** Влияние вариаций атмосферного давления на показания лазерного деформографа // Физика Земли, 2001, № 11, с. 92—96.

**Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Фищенко В.К.** Применение лазерных деформографов вертикальной и горизонтальной ориентаций в геофизических исследованиях переходных зон // Физика Земли, 2002, № 8, с. 69—73.

**Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Широков О.П., Чупин В.А., Яковенко С.В.** Деформационные и акустические предвестники землетрясений // ДАН, 2007а, т. 413, № 1, с. 96—100.

**Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.** Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений // ДАН, 2007б, т. 417, № 1, с. 109—112.

**Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.** Инфразвуковые колебания Японского моря // ДАН, 2011, т. 441, № 1, с. 98—102.

**Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.** Морские внутренние волны и атмосферные депрессии // ДАН, 2015, т. 462, № 5, с. 601—604.

**Дреннов А.Ф., Джурик В.И., Серебrenников С.П., Брыжак Е.В., Дреннова Н.Н.** Спектры ускорений колебаний, возбуждаемых землетрясениями юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (2), с. 292—301.

**Ищукова Л.П.** Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск, Типография «Глазовская», 2007, 260 с.

**Милюков В.К.** Наблюдение тонкой структуры основной сфероидальной моды Земли  ${}_0S_2$  // Физика Земли, 2005, № 4, с. 16—22.

**Милюков В.К.** Мониторинг состояния магматических структур вулкана Эльбрус по наблюдениям литосферных деформаций // Вулканология и сейсмология, 2006, № 1, с. 3—15.

**Милюков В.К., Кравчук В.К., Миронов А.П., Латынина Л.А.** Деформационные процессы в литосфере, связанные с неравномерностью вращения Земли // Физика Земли, 2011, № 3, с. 96—109.

**Милюков В.К., Виноградов М.П., Миронов А.П., Мясников А.В., Перельгин Н.А.** Собственные колебания Земли, возбужденные тремя крупнейшими землетрясениями последнего десятилетия, по деформационным наблюдениям // Физика Земли, 2015, № 2, с. 21—36.

**Петрова Л.Н.** Сейсмический процесс в интервале частот 0.05—0.5 мГц: закономерности и особенности // Вулканология и сейсмология, 1999, № 4—5, с. 116—124.

**Петрова Л.Н., Любимцев Д.В.** Планетарный характер сейсмогравитационных колебаний Земли // Физика Земли, 2006, № 2, с. 26—36.

**Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Петров В.А., Просекин Б.А.** Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2012, № 3, с. 3—13.

**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» // Горный журнал, 2013, № 8 (2), с. 9—14.

**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.

**Сидоров В.К., Тарантин М.В.** О природе низкочастотных максимумов в спектрах сейсмических шумов // Физика Земли, 2013, № 1, с. 63—66.

**Швед Г.М., Ермоленко С.И., Карпова Н.В., Вендт З., Якоби К.** Регистрация глобальных осцилляций атмосферы сейсмическими приборами // Физика Земли, 2013, № 2, с. 131—142.

**Garoi F., Apostol D., Damian V., Logofatu P.C., Ionita B.F., Lazar J., Molesini G., Papadopoulos T., Ionescu C., Tugui A.** CALAS: Carpathian laser strainmeter — a project and preliminary results // Proc. SPIE, 2007, v. 7022, p. 7022181-1-702218-8.

**Jahr T., Kroner C., Lippmann A.** Strainmeters at Moxa observatory, Germany // J. Geodyn., 2006, v. 41, p. 205—212.

**Laser interferometer gravitational wave observatory.** 2009, official site of the LIGO Laboratory: [www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu).

**Milyukov V.K., Klyachko B.S., Myasnikov A.V., Striganov P.S., Yanin A.F., Vlasov A.N.** A laser interferometer-deformograph for monitoring the crust movement // Instrum. Exp. Tech., 2005, v. 48, № 6, p. 780—795.

**Takemoto Shuzo, Momose Hideo, Araya Akito, Morii Wataru, Akamatsu Junpei, Ohashi Masatake, Takamori Akiteri, Miyoki Shinji, Uchiyama Takashi, Tatsumi Daisuke, Higashi Toshihiro, Telada Souichi, Fukuda Yoichi.** A 100 m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains // J. Geodyn., 2006, v. 41, p. 23—29.