

УДК 550.34:621.373

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-1-42-58

ЛАЗЕРНЫЙ ДЕФОРМОГРАФ И ВАРИАЦИИ ПРИЛИВНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВО ВРЕМЕНИ

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Владимир Михайлович Семибаламут

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» Сибирский филиал, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, кандидат физико-математических наук, директор, тел. (383)330-88-48, e-mail: wladim28@yandex.ru.

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Юрий Николаевич Фомин

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» Сибирский филиал, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, начальник сектора лазерных геофизических наблюдений, тел. (383)330-88-48, e-mail: fominy@mail.ru

Екатерина Ивановна Грибанова

ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» Сибирский филиал, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, ведущий инженер, тел. (383)330-88-48, e-mail: somlp@laser.nsc.ru

Елена Валерьевна Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Сергей Владимирович Панов

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, старший научный сотрудник, тел. (383)333-30-72, e-mail: lss@laser.nsc.ru

Михаил Дмитриевич Парушкин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, младший научный сотрудник, тел. (383)333-30-72, e-mail: mihail.parushkin@yandex.ru

Лазерные системы измерения смещений и деформаций широко используются в геодезии. Исследования деформаций земной коры необходимы для решения различных задач в широком пространственном и временном диапазоне. В работе представлены результаты лазерных деформографических измерений в штольне сейсмостанции Талая (Байкальский регион). Рассматривается оригинальная конструкция лазерной измерительной системы, вариации приливных параметров за период с 1995 по 2015 г. и проводится их сравнение с сейсмичностью региона. Показан аномальный характер приливных амплитуд и фаз в периоды региональных землетрясений магнитудой больше 5.5, приводятся модели явления. Вариации амплитуд и фаз приливной деформации могут достигать 3–4 % в амплитуде и до 3° в сдвиге фаз, что может быть вызвано изменением структуры и гидродинамических условий в эпицентральной зоне землетрясения, а также в зоне Главного Саянского разлома и вдоль долины р. Талая.

Ключевые слова: лазерный деформограф, аномалия, амплитудный фактор, прилив, фазовый сдвиг, землетрясение, Байкал, модели приливных деформаций.

Введение

История изучения современных движений и деформаций земной коры показывает исключительную важность аппаратного комплекса и технологии проведения измерений, так как изучаемые геофизические эффекты находятся на пределах чувствительности приборов и измерительных комплексов (уровня единиц нанострейн – 10^{-9}). Линейная деформация – это отношение изменений длины к длине (dL/L), т. е. величина безразмерная. В западной литературе используются миллестрейн 10^{-3} , микрострейн 10^{-6} и т. д. Известно, что первые деформографы появились в конце XIX в. [1]. В приборах использовались металлические стержни длиной 100 м в качестве эталона длины и механические регистрирующие устройства. Штанговый деформограф современного типа создан Бельоффом в 1935 г. [2]. Основные элементы штангового деформографа сохранились и в современных лазерных комплексах. Они используются при исследовании собственных колебаний Земли, приливных вариаций, современных движений земной коры, поиска предвестников землетрясений и техногенных катастроф. Для исключения воздействия термических и барических воздействий системы устанавливаются в глубоких штольнях в районах с низким уровнем шумов. В советское время наклономерные и деформографические измерения широко развивались в сейсмоактивных районах Средней Азии и Кавказа, в районах строительства ГЭС и их водохранилищ. К сожалению, в последние десятилетия, в связи с понижением общего уровня технической культуры в РФ и странах бывшего СССР, такие сложные виды измерений становятся редкостью [3, 4].

В нашей работе рассматриваются результаты двадцатилетних измерений лазерным деформографическим комплексом отечественной разработки [5] в сейсмоактивном регионе. Известно, что, несмотря на имеющийся обширный материал по признакам подготовки сильных землетрясений, прогноз этих катастрофических явлений остается одной из нерешенных проблем наук о Земле [6].

Установлено, что подготовка землетрясений в первую очередь связана с процессами деформирования земной коры, а само сейсмическое событие – это результат внезапного высвобождения упругой энергии, накопившейся в геологической среде. Можно ожидать изменения механических свойств среды в области будущего землетрясения [7]. Высокоточные измерения деформаций в подземных обсерваториях активно развиваются во многих регионах мира [8–10]. Расположение таких систем зависит от тектонической схемы региона, положения границ тектонических плит Земли. Так, например, для Калифорнии и Японии с линейным положением межплитных границ (Северо-Американская и Тихоокеанская плиты, Тихоокеанская и Евразийская плиты), системы устанавливаются вдоль границ, а для внутриплитных районов Китая предпочтительно равномерное расположение систем по площади [6]. В нашем случае лазерная деформографическая система была установлена на сейсмостанции Талая (рис. 1) в нескольких километрах южнее границы Сибирской платформы и Байкальской рифтовой системы (в зоне Главного Саянского и Приморского разломов). Рассмотрим конструкцию лазерного приборного комплекса, использованного при измерениях деформаций.



Рис. 1. Положение обсерватории Талая, п. Култук, г. Слюдянка и оз. Байкал. Расстояние от сейсмостанции Талая до берега оз. Байкал составляет 7 км

Лазерный деформографический комплекс

Для регистрации динамики развития деформационных процессов в сейсмоактивных зонах необходимы устройства, позволяющие с высокой чувствительностью и в непрерывном режиме измерять малые относительные деформационные смещения горных пород. С этой целью в Институте лазерной физики

СО РАН разработан оригинальный автоматизированный лазерный деформограф. Преимуществом созданного для измерений в штольне лазерного деформографического комплекса является то, что он обладает в присутствии атмосферы высокой относительной чувствительностью порядка 10^{-9} – 10^{-10} к малым перемещениям в широком диапазоне периодов колебаний 10^0 – 10^7 с. Функциональная схема деформографического комплекса приведена на рис. 2. Комплекс включает в себя источник лазерных излучений – гетеродинного и зондирующего, интерферометр и блок регистрации. Блок регистрации состоит из измерителя фазового сдвига (ИФС), блока управления записью данных в накопитель и их передачей на удаленный компьютер. Выносной приемник GPS-ГЛОНАСС обеспечивает временную привязку измерений [11].

