

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Г.И. Долгих

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43,
г. Владивосток, 690041; e-mail: dolgikh@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 16 октября 2010 г.

В статье обсуждаются технические характеристики аппаратно-программных комплексов, созданных на основе применения широкополосных сейсмографов, GPS/ГЛОНАС-приемников, лазерных деформографов, в свете их возможностей по изучению вариаций напряженно-деформационного поля Земли, приводящих к природным и техногенным катастрофам.

Ключевые слова: геодинамический мониторинг, широкополосные сейсмографы, лазерные деформографы.

ВВЕДЕНИЕ

Работа любого геофизика в прошлом и настоящем, что бы они не выполняли, направлена на решение одной единственной задачи – изучение физики различных геодинамических и термодинамических процессов внутри Земли с возможностью описания их дальнейшего развития. Изучение физики землетрясений, извержений вулканов и других проявлений геодинамических и термодинамических процессов является вторичной задачей, решение которой является невозможной без решения первой. Мы не можем заглянуть в глубь Земли. Поэтому о протекающих геодинамических и термодинамических процессах можем судить по измерениям различных параметров на поверхности Земли. Данные параметры мы можем получить только при проведении работ по двум направлениям: 1) измерение вариаций напряженно-деформационного поля Земли на ее поверхности с оценкой основных параметров протекания таких процессов на различных глубинах, 2) измерение амплитудно-фазовых вариаций различных колебательных процессов и вариаций их добротностей на поверхности Земли с экстраполяцией данных изменений внутрь Земли. Все другие методы (измерение вариаций электромагнитного поля Земли, сопротивления, вариаций уровня воды в скважинах и водоемах, выделения газов и т.п.) относятся к косвенным, параметрическим методам, по которым невозможно точно описать геодинамические и термодинамические процессы внутри Земли.

Колебания земной коры широкого диапазона частот имеют причинно-следственную связь и служат индикатором различных физических явлений. Их причинно-следственная связь заключается в том, что они являются как следствием, так и причиной различных геофизических процессов. Изучение их необходимо не только для решения обратной задачи геофизики: по параметрам колебаний и волн исследование природы явлений, их породивших, но и для изучения взаимодействия физических процессов и выявления причинно-следственной связи возникающих колебаний и волн в формировании различных гео- и биосферных явлений на Земле и в окружающем пространстве. Частотный диапазон колебаний земной коры очень широк и простирается от нуля до сотен килогерц. Каждое колебание определяется параметрами своего источника, и его частота зависит от линейных размеров источника. По амплитудно-фазовым вариациям конкретных колебаний можно судить о характере поведения различных отдельностей. С точки зрения взаимодействия физических полей геосфер Земли, за отдельность можно принять характерный объект, обладающий не только упругими свойствами в классическом его представлении, но конгломерат микрообъектов, составляющий макрообъект, который в каждом конкретном случае обладает единичными физическими свойствами. Изучение частот колебаний отдельностей или совокупности отдельностей проводят прямыми или косвенными методами. Прямые измерения осуществляют с помо-

стью инерционных и безынерционных приборов и устройств, работающих на близком к резонансу и далеком от резонанса принципах действия. Существенное отличие в конструкции приборов этих двух классов проявляется в возможности исследования колебаний и волн различного диапазона частот. К приборам инерционного типа необходимо отнести различные сейсмографы, измеряющие колебания и волны в узком диапазоне частот. Конструктивные особенности сейсмографов позволяют в 1000 и более раз усиливать исследуемый сигнал и тем самым повышать возможности сейсмографов по регистрации колебаний и волн небольшой амплитуды. Приборы безынерционного типа предназначены для исследования колебаний и волн более широкого диапазона частот, практически от нуля герц до килогерц.

Решение многих фундаментальных задач зависит, в первую очередь, от полученных экспериментальных результатов. Качество получаемых результатов зависит от применяемой в исследованиях аппаратуры, которая должна удовлетворять следующим основным требованиям: 1) иметь предельную чувствительность, при которой возможны фоновые измерения изучаемых параметров; 2) обладать наивысшим частотным и динамическим диапазонами. Важность данных требований возрастает при изучении природных процессов на этапах их возникновения и развития. В любой области исследования очень сложно определить момент начала возникновения того или иного природного процесса. В геофизике сложность проведения данных исследований связана с тем, что возникающие природные процессы и явления имеют большие временные и пространственные масштабы. Большие временные и пространственные масштабы требуют применения при изучении данных природных процессов аппаратуры, в идеале обладающей неограниченным частотным и динамическим диапазонами при предельно достижимой чувствительности. Предельно достижимая чувствительность определяется межатомным взаимодействием. Можно полагать, что минимальная чувствительность определяется размерами атома, а максимальная – флуктуациями атома. Невозможность создания аппаратуры, удовлетворяющей вышеперечисленным требованиям, привела к бурному применению параметрических методов при проведении исследований природных процессов и явлений, особенно в инфразвуковом диапазоне. Так, в геофизике широко применяются высокочувствительные установки, рабочий диапазон частот которых не позволяет выполнять прямые измерения изучаемых параметров в инфразвуковом диапазоне. В этом случае применение параметрических методов возможно только при выполнении одного из следующих условий: 1) нели-

нейное взаимодействие процессов и явлений различных пространственных и временных масштабов; 2) возбуждение высокочастотных процессов и явлений низкочастотными в среде, обладающей большой нелинейностью. Поверхностный анализ выполнения данных условий позволяет понять, что при проведении исследований различных процессов на основе применения параметрических методов не может быть и речи об изучении физики процесса их возникновения, так как взаимодействие процессов и явлений различных временных и пространственных масштабов или возбуждение высокочастотных процессов и явлений низкочастотными наблюдается лишь на последних стадиях их развития. Применение проволочных, кварцевых и штанговых деформографов, наклономеров и т.п. в геофизике не позволяет исследовать процессы и явления на стадии их возникновения, так как они не обладают достаточной чувствительностью.