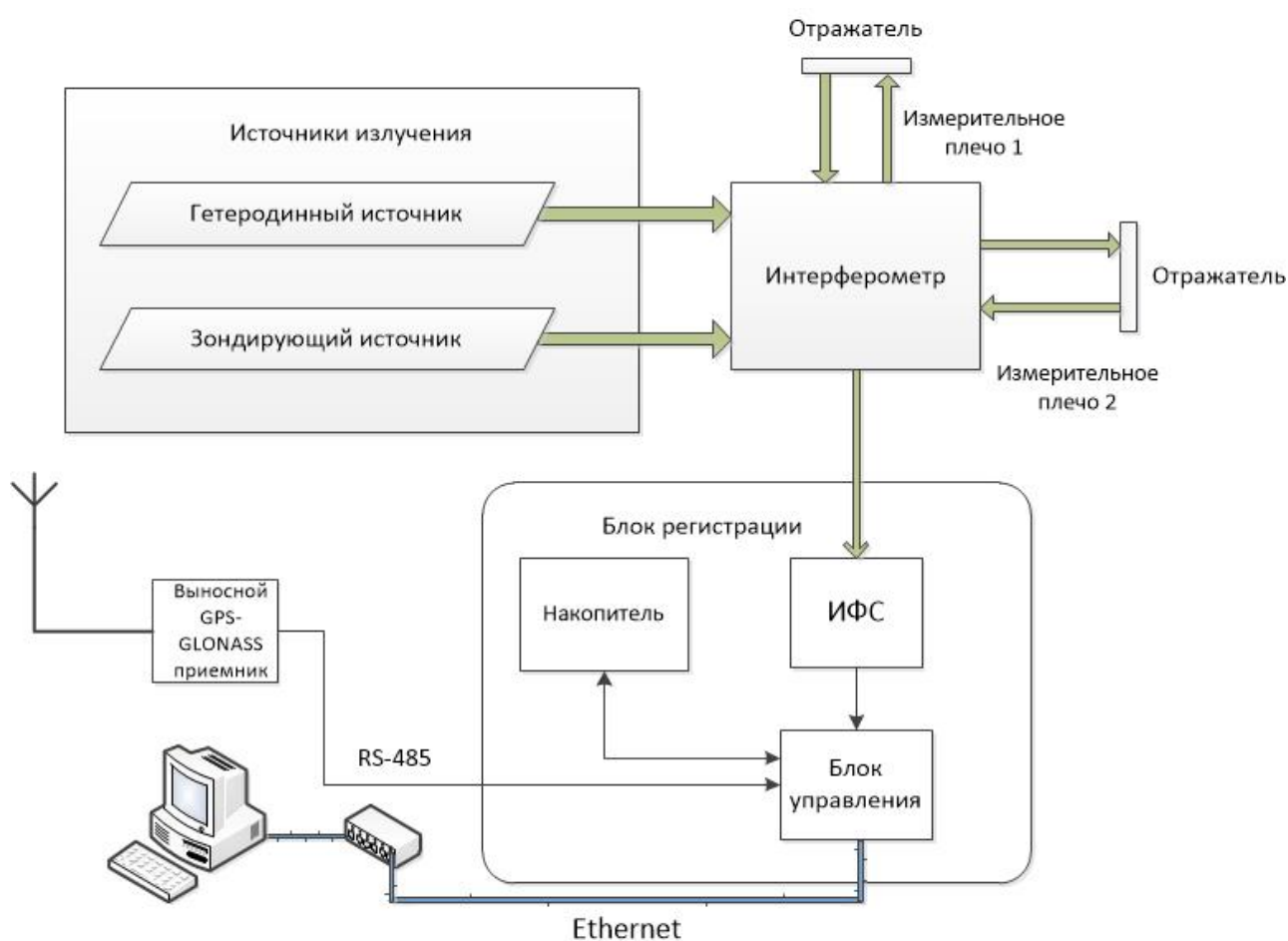


Рис. 2. Функциональная схема гетеродинного лазерного деформографического комплекса

Интерферометр (рис. 3) состоит из четырех независимых оптических каналов – трех измерительных и одного опорного. Они выполнены по схеме несимметричного интерферометра Майкельсона, где в качестве опорного оптическо-

го излучения используется излучение гетеродинного лазера, смещенного по частоте на 1 МГц относительно зондирующего, посылаемого на перемещающийся объект. Принцип работы измерительного канала основан на непрерывной регистрации изменения фазы волны во времени, обусловленного эффектом Доплера при отражении излучения от движущегося объекта. Излучения от лазерных источников поступают на светоделительные зеркала 10, 11, 12, 13, 17, 18, с помощью которых распределяются по оптическим каналам. Зеркалами 19, 25 дается настройка зондирующего излучения на зеркальные концевые отражатели измерительных каналов и схему компенсации. Зеркала 3, 4, 7, 8, 12, 13 предназначены для пространственного совмещения прошедших измерительные трассы зондирующих излучений с гетеродинным, а зеркала 11, 18, 23, 24 – для совмещения излучения из компенсирующего канала с гетеродинным излучением. На фотодетекторах 1, 6, 14, 22 происходит выделение информационных сигналов на разностной частоте 1 МГц. Для согласования апертур прошедшего измерительную трассу излучения с гетеродинным используются приемные коллиматоры 2, 21.

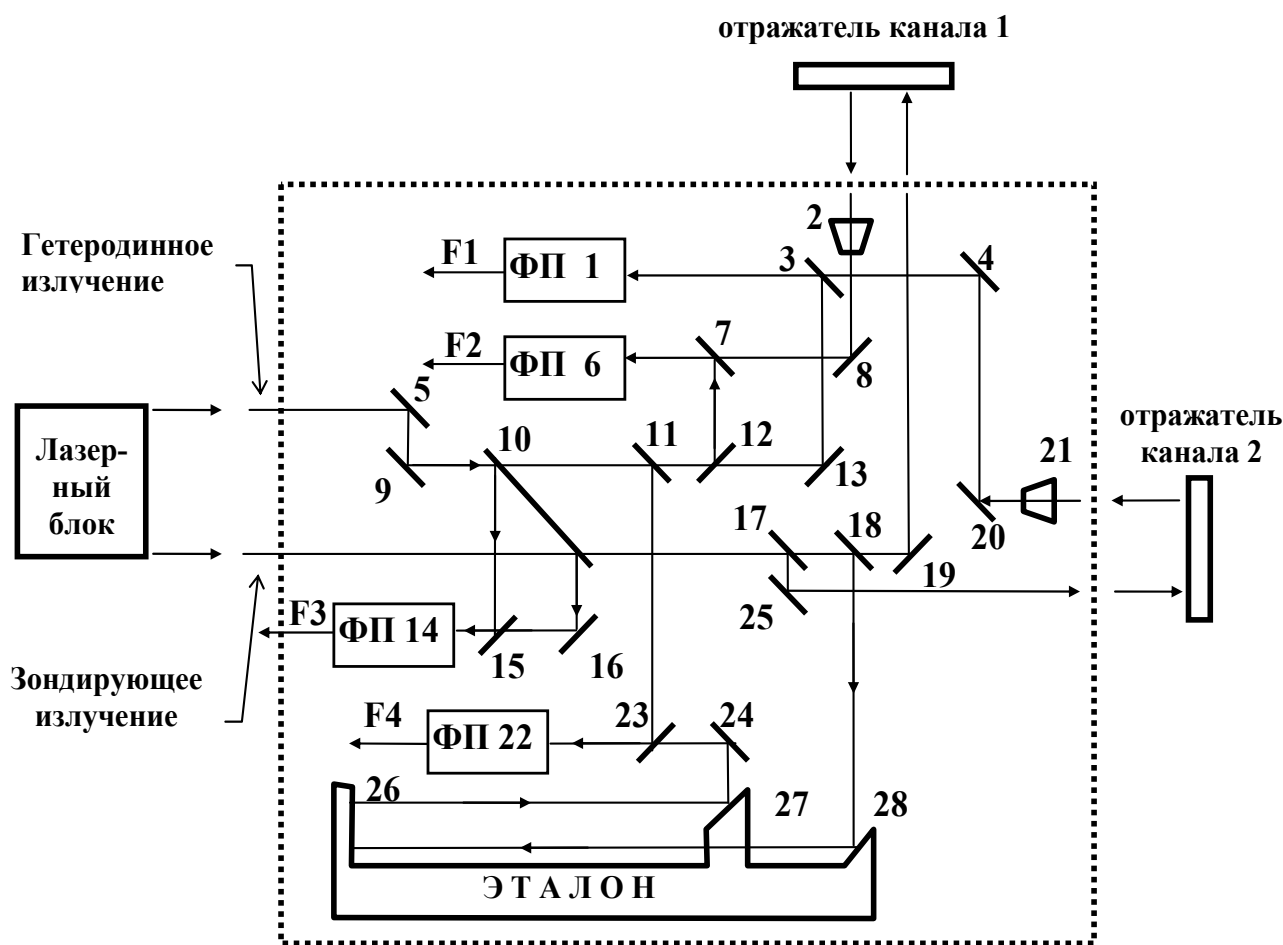


Рис. 3. Оптическая схема интерферометра

Опорный оптический канал предназначен для получения сигнала на рабочей частоте измерительных фазовых детекторов 1 МГц, относительно которого выполняется измерение фазового набег в радиосигналах, поступающих от фотодетекторов 1, 6, 22. Он образован зеркалами 10, 15, 16 и фотодетектором 14 с предварительным высокочастотным усилителем на сигнал $F3$. Измерительный канал I образован светоделительными зеркалами 7, 8, 12, 19. В него также входят концевой отражатель 1, приемный коллиматор 2 и фотодетектор 6 с предварительным усилителем высокой частоты на сигнал $F2$. Измерительный канал II состоит из светоделительных зеркал 3, 4, 13, 17, 20, 25, концевой отражателя 2, приемного коллиматора 21 и фотодетектора 1 с предварительным усилителем на сигнал $F1$.

В данную конструкцию деформографа входит оптический узел, предназначенный для компенсации влияния атмосферы и частотной нестабильности лазеров. Он содержит фотодетектор 22, светоделительные зеркала 11, 18, 23, 24 и зеркала 26, 27, 28, укрепленные на штанге. Штанга длиной 1,2 м изготовлена из сплава 36Н (инвар) с температурным расширением $dL/dT = 8 \cdot 10^{-7}$ град⁻¹. На фотодетекторе 22 выделяется радиочастотный сигнал $F4$, изменение фазы которого пропорционально вариациям длины волны лазерного источника и показателя преломления воздуха, но свободно от влияния деформаций горных пород. Реализация гетеродинной схемы измерения малых перемещений защищена патентом [12]. Эталонирование и калибровка установки лазерного деформографа достаточно сложны. Они периодически проводятся в лабораториях Института лазерной физики СО РАН.

С 1994 г. с использованием двухкоординатного лазерного деформографа проводятся непрерывные многомесячные наблюдения в штольне сейсмостанции Талая в Байкальской рифтовой зоне с координатами: $51^{\circ}40'48.00'' N$; $103^{\circ}38'24.00'' E$ (см. рис. 1). Сейсмостанция Талая расположена южнее Главного Саянского разлома, в 7 км к западу от оз. Байкал. Район отличается резкопересеченным рельефом – от 450 м (оз. Байкал) до 1 000 м (Комаринский хребет). Сейсмостанция расположена в 15 км от станции Слюдянка Транссибирской железной дороги (см. рис. 1). Штольня сейсмостанции имеет главную галерею длиной 90 м и шесть поперечных штреков до 30 м длиной. Ширина штольни и штреков составляет от 2 до 3 м. Штольня пройдена в северном склоне хребта, горные породы, слагающие склон, – это архейские мраморы с гранито-гнейсовыми интрузиями со слюдой. В зоне измерений деформаций крепь отсутствует. Схема расположения деформографа в штольне приведена на рис. 4. Запись сигналов деформографа производится с частотой дискретизации 0,5 Гц. Длина измерительных плеч равна 25 м. Плечи расположены ортогонально друг другу (ориентация штольни на СЗ ($-24^{\circ}N$)).

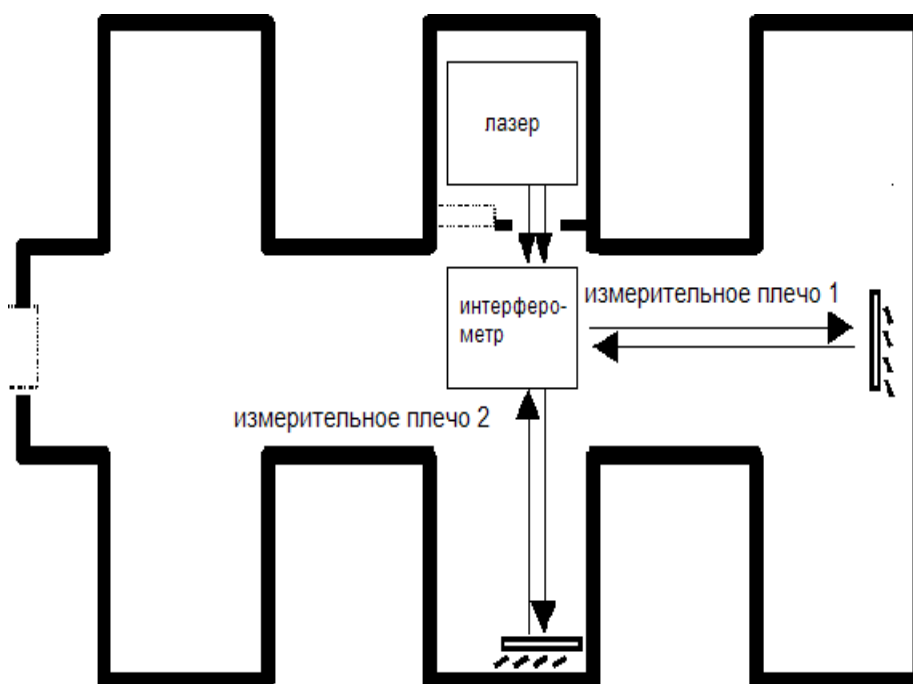


Рис. 4. Схема расположения двухкоординатного лазерного деформографа в штольне сейсмостанции Талая

Приливные вариации и свойства среды

Приливная сила – это один из редких в геофизике случаев, при котором точно известна ее величина (из астрономических данных – отношение масс Земля-Луна и Земля-Солнце определено с точностью $2 \cdot 10^{-6}$, а частота вращения Земли известна до 7-й цифры), но регистрируемые эффекты очень малы (в деформации – это несколько единиц восьмого знака $3 \cdot 10^{-8}$, т. е. десятки нанострейн). Используя данные о строении Земли, можно рассчитать приливные вариации силы тяжести, наклонов и деформаций земной поверхности с учетом широтной зависимости от экватора до полюсов [13–16]. Используя реакцию Земли на известную силу, появляется возможность анализа изменений этого отклика во времени. Известно, что изменение амплитуды и фазового запаздывания отклика свидетельствуют об изменениях упругих свойств геологической среды во времени. Можно проанализировать вариации приливных параметров в периоды сильных землетрясений. Рассмотрим высокочастотную часть сигнала, а именно вариации в приливном диапазоне (период от 12 до 24 часов). Моделирование эффектов в вариациях приливных параметров, связанных с изменениями свойств на границе двух сред, проводилось как численными методами, так и методами физического моделирования. При моделировании можно использовать упругие модули среды или значения скоростей сейсмических волн, которые являются функцией упругих модулей и плотности горной породы.

Из численных решений этой задачи, известно [17–20], что эффект отдельной трещины (разлома – границы в земной коре) или границы зоны трещиноватости (моделируется как изменения сейсмических скоростей на границе двух сред с различными упругими параметрами земной коры) достигает 50 % от нормального значения в амплитуде и до 90° в фазовом запаздывании в зависимости от положения инструмента и трещины. Эффект для приливных деформаций убывает обратно пропорционально расстоянию, а для приливных наклонов земной поверхности – квадрату расстояния от границы раздела сред (рис. 5). Заметим, что трещиноватость – это повышение количества трещин в единице объема горной породы, что ведет к изменению упругих свойств (упругих модулей или в другой терминологии – скоростей сейсмических волн геологической среды). Изменения упругих модулей, вызванных появлением области трещиноватости горных пород, могут появиться в области сильного землетрясения либо в зоне глубинного разлома в результате активного деформирования. Регистрация с использованием только одной станции приводит к неоднозначности в решении обратной задачи при определении положения области изменения упругих свойств. Для решения этой задачи желательно иметь несколько станций в изучаемой зоне.