В связи с изобретением лазеров, особенно частотно стабилизированных лазеров непрерывного излучения, появилась возможность создания прецизионных установок для проведения измерений различных геофизических параметров с наноуровневой точностью. В конце прошлого столетия были созданы первые лазерные деформографы, лазерные гравиметры и вариометры, обладающие высокой чувствительностью в широком частотном и динамическом диапазонах.

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СЕЙСМОГРАФЫ

Рассмотрение установок аппаратно-программного комплекса начнем с широкополосных сейсмографов – приемников инерционного типа, которые характеризуются высокой чувствительностью, но узким, к сожалению, диапазоном частот [9, 10, 12, 13]. Рассмотрим динамические характеристики широкополосного цифрового сейсмографа, обобщенная блок-схема которого представлена на рис. 1.

На схеме выделены основные элементы, определяющие инерционные свойства прибора – сейсмоприемники (БСП) и фильтры нижних частот (ФНЧ). Считаем, что усилитель (УС) и цифровой регистратор (ЦР) не вносят динамических погрешностей.

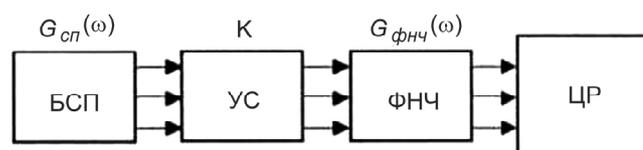


Рис. 1. Блок-схема широкополосного сейсмографа.

БСП – блок сейсмоприемников, УС – усилители сигналов, ФНЧ – фильтры низкой частоты, ЦР – цифровой регистратор, $G_{сп}(\omega)$, K , $G_{фнч}(\omega)$ – коэффициенты передачи сейсмоприемников, усилителей и фильтра низких частот, соответственно.

тей. Обозначим через H , G_{cn} и $G_{фнч}$ соответственно, комплексные коэффициенты передачи сейсмографа, сейсмоприемника и ФНЧ, а через K – суммарный вещественный коэффициент передачи усилителя и цифрового регистратора. Поскольку модуль коэффициента передачи $|H|$ широкополосного сейсмографа может значительно изменяться в пределах частотного диапазона, его выражение целесообразно представить в логарифмических единицах:

$$\ln [H(\omega)] = \ln \{ |G_{cn}(\omega)| |G_{фнч}(\omega)| K \} + j \{ \varphi_{cn}(\omega) + \varphi_{фнч}(\omega) \}. \quad (1)$$

Первое слагаемое в (1) представляет собой амплитудно-частотную характеристику $A(\omega)$ сейсмометра, а второе слагаемое – его фазово-частотную характеристику $\varphi(\omega)$, ω – угловая частота. На рис. 2 представлены эти характеристики для широкополосного цифрового сейсмометра с электрохимическими сейсмоприемниками типа ЭХП-17.

В настоящее время на полигонах Геофизической службы РАН устанавливаются и вводятся в режим непрерывных измерений различные широкополосные сейсмоприемники. Так, например, на геофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН “м. Шульца” сотрудниками Камчатского филиала Геофизической службы РАН совместно с сотрудниками Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ТОИ ДВО РАН) установлено оборудование цифровой сейсмической станции. Сейсмометрические каналы построены на базе трехкомпонентного широкополосного велосиметра Guralp CMG-3ESPВ (0.0083–40 Гц, 2·200 В/м/с) и регистратора данных GeoSIG GSR-24 с 24-х разрядным АЦП. Чувствительность сейсмометрических каналов (велосиметр + АЦП регистратора): вертикальный (ВНЗ) – 185597952 отсч./м/с; восток–запад (ВНЕ) – 221249536 отсч./м/с; север–юг (ВНН) – 220200960

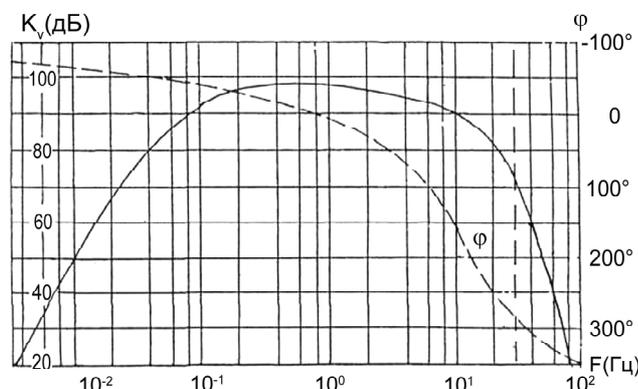


Рис. 2. Амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики широкополосного сейсмографа типа ЭХП-17.

отсч./м/с. Велосиметр обладает динамическим диапазоном 130 дБ, что позволяет без искажений регистрировать как очень слабые события, так и значительные перемещения грунта от сильных землетрясений. Данные сейсмической станции передаются в режиме реального времени на информационно-обработывающий центр сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами (СП СПЦ) “Петропавловск” (Камчатка) и в Приморское УГМС.

Все современные широкополосные сейсмоприемники, несмотря на высокую чувствительность, обладают, к сожалению, узким рабочим диапазоном частот, что делает их практически непригодными при изучении всевозможных деформационных процессов инфразвукового диапазона. На ликвидацию данных пробелов направлено применение GPS/ГЛОНАСС-приемников, кварцевых, штанговых и проволочных деформографов, лазерных деформографов.

ПРИЕМНИКИ БЕЗЫНЕРЦИОННОГО ТИПА

Основные характеристики GPS-приемников, применяемых на полигонах ТОИ ДВО РАН

Для изучения связи деформационных процессов различных масштабов в 2007 г. в ТОИ ДВО РАН введен в строй комплекс измерительных приборов, состоящий из лазерных деформографов и приемников GPS (Global Positioning System) Trimble 5700.

Комплекс (рис. 3) состоит из двух постов наблюдения: во Владивостоке (ТОИ ДВО РАН, пункт Vlad_POI и на м. Шульца (МЭС ТОИ ДВО РАН, пункт Shults). Во Владивостоке он состоит из GPS Trimble 5700 и десятиметрового лазерного деформографа. На м. Шульца он состоит из GPS Trimble 5700 и лазерного деформографа с длиной плеча 52.5 м. Для создания жесткой измерительной фигуры в расчетах используются измерения GPS в точке НКНД, находящейся в г. Находке, предоставляемые ЗАО НПП Навгеоком. Таким образом, точки Vlad_POI, Shults и НКНД образуют треугольник со сторонами 88.8, 93.4 и 144.7 км. Измерения в каждой точке ведутся двухчастотными приемниками Trimble 5700, работающими в системе GPS.

Измерения приборами системы GPS представляют собой точки, имеющие пространственные координаты, связанные наклонными векторами с соответствующими по времени наблюдения точками других измерительных пунктов. Расчет каждого вектора проводится по данным за период длительностью два часа. В результате постобработки получаем по каждому пункту наблюдения область, заполненную точками автономных координат. При этом все точки, как правило, попадают в область радиусом 2.5 мм (для массива данных протяженностью в один месяц), а осредне-

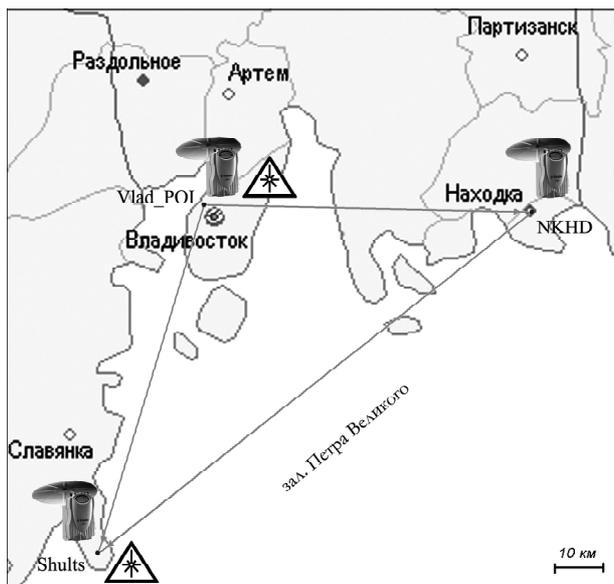


Рис. 3. Схема расположения пунктов мониторинга литосферных процессов.

ние месячных данных позволяет судить о смещениях автономных координат на единицы миллиметров.

Кварцевые, штанговые и проволочные деформографы

Началом создания деформографов механического типа можно считать появление работы [4]. В настоящее время разветвленная международная сеть геофизических станций, ведущих непрерывные наблюдения за движениями земной коры, включает несколько сотен деформографических установок штангового или проволочного типа, чувствительность которых, в основном, составляет величину 10^{-8} .

Несмотря на относительную простоту конструкции, механические деформографы обладают рядом неустраняемых недостатков. Это относится к их невысокой в ряде приложений чувствительности и к весьма значительному вкладу в показания приборов температурных вариаций.

Лазерные деформографы

Существует много интерферометров различных видов [1], которые находят применение в различных областях (Цендера-Маха, Физо, Линника, Рождественского, Фабри-Перо, Майкельсона, Релея и другие). Но только интерферометры Майкельсона и Фабри-Перо послужили основой для создания лазерных деформографов, задачей которых является измерение микродеформаций земной коры по одной или нескольким координатам. Лазерные деформографы пришли на смену механическим деформографам. Принцип работы лазерных деформографов состоит в

том, что при изменении базы деформографа изменяется оптический путь лазерного луча, пробегающего расстояние между двумя точками, составляющее базу прибора. Изменение оптического пути влечет за собой изменение фазы волны лазерного излучения вследствие дополнительного фазового набега. Это изменение фазы и является в большинстве случаев измеряемой величиной. Преимуществом лазерных деформографов перед механическими аналогами является, в первую очередь, исключение механического чувствительного элемента как такового. Влияние вариаций метеорологических параметров на показания прибора сводится, в основном, к их воздействию на изменение оптического пути лазерного луча. При использовании герметизированных или вакуумированных лучеводов точность измерения микродеформаций земной коры для лучших образцов составляет величину 10^{-10} – 10^{-11} м при чувствительности 10^{-12} – 10^{-13} [3]. Создание лазерных деформографов различных модификаций позволило на 3–4 порядка улучшить точность измерения микродеформаций земной коры в частотном диапазоне 0–1000 Гц по сравнению с применением деформографов механического типа.

Основные технические характеристики лазерных деформографов ТОИ ДВО РАН:

1) 52,5-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа (установлен стационарно под землей на МЭС ТОИ ДВО РАН “м. Шульца”): чувствительность – 10^{-11} ÷ 10^{-12} , рабочий диапазон частот – от 0 (условно) до 1000 Гц.