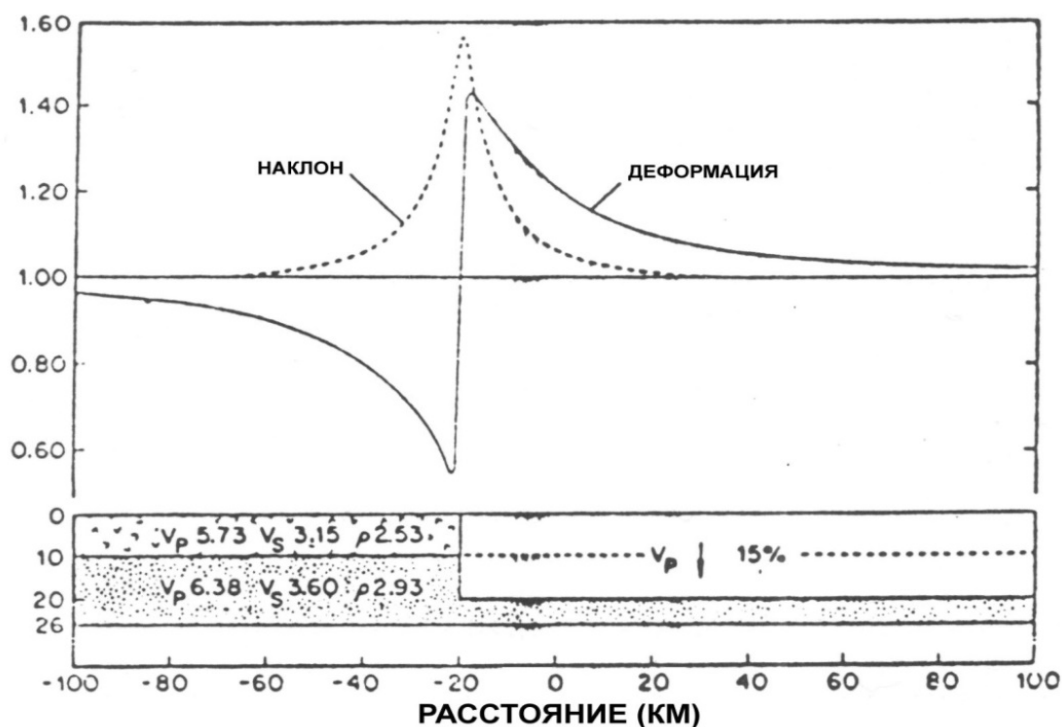


Рис. 5. Модель нормированных (относительного известного теоретического значения, вертикальная шкала от 1 вверх и вниз) приливных амплитуд на границе двух сред для наклонов и деформаций. Показаны величины скоростей сейсмических волн V_p и V_s в км/с и плотности $\rho \cdot 10^3$ в кг/м³ в земной коре. Изменение V_p на 15 %, т. е. изменяется только объемный упругий модуль. Мощность верхней части земной коры в километрах (10, 20 и 26 км)

Рассмотрим результаты физического моделирования на примере приливных наклонов земной поверхности [21]. Для разделения приливных волн суточного и полусуточного диапазона необходимо получить почасовые данные минимум за 40 дней наблюдений [22]. Многомесячные измерения приливных вариаций наклонов проводились в штреке соляной шахты, а далее пробуривалась трещина и опять проводилась многомесячная регистрация. Размеры штрека в шахте составили $10 \times 10 \times 1\,000$ м (длина). Размеры трещины – 0,1 м (ширина) \times 10 м (длина) \times 1 м (глубина). Результаты приливного анализа записи наклонов приведены в табл. 1 (период 1981–1982 до образования трещины, период 1982–1983 – после). Как видим, эффект появления трещины приводит к изменениям в амплитуде. Заметим, что амплитудный фактор – это отношение наблюдаемой амплитуды к теоретической (A_n/A_T). Значительные изменения получены в фазе (при упругой реакции запаздывания приливной амплитуды относительно приливной силы нет $\Delta\varphi = 0$, но появляется влияние полости, т. е. штольни – отверстия в сплошной среде для размещения датчика). Так, в табл. 1 до бурения видим эффект полости (-10°). Далее эффект в фазе отражает появление трещины в среде ($10^\circ + 25^\circ$, т. е. изменение в 35° относительно начального состояния). Изменения в амплитудном факторе достигают 25 %, что вызвано появлением свободной вертикальной поверхности (стенки трещины) и изменением поля напряжений (приливных) в среде.

Таблица 1

Результаты приливного анализа наклонов,
полученные в разные эпохи

Приливные волны	Теоретическая амплитуда $\times 10^3$ с дуги	29.05.1981–18.10.1982		27.12.1982–14.11.1983	
		Амплитудный фактор (A_n/A_T) с ошибкой	Фазовое запаздывание $\Delta\varphi$ в градусах	Амплитудный фактор (A_n/A_T) с ошибкой	Фазовое запаздывание $\Delta\varphi$ в градусах
O1	5,047 0	$0,615\,8 \pm 0,027\,4$	$-9,66 \pm 2,55$	$0,776\,4 \pm 0,025\,8$	$25,12 \pm 1,90$
K1	7,098 5	$0,686\,5 \pm 0,019\,7$	$-10,18 \pm 1,65$	$0,732\,0 \pm 0,017\,9$	$20,74 \pm 1,39$

Результаты измерений на Байкале

С лазерной деформографической аппаратурой на Байкале получен уникальный двухдесятилетний ряд приливных вариаций (1995–2015 гг.). Измерения проводились на сейсмостанции Талая (озеро Байкал), расположенной южнее северной границы Сибирской платформы и Байкальской рифтовой системы (рис. 6). Здесь границей являются глубинные разломы – Главный Саянский и Приморской.