2) 10-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа (установлен стационарно в подвальном помещении здания ТОИ ДВО РАН): чувствительность – 10^{-11} ÷ 10^{-12} , рабочий диапазон частот – от 0 (условно) до 1000 Гц.

3) 17-метровый лазерный деформограф неравноплечего типа (устанавливается стационарно на территории Уссурийской астрофизической обсерватории, начало работы – ноябрь 2010 г.): чувствительность – 10^{-9} ÷ 10^{-10} , рабочий диапазон частот – от 0 (условно) до 1000 Гц.

4) 8-метровый мобильный лазерный деформограф (работал в сентябре 2010 г. на Сахалине): чувствительность – 10^{-9} ÷ 10^{-10} , рабочий диапазон частот – от 0 (условно) до 1000 Гц.

Оптические элементы практически всех существующих лазерных деформографов установлены на блоках, созданных из различных материалов, которые жестко соединены с земными породами. Технические характеристики деформографов зависят, в основном, от частотной стабильности применяемых лазеров, способов установки блоков деформографов и основных параметров среды их расположения. Учи-

тывая сказанное, лазерные деформографы необходимо рассматривать не только как конкретные лазерные интерферометры, а как систему “лазерный интерферометр – упругая среда”. Немного остановимся на принципах построения однокоординатных, неравноплечих лазерных деформографов, установленных на однородной среде, и рассмотрим некоторые особенности их амплитудно-частотных характеристик.

Сначала рассмотрим однокоординатный лазерный деформограф, оптические элементы которого смонтированы на двух блоках, которые жестко соединены с упругой средой (рис. 4). Основная масса лазерных деформографов создана по подобному принципу, который мы будем называть классическим.

Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику указанного лазерного деформографа. Пусть вдоль оптической оси деформографа распространяется гармоническая волна продольного типа, которую можно описать следующим выражением:

$$u_1 = A_0 \cos(kx_1 - \omega t), \quad (2)$$

где u_1 – смещение в точке x_1 , A_0 – амплитуда волны, $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота, ν – частота волны, t – текущее время. При распространении волны через лазерный деформограф он будет регистрировать изменение его базы:

$$\Delta L = u_2 - u_1 = 2A_0 \sin\left(\frac{kL}{2}\right) \sin\left(\omega t - kx_1 - \frac{kL}{2}\right), \quad (3)$$

где L – длина рабочего плеча лазерного деформографа, u_1 – смещение первого устоя лазерного деформографа, вызванное распространяющейся волной, u_2 – смещение второго устоя лазерного деформографа, вызванное распространяющейся волной; x_1 – координата первого устоя лазерного деформографа; т.е. регистрируемая им амплитуда волны зависит от L и λ .

Далее рассмотрим зависимость измеренного смещения при $x_1 = 0$ и $t = 0$ от длины волны (или частоты) для лазерных деформографов с длинами рабочих плеч 1000 и 100 м. При анализе формулы можно выделить две зоны: первая зона – до появления биений, вторая зона – зона биений. Отметим общие закономерности для указанных лазерных деформографов при регистрации упругой волны амплитудой 1 м, распространяющейся со скоростью 2000 м/с. В низкочастотной области на частотах 1.0, 0.1, 0.01, 0.001 и 0.0001 Гц имеем: 1) для лазерного деформографа с длиной плеча 1000 м регистрируемое смещение равно -1.48 , $-2.2 \cdot 10^{-2}$, $-2.2 \cdot 10^{-4}$, $-2.2 \cdot 10^{-6}$ и $-2.2 \cdot 10^{-8}$ м; 2) для лазерного деформографа с длиной плеча 100 м регистрируемое смещение равно $-2.2 \cdot 10^{-2}$, $-2.2 \cdot 10^{-4}$, $-2.2 \cdot 10^{-6}$, $-2.2 \cdot 10^{-8}$ и $-2.2 \cdot 10^{-10}$ м. В зоне биений ампли-

тудно-частотной характеристики имеем: 1) для лазерного деформографа с длиной плеча 1000 м $A(1.5 \text{ Гц}) = A(4.5 \text{ Гц}) = A(7.5 \text{ Гц}) = \dots = -2$, $A(3.0 \text{ Гц}) = A(6.0 \text{ Гц}) = A(9.0 \text{ Гц}) = \dots = 0$; 2) для лазерного деформографа с длиной плеча 100 м $A(15 \text{ Гц}) = A(45 \text{ Гц}) = A(75 \text{ Гц}) = \dots = -2$, $A(30 \text{ Гц}) = A(60 \text{ Гц}) = A(90 \text{ Гц}) = \dots = 0$, где A – амплитуда волны на выходе лазерного деформографа. Таким образом, из вышесказанного следует, что до зоны биений наилучшими характеристиками обладают лазерные деформографы, имеющие плечи наибольшей длины. В зоне биений сложно проводить регистрацию из-за периодических изменений амплитудно-частотной характеристики. Сложно рассчитать теоретически и определить экспериментально все особенности конкретных лазерных деформографов из-за неоднородного строения земной коры в зоне их расположения. Можно ли убрать данные биения? Ниже мы рассмотрим основной метод, позволяющий не только убрать данные биения, но и позволяющий измерять абсолютные амплитуды упругих волн для частот выше 1 Гц.