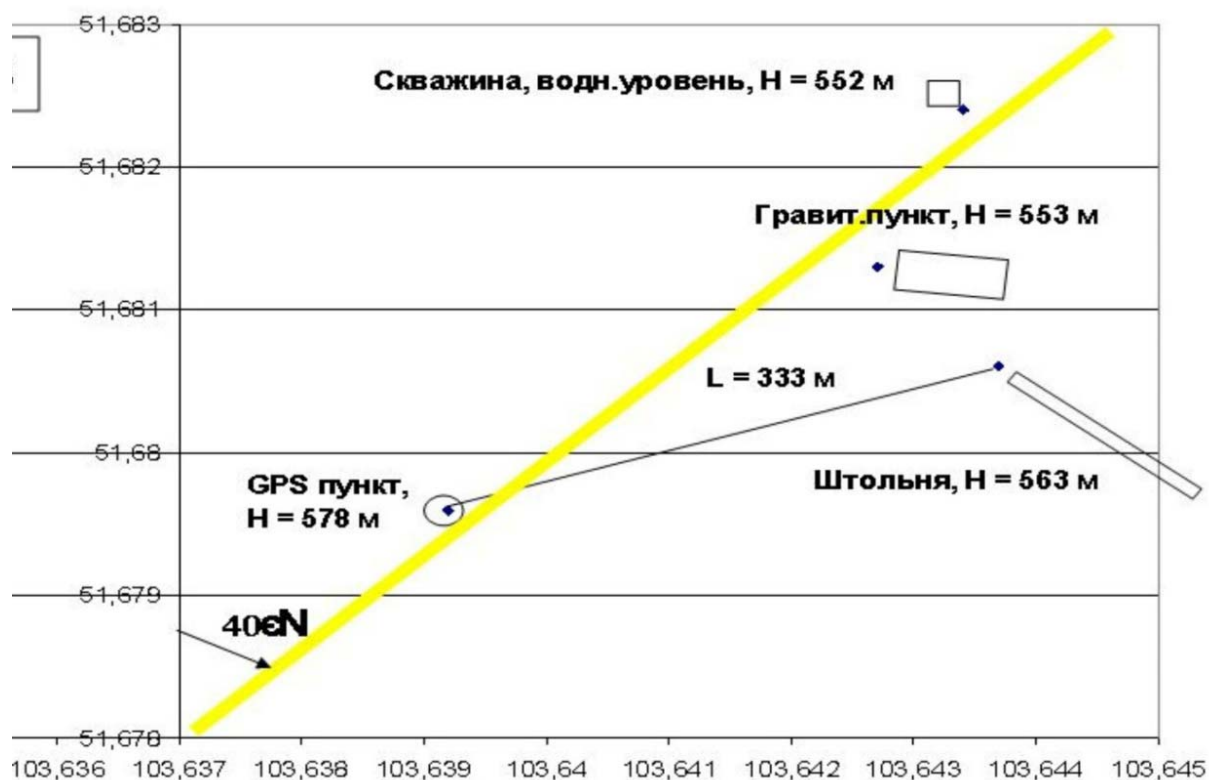


Рис. 6. Положение пунктов измерений на территории сейсмостанции.

Желтая линия – ориентация горной долины, координаты – широта и долгота

Примеры приливной записи лазерных деформографов, полученные в штольне сейсмостанции Талая, приведены на рис. 7, 8. Измерения в 90-метровой штольне проводились по двум 25-метровым ортогональным линиям. Наименее зашумленными оказались данные по разностной деформации. На рис. 7 показана запись по отдельным плечам деформографа и разность. Менее шумная запись разностной деформации была проанализирована по программе ETERNA, используемой в международной практике [22]. Из приливного анализа получаем параметры (величину амплитуды, значение амплитудного фактора с ошибками и значение фазового сдвига с ошибками) для долгопериодных, суточных, полусуточных, третьсуточных и четвертьсуточных волн. Суточные волны обычно зашумлены барическими и термическими эффектами при использовании лазерной линии в открытой атмосфере даже при постоянной температуре в штольне. Нами использован результат по полусуточной лунной волне M2 (период 12,42 часа) с небольшой ошибкой (0,8 % в амплитуде и 0,5 % в фазе).

Результаты приливного анализа получены с помощью программы ETERNA [22] по ежегодным данным разностной деформаций.

Анализ полученных результатов с учетом сейсмичности в 100 км области вокруг станции (табл. 2) показывает значимую связь вариаций приливных параметров деформации (амплитудного фактора и сдвига фаз) и региональной сейсмичности.

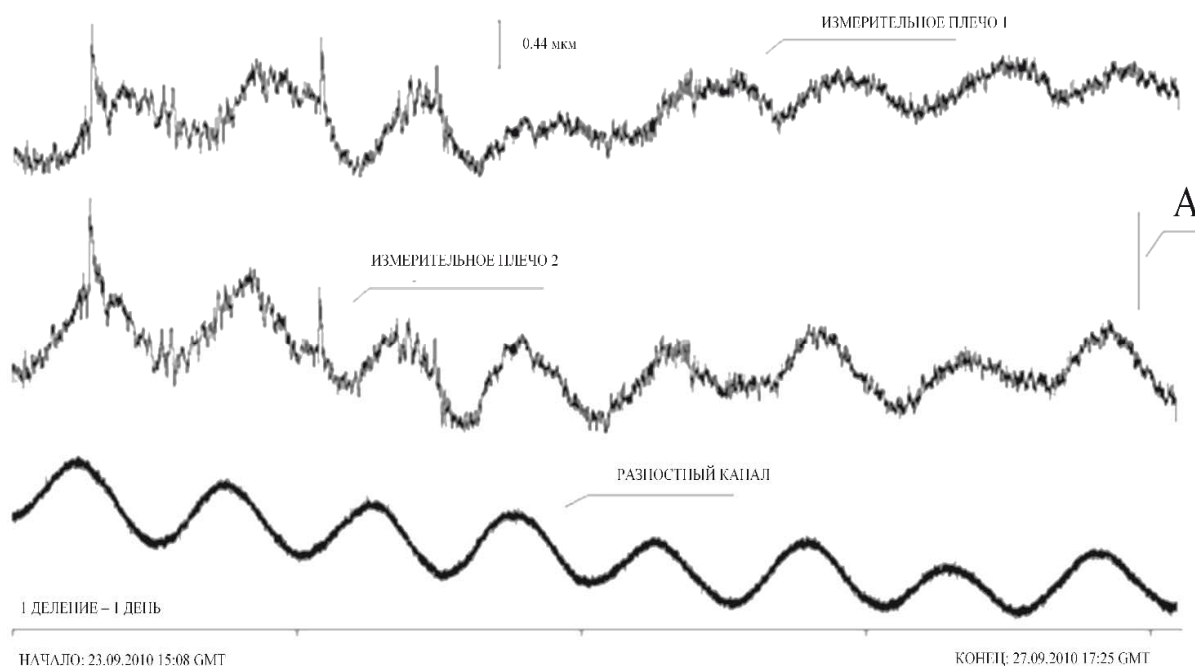


Рис. 7. Особенность деформационного процесса, приливные вариации по отдельным ортогональным плечам и разностная деформация (нижний график). База – 25 м. Период наблюдений: 23–27 сентября 2010 г., т. е. четверо суток наблюдений. Начало наблюдений 15 ч 08 м 21.09.2010, конец записи 17 ч 25 м 27.09.2010. Показана величина смещения в 0,44 мкм, или $1,76 \cdot 10^{-8}$ относительной деформации, или 17,6 нанострейнов

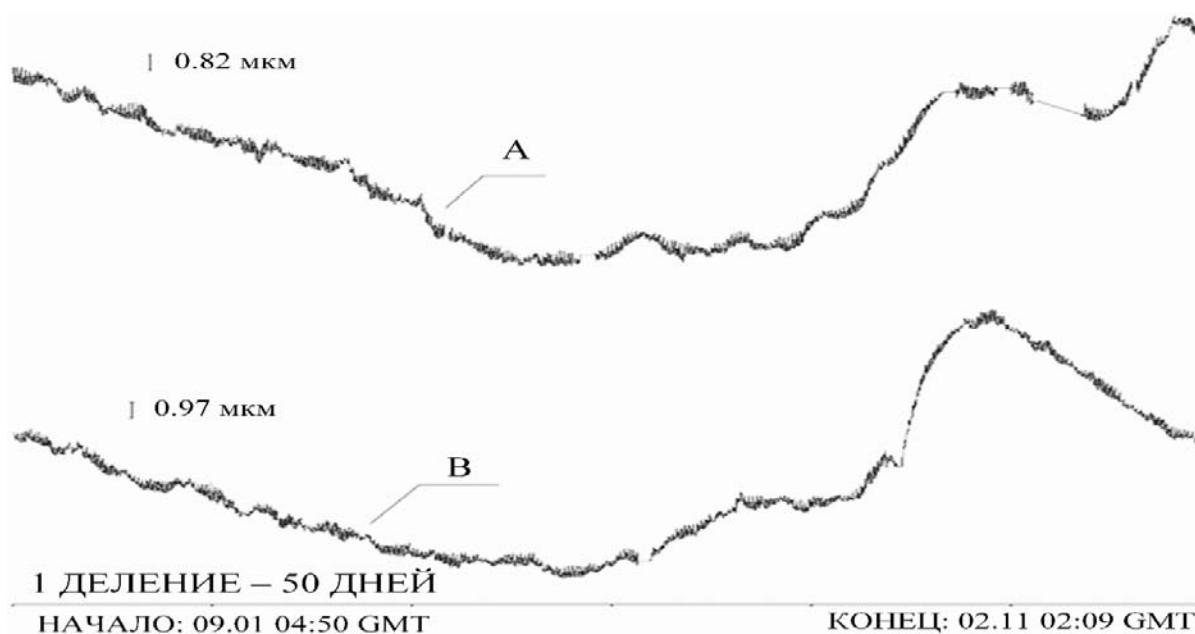


Рис. 8. Записи разностных деформаций, полученных за один и тот же промежуток времени в 300 дней: А – 2009 г., В – 2010 г. Для периода А показана величина смещения в 0,82 мкм, или $3,28 \cdot 10^{-8}$ относительной деформации, или 32,8 нанострейнов. Для периода В показана величина смещения в 0,97 мкм, или $3,88 \cdot 10^{-8}$ относительной деформации, или 38,8 нанострейнов

Список землетрясений
в окрестностях станции Талая (1994–2008 гг.)

Время и координаты землетрясения	Магнитуда	Расстояние до эпицентра (км) и диапазон магнитуд	
		0 < L < 50 M > 4.0	50 < L < 100 M > 5.0
29/06/1995; 51.71°N, 102.70°E	5.5–5.7		67 км на З
25/02/1999: 51.63°N, 104.89°E; 51.65°N, 104.80°E; 51.58°N, 104.78°E; 51.71°N, 104.79°E	5.5–5.8; 5.3; 4.6; 4.5		86 км на В; 87 км на В
31/05/2000; 51.71°N, 104.84°E	5.1		86 км на В
01/09/2002; 51,29°N, 103,33°E	4.6	49 км на ЮЗ	
27/08/2008; 51.61°N, 104.07°E	6.3–6.5	25 км на В	

Обычно кондиционный материал для анализа составлял от 7 до 11,5 месяцев за год. На рис. 9 и 10 стрелками показаны периоды землетрясений с магнитудой более 5, произошедшие на расстоянии до 100 км от станции наблюдения. Периоды сильных землетрясений выделяются аномальной реакцией среды на приливную силу.

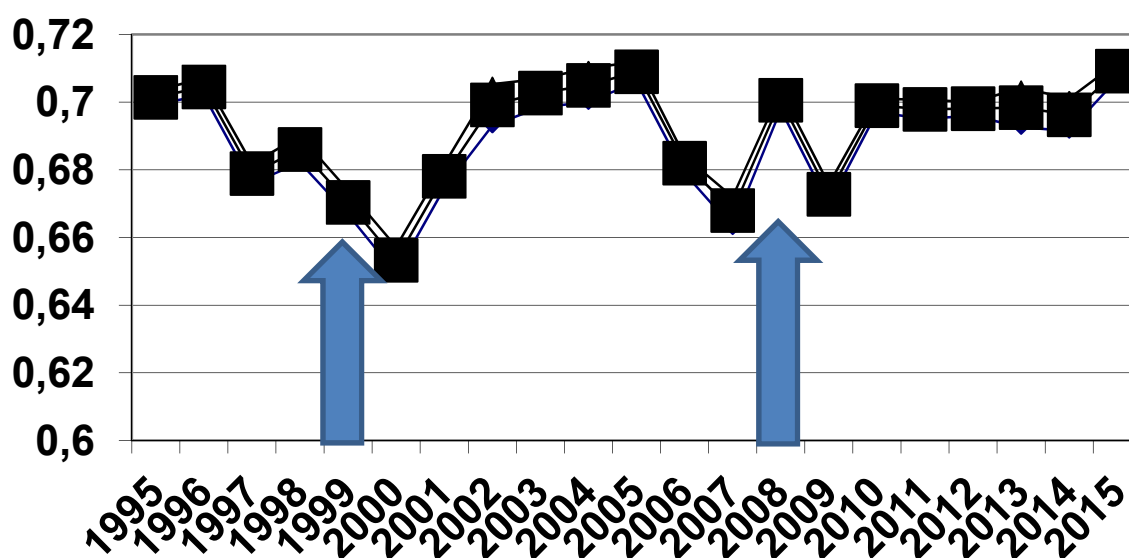


Рис. 9. Вариация во времени амплитудного фактора волны M2 по ежегодным данным лазерного деформографа. Показан уровень ошибки. Стрелки – период землетрясений 1999–2000 г. и 2008 г. (см. табл. 2)

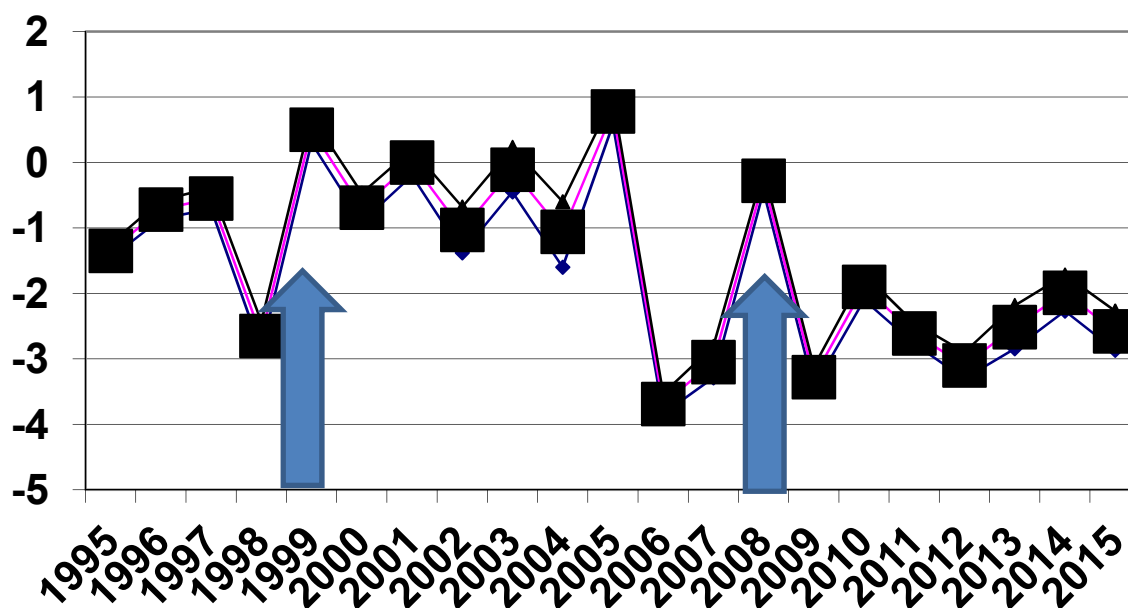


Рис. 10. Вариации во времени фазового запаздывания волны M2 в градусах. Выделяется период после землетрясения 2008 г. и переход на новый уровень, что свидетельствует об изменении физических свойств горных пород при близком землетрясении (см. табл. 2)