Расположим один из оптических блоков интерферометра (например, уголкового отражателя (5), рис. 4, устоя (6) при этом убирается) на маятниковой системе, имеющей резонансную частоту ν_0 и добротность Q . Другой оптический блок интерферометра (мы рассматриваем однокоординатный лазерный деформограф, расположенный на двух опорных точках) расположим жестко на земной коре. Пусть вдоль оптической оси деформографа распространяется гармоническая волна продольного типа, которую, как и выше, можно описать выражением (2). При распространении волны через лазерный деформограф он будет регистрировать изменение его базы:

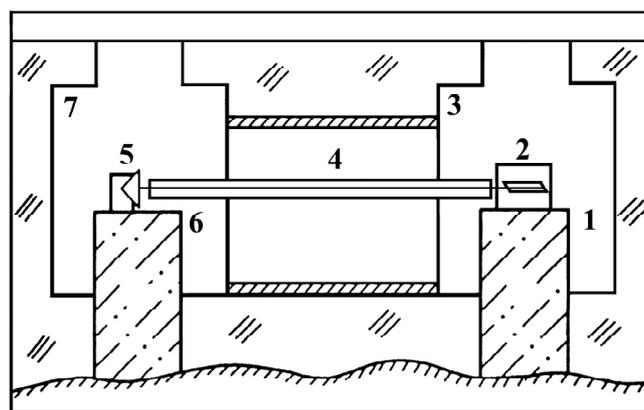


Рис. 4. Блок-схема лазерного деформографа классического типа.

1, 6 – бетонные (гранитные) устоя лазерного деформографа; 2 – интерференционный узел лазерного деформографа; 3, 7 – подземные гидрогерметизированные боксы лазерного деформографа; 4 – вакуумный (герметичный) лучевод; 5 – блок уголкового отражателя.

$$\Delta L = u_2 - u_1 = A_0 \times \left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2 \omega^2}} \times \\ \cos \left(kx_1 + kL - \omega t + \arctg \left(\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \right) \\ \cos(kx_1 - \omega t) \end{array} \right\}, \quad (4)$$

где $\gamma = \omega_0 / 2Q$, т.е. регистрируемая им амплитуда волны зависит от L , λ , v_0 и Q . Далее рассмотрим только зависимость измеренного смещения от длины волны (или частоты) для лазерного деформографа с длиной рабочего плеча $L = 1000$ м при резонансной частоте 3 Гц и добротности 300. Сравним амплитудно-частотные характеристики лазерного деформографа классического типа при длине 1000 м и лазерного деформографа маятникового типа аналогичной длины. В низкочастотной (меньше 1 Гц) области спектра их характеристики идентичны, а в высокочастотной области спектра их характеристики сильно отличаются. Так на рис. 5 приведено изменение амплитудно-частотной характеристики лазерного деформографа классического типа длиной 1000 м в частотном диапазоне от 5 до 50 Гц (для примера) при регистрации вышеуказанной гармонической продольной волны, имеющей скорость 2000 м/с. А на рис. 6 приведено изменение амплитудно-частотной характеристики лазерного деформографа маятникового типа длиной 1000 м в том же случае. Как видно из рис. 5, амплитудно-частотная характеристика лазерного деформографа классического типа испытывает периодические изменения, характер которых невозможно оп-

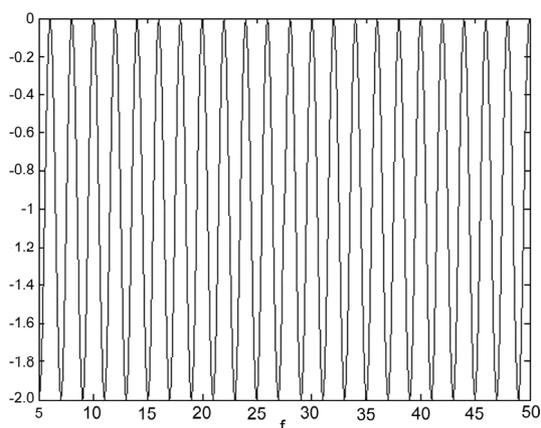


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика лазерного деформографа классического типа с длиной плеча 1000 м в частотном диапазоне 5–50 Гц.

По оси ординат отложена относительная амплитуда. По оси абсцисс – частота в Гц.

ределить для действующих установок ввиду того, что непонятно, на каких частотах они ничего не регистрируют из-за сложного строения пород участков земной коры, на которых они расположены, что делает их непригодными для измерений в данном диапазоне частот. Как видно из рис. 6, амплитудно-частотная характеристика маятникового лазерного деформографа не испытывает таких биений (главное, что амплитуда на выходе деформографа не достигает нуля). Более того, лазерные деформографы маятникового типа с увеличением частоты способны регистрировать абсолютную (по модулю) амплитуду волны. Манипулируя резонансной частотой и добротностью системы, можно добиться желаемых характеристик лазерных деформографов. Таким образом, создавая лазерный деформограф по маятниковому принципу, можно значительно улучшить его амплитудно-частотную характеристику.

РЕГИСТРАЦИЯ СИГНАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

Регистрация цунамигенных и нецунамигенных землетрясений

При обработке записи 52.5-метрового лазерного деформографа, полученной в декабре 2004 г., была обнаружена деформационная аномалия, связанная с цунамигенным землетрясением 2004 г. На рис. 7 приведена запись лазерного деформографа, содержащая колебания и деформационную аномалию, которые вызваны цунамигенным землетрясением, произошедшим в 00:58:53 в месте с координатами 3.30° N, 95.87° E. Судя по записи лазерного деформографа, произошло землетрясение, а затем возникла деформационная аномалия. На базе 52.5-метрового лазерного деформографа деформационная аномалия имеет ве-

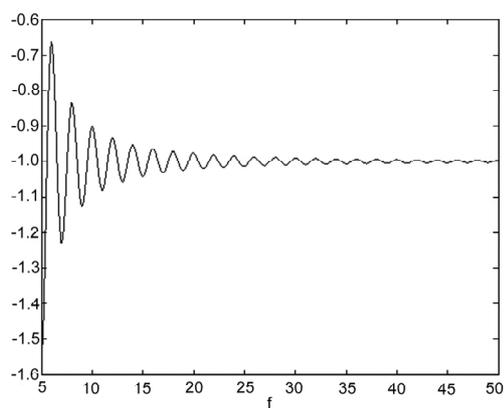


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика маятникового лазерного деформографа с длиной плеча 1000 м в частотном диапазоне 5–50 Гц. По оси ординат отложена относительная амплитуда. По оси абсцисс – частота в Гц.

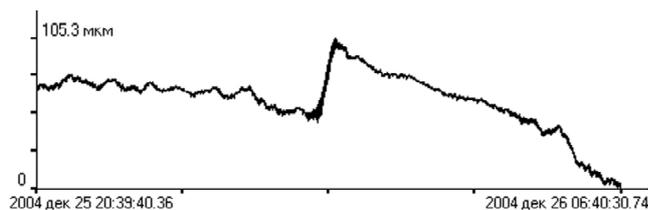


Рис. 7. Запись 52.5-метрового лазерного деформографа 2004 г.

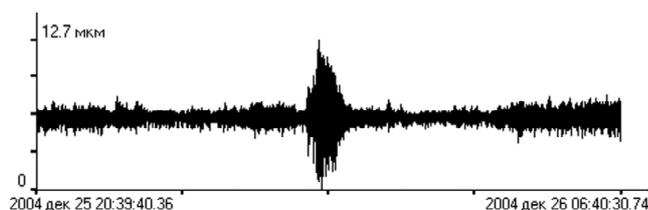


Рис. 8. Отфильтрованная запись 52.5-метрового лазерного деформографа 2004 г.

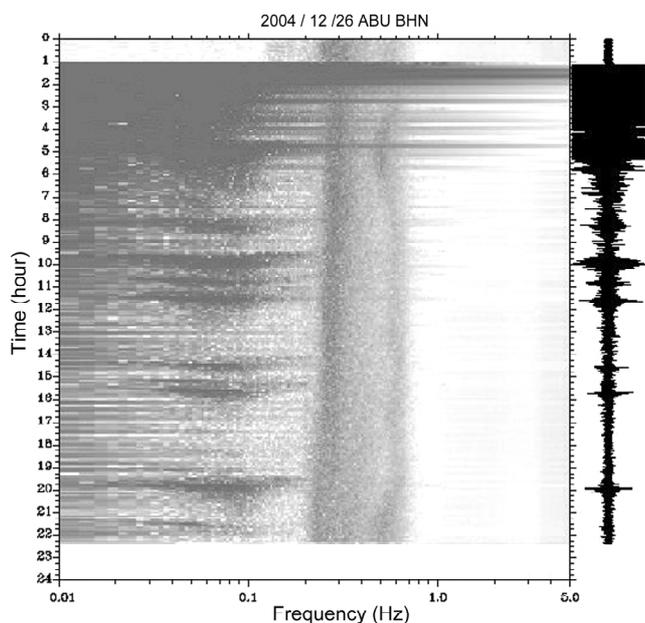


Рис. 9. Запись широкополосного сейсмографа 2004 г.

личину около 59.3 мкм, что составляет деформацию порядка $1.1 \cdot 10^{-6}$, что значительно больше амплитуды полусуточного или суточного прилива, наблюдающегося в месте расположения лазерного деформографа. Судя по направлению деформации, произошло резкое увеличение базы деформографа с медленной последующей релаксацией. По-видимому, аналогичное поведение верхней части земной коры было и в эпицентре землетрясения. Учитывая затухание и дисперсионное соотношение, связывающее скорости волн с их периодами, можно утверждать, что в эпицентре величина аномалии была значительно больше, а скорость нарастания выше. Мы считаем, что деформационная ано-

малия вызвана смещением морского дна, которое и привело к образованию цунами. От места возникновения землетрясения до места расположения деформографа колебания и аномалия, вызванные цунамигенным землетрясением, распространились 19 мин. 54 с. По записи лазерного деформографа можно было бы со 100 % уверенностью предсказать возникновение цунами, если известно, что землетрясение произошло под водной толщей моря или океана. Координаты землетрясения можно определить по записям сейсмостанций, а амплитуду волны цунами – по величине упругой энергии аномалии, величине разрыва и глубине моря над ним. Величину разрыва можно оценить по периодам волн, которые первыми достигли зону расположения лазерного деформографа. При спектральной обработке установлено, что в записи цунамигенного землетрясения период первой волны, достигшей места расположения лазерного деформографа, равен 42.7 с.

На рис. 8 приведена отфильтрованная полосовым фильтром с граничными частотами 1–0.01 Гц запись лазерного деформографа с цунамигенным землетрясением, а на рис. 9 – запись широкополосного сейсмографа японской сейсмостанции, содержащая это же землетрясение. Подобными сейсмографами снабжены практически все сейсмостанции Японии. На рис. 10 – отфильтрованная запись лазерного деформографа тем же фильтром сахалинского нецунамигенного землетрясения. Рис. 8 и 10 имитируют записи широкополосного сейсмографа, который может регистрировать колебания с частотами от 1 до 0.01 Гц. При сравнении всех графиков можно утверждать, что сейсмографами, даже широкополосными, отличить цунамигенное землетрясение от нецунамигенного практически невозможно.