Заключение

Анализ данных, полученных с помощью системы «двухкоординатный лазерный деформограф», позволил выявить вариации амплитудного фактора (A_H/A_T) и фазового сдвига $\Delta\varphi$ (относительно приливообразующей силы) для полусуточной приливной волны M2 за период с 1995 по 2015 г. При анализе и построении графика вариаций использованы данные за год, что исключает возможные сезонные вариации. Можно отметить, что по результатам анализа многолетние вариации приливных параметров лежат в пределах нескольких процентов. Значение фазового сдвига после Култукского землетрясения ($M = 6.3-6.5$, в 25 км от станции Талая, 27.08.2008) изменилось на 2° , что в соответствии с существующими модельными оценками отражает изменение упругих свойств геологической среды района. В эпохи сильных региональных землетрясений (магнитудой $M > 5$) вариации приливных параметров достигают 3–4 % в амплитудном факторе (A_H/A_T), в сдвиге фазы $\Delta\varphi = 1-3^\circ$ при ошибке 0,5 %. Изменения упругих свойств во времени могут быть вызваны: деформированием земной коры в эпицентральной зоне сильных региональных землетрясений Байкальской рифтовой системы; изменением гидродинамических условий в зоне Главного Саянского разлома, расположенного в нескольких километрах севернее пункта наблюдений; изменением состояния зоны трещиноватости в горной долине по р. Талая (размеров, объемов, плотности и ориентации трещин) [23, 24].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Melchior P. The Tides of the Planet Earth. – 2nd edition. – Pergamon Press, 1982. – 641 p.
2. Benioff H. A linear strain seismograph // Bull. Seismol. Soc. America. – 1935. – Vol. 25, No. 4. – P. 283–309.
3. Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений / С. Н. Багаев, В. А. Орлов, Ю. Н. Фомин, В. П. Чеботаев // Изв. Академии наук. Физика Земли. – 1992. – № 1. – С. 85–91.
4. Долговременные и приливные деформации по наблюдениям деформографами и наклономерами (Тянь-Шань – ст. Ала-Арча) / В. Ю. Тимофеев, В. С. Яковенко, А. Д. Дучков, Б. Дюкарм, Е. А. Ревтова // Геология и геофизика. – 2001. – № 10. – С. 1650–1658.
5. Модели деформирования земной коры юго-западной части Байкальской рифтовой зоны по экспериментальным данным / В. Ю. Тимофеев, В. М. Семибаламут, Г. П. Арнаутов, Е. Н. Калиш, Ю. Ф. Стусь, Б. Дюкарм, Л. В. Анисимова, А. Ю. Рыбушкин, Ю. Н. Фомин, В. Т. Залуцкий // Геология и геофизика. – 1999. – № 3. – С. 387–394.
6. Моги К. Предсказание землетрясений. – М. : Мир, 1988. – 382 с.
7. Семенов А. Н. Изменение отношения времени пробега поперечных и продольных волн перед сильным землетрясением // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1969. – № 4. – С. 72–77.
8. Thomas Jahr, Corinna Kroner, Andrea Lippmann. Strainmeters at Moxa observatory, Germany // Journal of Geodynamics. 2006. – Vol. 41. – P. 205–212.
9. Berger J., Beaumont C. An analysis of tidal strain observations from the United States of America. II. The inhomogeneous tide // Bull. Seism. Soc. Am. – 1976. – Vol. 66. – P. 1821–1846.
10. A 100m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains / Shuzo Takemotoa, Hideo Momosea, Akito Arayab, Wataru Moriic, Junpei Akamatsuc, Masatake Ohashid, Akiteru Takamorib, Shinji Miyokid, Takashi Uchiyamad, Daisuke Tatsumie, Toshihiro Higashia, Souichi Teladaf, Yoichi Fukudaa // Journal of Geodynamics. – Vol. 41. – 2006. – P. 23–29.
11. Система регистрации и передачи данных для лазерного деформографического комплекса / А. Ю. Рыбушкин, М. Д. Парушкин, Д. О. Терешкин, С. В. Панов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 3. – С. 190–195.
12. Двухчастотная лазерная интерферометрическая система для измерений линейных перемещений / С. Н. Багаев, В. А. Орлов, А. Ю. Рыбушкин, В. М. Семибаламут, Ю. Н. Фомин : Пат. док. 2082085; RU; С1 6G 01 В 21/00; № 94015048, заявл. 19940422, зарег. в Гос. реестре 19970620.
13. Молоденский С. М. Приливы, нутация и внутреннее строение Земли. – М. : ИФЗ АН СССР, 1984. – 215 с.
14. Dehant V., Defraigne P., Wahr J. M. Tides for a convective Earth // Journal of Geophysical Research. – 1999. – Vol. 104, No. B1. – P. 1035–1058.
15. Dehant V., Defraigne P. New transfer functions for nutations of a non-rigid Earth // J. Geophys. Res. – 1997. – Vol. 102. – P. 27659–27688.
16. Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections / B. Ducarme, V. Yu. Timofeev, M. Everaerts, P. Y. Gornov, V. A. Parovishnii, M. A. van Ruymbekc // Journal of Geodynamics. – 2008. – Vol. 45, No. 2–3. – P. 73–82.
17. Beaumont C., Berger J. Earthquake Prediction: Modification of the Earth Tide tilts and Strains by Dilatancy // Geophys. J. R. astron. Soc. – 1974. – Vol. 39. – P. 111–121.
18. Agnew D. C. Strainmeters and Tiltmeters // Reviews of Geophysics. – 1986. – Vol. 24, No. 3. – P. 579–624.
19. Harrison J. C. Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement // J. Geophys. Res. – 1976. – Vol. 81. – P. 319–328.
20. Blair D. Topographic, geologic and cavity effects on the harmonic content of tidal strain // Geophys. J. R. astr. Soc. – 1977. – Vol. 48. – P. 393–405.

21. Simon D., Skalsky L., Jerabek J. Application of man-made clefts for systematic changes of strain induced tilts // Proceedings of the Tenth International Symposium on Earth Tide. – Madrid, 1986. – P. 835–841.

22. Wenzel H.-G. The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30. // Marees Terrestres. Bulletin D'Informations. – 1996, Bruxelles. – Vol. 124. – P. 9425–9438.

23. Estimation of Coseismic Deformation, Poroelasticity, and Fracturing of Rocks from the Data on Water Level in a Borehole / V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov, E. V. Boiko, A. V. Timofeev, A. V. Yaroshevich, P. Yu. Gornov // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. – 2012. – Vol. 48. – No. 7–8. – P. 640–652. DOI: 10.1134/S1069351312060067.

24. Strain and displacement rates during a large earthquake in the South Baykal region / V. Y. Timofeev, D. G. Ardyukov, E. V. Boyko, E. I. Griбанова, V. M. Semibalamut, A. V. Timofeev, A. V. Yaroshevich // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – Vol. 53, No. 8. – P. 798–816. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.06.007>.

Получено 28.12.2018

© В. Ю. Тимофеев, В. М. Семибаламут, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Ю. Н. Фомин, Е. И. Грибанова, Е. В. Бойко, С. В. Панов, М. Д. Парушкин, 2019

LASER EXTENSOMETER AND TIME VARIATION OF TIDAL DEFORMATION

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 3, Akademika Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Vladimir M. Semibalamut

Siberian Branch of the Federal Research Center «United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», 13/3, Akademika Lavrentieva Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Director, phone: (383)330-88-48, e-mail: wladim28@yandex.ru.

Dmitrii G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 3, Akademika Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 3, Akademika Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Yurii N. Fomin

Siberian Branch of the Federal Research Center «United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», 13/3, Akademika Lavrentieva Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Chief of Laser Sector, phone: (383)330-88-48, e-mail: fominy@mail.ru

Ekaterina I. Griбанова

Siberian Branch of the Federal Research Center «United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», 13/3, Akademika Lavrentieva Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (383)330-88-48, e-mail: somlp@laser.nsc.ru

Elena V. Boyko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, 3, Akademika Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Reseacher, phone: (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Sergei V. Panov

Institute of Laser Physics of Siberian Branch RAS, 13/3, Akademika Lavrentieva Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (383)333-30-72, e-mail: lss@laser.nsc.ru

Michel D. Parushkin

Institute of Laser Physics of Siberian Branch RAS, 13/3, Akademika Lavrentieva Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, phone: (383)333-30-72, e-mail: mihail.parushkin@yandex.ru

Laser measurement systems for displacement-deformation measurement have been used usually in geodesy. Investigations of present-day crust deformation are very important for using in spatial and time framework. Experimental laser measurement results collected at Talaya seismology station (Baikal region) presented in this article. Original laser systems have been used for permanent measurements in the underground gallery. Variation of tidal parameters received between 1995 and 2015 was analyzed using regional seismology data for local earthquake ($M > 5.5$). Anomaly behavior of tidal parameters has been presented for strong earthquakes period. We discuss different models of these effects. Tidal reaction can reach 3 % ÷ 4 % for tidal amplitude and 3° for phase lag, which can be a result of deformed structure and hydrodynamic changes in epicenter earthquake zone, into Main Sayan Fault zone and along Talaya mountainous valley.

Key words: laser extensometer, anomaly, amplitude factor, tide, phase lag, earthquake, Baikal Lake, tidal models.

REFERENCES

1. Melchior, P. (1982). *The Tides of the Planet Earth* (2nd ed.). Pergamon Press, 641 p.
2. Benioff, H. (1935). A linear strain seismograph. *Bull. Seismol. Soc. America*, 25(4), 283–309.
3. Bagaev, S. N., Orlov, V. A., Fomin, Ju. N., & Chebotaev, V. P. (1992). Heterodyne laser extensometer for precision geophysical measurements. *Izvestija Akademii nauk. Fizika Zemli [Izvestiya. Physics of the Solid Earth]*, 1, 85–91 [in Russian].
4. Timofeev, V. Ju., Jakovenko, V. S., Duchkov, A. D., Djukarm, B., & Revtova, E. A. (2001). Long-term and tidal deformations according to observations by deformographs and tilt-gauges (Tien-Shan – Ala-Archa). *Geologija i geofizika [Geology and Geophysics]*, 10, 1650–1658 [in Russian].
5. Timofeev, V. Ju., Semibalamut, V. M., Arnautov, G. P., Kalish, E. N., Stus', Ju. F., Djukarm, B., Anisimova, L. V., Rybushkin, A. Ju., Fomin, Ju. N., & Zaluckij, V. T. (1999). Experimental models for the Earth's crust deformations in the southwest of the Baykal rift zone. *Geologija i geofizika [Geology and Geophysics]*, 40(3), 387–394 [in Russian].
6. Kiyoo Mogi. (1985). *Earthquake Prediction*. Tokyo: Academic Press, 382 p.
7. Semjonov, A. N. (1969). The change in the ratio of the travel time of transverse and longitudinal waves before a strong earthquake. *Izv. AN SSSR. Fizika Zemli [Izv. USSR. Academy of Sciences, Physics of the Solid Earth]*, 4, 72–77 [in Russian].
8. Thomas Jahr, Corinna Kroner, & Andrea Lippmann. (2006). Strainmeters at Moxa observatory, Germany. *Journal of Geodynamics*, 41, 205–212.
9. Berger, J., & Beaumont, C. (1976). An analysis of tidal strain observations from the United States of America. II. The inhomogeneous tide. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1821–1846.

10. Shuzo Takemotoa, Hideo Momosea, Akito Arayab, Wataru Moriic, Junpei Akamatsuc, Masatake Ohashid, Akiteru Takamorib, Shinji Miyokid, Takashi Uchiyamad, Daisuke Tatsumie, Toshihiro Higashia, Souichi Teladaf, & Yoichi Fukudaa. (2006). A 100m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains. *Journal of Geodynamics*, 41, 23–29.
11. Rybushkin, A. Ju., Parushkin, M. D., Tereshkin, D. O., Panov, S. V. (2017). Data recording and transmission system for laser extensometer complex. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh [Journal of Mining Science]*, 3, 190–195 [in Russian].
12. Bagaev, S. N., Orlov, V. A., Rybushkin, A. Ju., Semibalamut, V. M., & Fomin, Ju. N. Dual-frequency laser interferometric system for measuring linear displacements. *Patent RF No. 2082085*. Novosibirsk: IP Russian Federation.
13. Molodenskiy, S. M. (1984). *Prilivy, nutaciya i vnutrennee stroenie Zemli [Tides, nutation and the internal structure of the Earth]*. Moscow: IFZ AN SSSR, 215 p. [in Russian].
14. Dehant, V., Defraigne, P., & Wahr, J. M. (1999). Tides for a convective Earth. *Journal of Geophysical Research*, 104(B1), 1035–1058.
15. Dehant, V., & Defraigne, P. (1997). New transfer functions for nutations of a non-rigid Earth. *J. Geophys. Res.*, 102, 27659–27688.
16. Ducarme, B., Timofeev, V. Yu., Everaerts, M., Gornov, P. Y., Parovishnii, V. A., & Ruymbeke van M. A. (2008). Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections. *Journal of Geodynamics*, 45(2–3), 73–82.
17. Beaumont, C., & Berger, J. (1974). Earthquake Prediction: Modification of the Earth Tide tilts and Strains by Dilatancy. *Geophys. J. R. astron. Soc.*, 39, 111–121.
18. Agnew, D. C. (1986). Strainmeters and Tiltmeters. *Reviews of Geophysics*, 24(3), 579–624.
19. Harrison, J. C. (1976). Cavity and topographic effects in tilt and strain measurement. *J. Geophys. Res.*, 81, 319–328.
20. Blair, D. (1977). Topographic, geologic and cavity effects on the harmonic content of tidal strain. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 48, 393–405.
21. Simon, D., Skalsky, L., & Jerabek, J. (1986). Application of man-made clefts for systematic changes of strain induced tilts. *Proceedings of the Tenth International Symposium on Earth Tide* (pp. 835–841). Madrid.
22. Wenzel, H.-G. (1996). The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30. *Marees Terrestres. Bulletin D'Informations*, 124, 9425–9438.
23. Timofeev, V. Yu., Ardyukov, D. G., Boiko, E. V., Timofeev, A. V., Yaroshevich, A. V., & Gornov, P. Yu. (2012). Estimation of Coseismic Deformation, Poroelasticity, and Fracturing of Rocks from the Data on Water Level in a Borehole. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 48(7–8), 640–652. doi: 10.1134/S1069351312060067
24. Timofeev, V. Y., Ardyukov, D. G., Boyko, E. V., Gribanova, E. I., Semibalamut, V. M., Timofeev, A. V., & Yaroshevich, A. V. (2012). Strain and displacement rates during a large earthquake in the South Baykal region. *Russian Geology and Geophysics*, 53(8), 798–816. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.06.007>.

Received 28.12.2018

© V. Yu. Timofeev, V. M. Semibalamut, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev, Yu. N. Fomin, E. I. Gribanova, E. V. Boyko, S. V. Panov, M. D. Parushkin, 2019