Регистрация взрывов

На юге Приморского края России, недалеко от границы с КНДР, в режиме непрерывного мониторинга вариаций микродеформаций земной коры работает 52.5-метровый лазерный деформограф и трехкомпонентный широкополосный сейсмограф (датчик CMG3-ESPB, регистратор GSR24). Это самая близлежащая мониторинговая геофизическая станция по отношению к месту расположения полигона КНДР, на котором проводятся испытания ядерного оружия. Примерное расстояние от полигона до точки наблюдения равно 230 км. Во время испытания КНДР ядерного оружия 25 мая 2009 г. обе установки выполняли мониторинг и зарегистрировали сигналы, прошедшие от места взрыва. На рис. 11 приведены участки записей лазерного деформографа и трех каналов широкополосного сейсмографа. Верхний график – участок записи лазерного деформографа, вто-

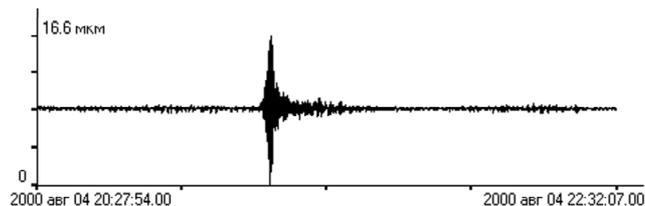


Рис. 10. Отфильтрованная запись 52.5-метрового лазерного деформографа 2000 г.

рой сверху график – участок записи канала “север–юг” широкополосного сейсмографа, третий сверху график – участок записи канала “запад–восток” широкополосного сейсмографа, четвертый сверху график – участок записи вертикального канала. Начало прихода сигнала от места взрыва соответствует 11:55:29,57 местного (владивостокского) времени. При обработке записей лазерного деформографа и широкополосного сейсмографа было установлено, что в спектре сигналов, пришедших от места взрыва, выделяются максимумы на частотах от 7 до 10 Гц.

Регистрация вариаций напряженно-деформационного поля Земли

Опишем общий путь решения задачи прогноза землетрясений по вариациям напряженно-деформационного поля Земли на ее поверхности, измеренным лазерными деформографами. В оценке основное внимание уделим данным процессам при возникновении корового землетрясения с магнитудой $M = 7$ на глубине 20 км. Оценим время накопления энергии будущего землетрясения с магнитудой M по выражению [2, 5–8, 11]:

$$T = 10^{0.5M-2.1} \text{ лет.} \quad (5)$$

Для землетрясения с магнитудой 7 оно составит примерно 25 лет. Для разрушительного или катастрофического землетрясения с магнитудой 8 оно составит примерно 80 лет. Далее запасенную потенциальную энергию будущего землетрясения оценим по формуле [2]:

$$\Delta W = 10^{1.5M+7.18} \text{ Дж.} \quad (6)$$

При $M = 7$ получаем $\Delta W \approx 4.8 \cdot 10^{17}$ Дж.

Для линейного случая при изотропной среде получим для относительной деформации в очаге будущего землетрясения (в максимуме его развития) следующую оценку:

$$\varepsilon = 2.5 \cdot 10^{-4}. \quad (7)$$

В соответствии с (5) считаем, что при $M = 7$ данное значение величина ε достигает за 25 лет. Тогда за единицу времени (1с) скорость изменения относительной деформации ($\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$) в эволюционирующем очаге будущего землетрясения составит:

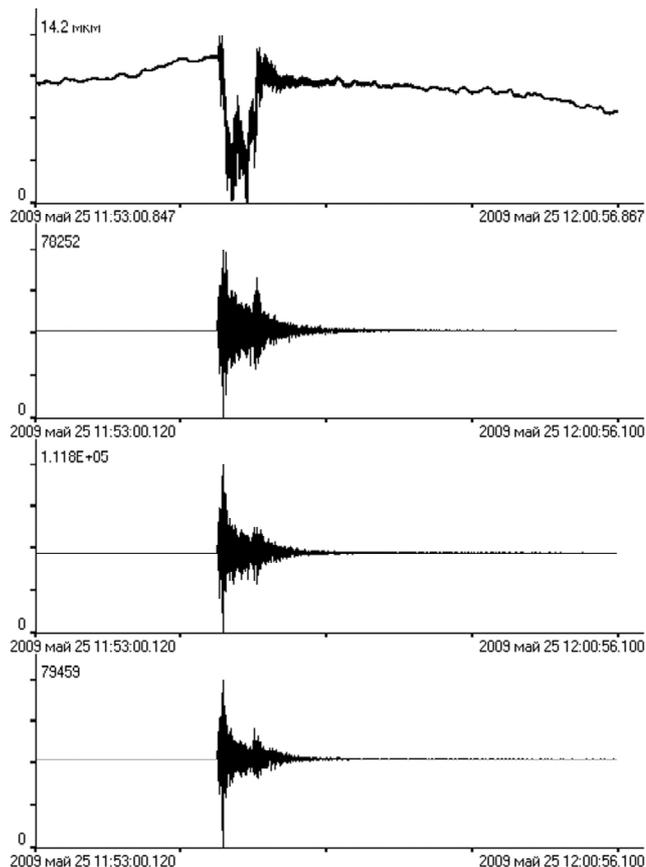


Рис. 11. Записи лазерного деформографа и трех каналов широкополосного сейсмографа.

Верхний график – участок записи лазерного деформографа. Амплитуда – смещение на базе лазерного деформографа (52.5 м). Второй сверху график – участок записи канала “север–юг” широкополосного сейсмографа. Амплитуда в относительных единицах. Третий сверху график – участок записи канала “запад–восток” широкополосного сейсмографа. Амплитуда в относительных единицах. Четвёртый сверху график – участок записи вертикального канала. Амплитуда – в относительных единицах.

$$\dot{\varepsilon} = 3.2 \cdot 10^{-13} \text{ с}^{-1}. \quad (8)$$

Будем считать, что от будущего очага землетрясения энергия спадает по сферическому закону. Тогда на поверхности Земли приведенная скорость изменения относительной деформации $\dot{\varepsilon}_0$ примет следующий оценочный вид:

$$\dot{\varepsilon}_0 = \beta \dot{\varepsilon} / H, \quad (9)$$

где $\beta = 1$ м, а H – расстояние от поверхности Земли до центра очага будущего землетрясения (т.е. до гипоцентра землетрясения) в метрах. При $H = 20$ км имеем:

$$\dot{\varepsilon}_0 = 1.6 \cdot 10^{-17} \text{ с}^{-1}. \quad (10)$$

Относительная деформация ε связана со смещением Δl участка земной коры длиной l известным отношением:

$$\varepsilon = \Delta l / l. \quad (11)$$

Возьмем $l = 100$ м, тогда при $H = 20$ км за 1 с имеем (с учетом $\dot{\Delta l}_0 = l\dot{\varepsilon}_0$):

$$\dot{\Delta l}_0 = 1.6 \cdot 10^{-15} \text{ м/с}. \quad (12)$$

Теоретически применяемые методы интерферометрии в лазерных деформографах позволяют измерять смещение на базе установки с точностью 10^{-6} от ширины интерференционной полосы, равной $\lambda / 2$, где λ – длина волны рабочего лазера. Это дает предельную точность измерения смещения на базе деформографа L , работающего с применением гелий-неонового лазера, равную $\Delta L_{np} = 3.15 \cdot 10^{-13}$ м. Лазерному деформографу необходимо какое-то время (t_{np}) для измерения предельной величины. Оно при $l = 100$ м равно: $t_{np} = \Delta L_{np} / (l\dot{\varepsilon}_0) = 2\Delta L_{np} / (l\dot{\varepsilon}_0) = 1393.8$ с (6 мин. 34 с). Смещение на базе деформографа при проведении непрерывных измерений в течение месяца ($t_n = 30$ дней) составит величину $\Delta l_0 = l\dot{\varepsilon}_0 t_n = 4.15 \cdot 10^{-9}$ м, а при проведении непрерывных измерений в течение года ($t_n = 365$ дней) оно будет равно $5.0 \cdot 10^{-8}$ м, что является легко измеряемыми величинами с помощью хорошего лазерного деформографа.

Мы привели одни оценки энергии и времени подготовки “типичного” землетрясения для “средней” территории Земли. На основании этого можно провести другие вычисления при других оценках энергии и времени подготовки землетрясений. В любом случае конечные выводы не изменятся: применение лазерных деформографов позволяет измерять вариации напряженно-деформационного поля Земли на ее поверхности, вызванные процессами подготовки землетрясений, только время накопления оценочной информации будет меняться в зависимости от исходных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной обзорной статье описаны установки, которые могут составить основу построения аппаратно-программных комплексов геодинимического мониторинга для их постановки в различных регионах Зем-

ли. В первую очередь к ним относятся: 1) широкополосные сейсмографы, 2) GPS/ГЛОНАСС приемники, 3) лазерные деформографы различных вариантов.

Приведены отдельные результаты, полученные на лазерных деформографах, демонстрирующие их возможности по регистрации некоторых процессов инфразвукового диапазона.

Показано, что применение лазерных деформографов позволяет измерять вариации напряженно-деформационного поля Земли на ее поверхности, вызванные процессами подготовки землетрясений. Применение лазерных деформографов в этой области исследования направлено на решение проблемы краткосрочного прогноза землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 55 с.
2. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 217 с.
3. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазеры. Лазерные системы. Владивосток: Дальнаука, 2009. 203 с.
4. Кварцевый деформограф // Каталог геофизической аппаратуры. (Информ. справ.). М.: Наука, 1981. Вып. 4. С. 146–148.
5. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. О зависимости времени подготовки землетрясения от его энергии // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271, № 2. С. 330–333.
6. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Зависимость времени проявления предвестников от силы землетрясения // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285, № 6. С. 1359–1361.
7. Садовский М.А. Исследование карт эпицентров в задачах сейсмического районирования // Докл. АН СССР. 1987. Т. 295, № 3. С. 571–575.
8. Садовский М.А. Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
9. Соловьев С.Л. Сейсмологические донные наблюдения в СССР и за рубежом. М.: Наука, 1986. 118 с.
10. Kasahara J., Toshinori S. Broadband seismic observation in VENUS project // Intern. Workshop Scient. Use Submar. Cables. Japan, Okinawa, 1997. P. 126–130.
11. Tsukuda T. Long Term Seismic Activity. Terrapub, Tokyo, Japan Earthq. Predict., 1985. 193 p.
12. Usher M.J., Burch R.F., Gurlap C. Wide-band feedback seismometers // Phys. Earth Planet. Interiors. 1979. V. 18. P. 38–50.
13. Wielandt E., Steim I.M. A digital very-broad band seismograph // Annales Geophysical. 1986. V. 4. P. 227–232.

Рекомендована к печати Б.В. Левиным

G.I. Dolgikh

Instrumentation-program complexes of geodynamic monitoring

The paper discusses technical features of the instrumentation-program complexes developed from the application of broadband seismographs, GPS/GLONASS-receivers, and laser deformatographs to study the earth stress-deformation field variations which resulted in natural and anthropogenic disasters.

Key words: geodynamic monitoring, broadband seismographs, laser deformatographs.