ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЛЕНГАЦИИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПАСНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМЛИ НА СТАДИИ ИХ ЗАРОЖДЕНИЯ И РАЗВИТИЯ

Г.И. Долгих, С.С. Будрин, С.Г. Долгих, С.Н. Ковалёв, В.В. Овчаренко, А.А. Плотников, В.А. Чупин, В.А. Швец, С.В. Яковенко

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых технологий краткосрочного прогноза опасных гидродинамических процессов Земли (волны цунами, «волны-убийцы» и др.), их идентификации и пеленгации на стадии зарождения и развития имеет колоссальное значение. Катастрофические события последних лет указывают на то, что в настоящее время практически не существует достаточно надёжных методов, с помощью которых можно было бы зарегистрировать возникновение опасных гидродинамических процессов Земли. В качестве показательных моментов можно привести два события, которые связаны с землетрясениями, происшедшими в земной коре под морским дном. 26 декабря 2004 г. произошло мощное землетрясение в Индийском океане. В результате этого землетрясения образовалась цунами, которая унесла жизни более 283 100 человек [1]. При этом не была объявлена тревога в связи с образованием цунами. 13 января 2007 г. в Тихом океане произошло мощное землетрясение. В связи с этим землетрясением на всех Курильских островах и на о-ве Хоккайдо была объявлена тревога цунами. Цунами не было. Оба случая указывают на то, что службы предупреждения, связанные с опасностью возникновения цунами, работают неэффективно и не пригодны для решения поставленных задач. Если в первом случае погибла масса людей и нанесён большой экономический и социально-политический ущерб, то во втором случае нанесён большой экономический ущерб хозяйствующим объектам в зоне, где была объявлена тревога, в связи с прекращением их функционирования и проведением противоцунамиопасных мероприятий, эвакуацией людей из предполагаемых районов затопления.

В 2006–2007 гг. геофизическая служба РАН совместно с МЧС проводит модернизацию существующих служб предупреждения катастрофических событий, связанных в основном с опасностью возникновения разрушительных землетрясений и цунами. На эти виды работ запланировано около 2 млрд руб. При этом за образец взята Японская служба предупреждения. На сейсмостанциях устанавливаются широкополосные сейсмографы, способные проводить регистрацию колебаний и волн с периодом от 0,1 до 100 с. На гидрологических станциях устанавливаются волнографы, уровнемеры и датчики цунами.

На наш взгляд, пример с Японской службы брать нельзя. Результатов у нее практически нет. Единичные случаи прогноза не в счёт. События, описанные выше, указывают на то, что Японская служба не пригодна для служб предупреждения. Единственный её плюс – оперативность распространения информации, т. е. связь со всеми объектами налажена на высочайшем уровне. Применяемое же оборудование, призванное предсказать появление цунами, не отвечает указанным целям и задачам.

Деформационные аномалии, которые вызывают цунами, возникают при различных геодинамических процессах. В основном они связаны с землетрясениями. Сами колебания, которые возникают при землетрясении, не могут вызвать цунами. Они лишь «трясут» дно в частотном диапазоне, соответствующем периодам от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. Деформационные аномалии находятся в крайнем левом частотном диапазоне и не могут быть зарегистрированы любыми, даже широкополосными, сейсмографами. Гидрологические установки, с помощью которых можно зарегистрировать цунами, неэффективны, так как практически всегда расстояние от места регистрации до места выхода цунами на шельф небольшое и времени недостаточно для эффективного проведения противоцунамиопасных мероприятий. Наиболее перспективны для этих целей установки, которые могут зарегистрировать деформационные подвижки, приведшие к возникновению цунами. Это связано с тем, что

скорость распространения деформационной подвижки в упругой среде более чем на порядок больше скорости распространения цунами. Наиболее перспективными для их регистрации и пеленгации являются лазерные деформографы горизонтального и вертикального типов благодаря их основным характеристикам: точность измерения микросмещения земной коры на базе деформографов – 0,1 нм и лучше, частотный диапазон – от 0 до 1000 Гц, динамический диапазон практически неограничен при измерении естественных процессов инфразвукового диапазона [2]. В настоящее время в ТОИ ДВО РАН на морской экспериментальной станции «Мыс Шульца» в режиме непрерывных измерений проводится изучение вариаций уровня деформации земной коры с помощью горизонтального 52,5-метрового лазерного деформографа, обладающего вышеуказанными техническими характеристиками [3].

В статье описана технология пеленгации и идентификации опасных гидродинамических процессов Земли, созданная на основе современных лазерно-интерференционных методов. На примере регистрации цунамигенных и не цунамигенных землетрясений показаны значительные преимущества разрабатываемых технологий над существующими методами и установками, применяемыми в мировых службах предупреждения цунами и других катастрофических процессов.

Береговой лазерный деформограф горизонтального типа

Береговой лазерный деформограф горизонтального типа установлен на МЭС ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца» в подземном гидротермоизолированном помещении в месте с координатами 42,58° N, 131,13° E. Он ориентирован по линии север–юг. Оптическая часть лазерного деформографа построена по принципу неравноплечего интерферометра Майкельсона с использованием в качестве источника света частотно-стабилизированного лазера ЛГН-303 или «Стандарт». Луч лазера распространяется по вакуумному световоду длиной 52,5 м, собранному под землёй из труб, сделанных из нержавеющей стали. Данный лазерный деформограф входит в состав сейсмоакустико-гидрофизического комплекса [4]. В 2006 г. комплекс оснащён GPS-приёмником миллиметровой точности, который установлен вблизи верхнего лабораторного узла вертикального лазерного деформографа (рис. 1).

Комплекс предназначен для изучения закономерностей физики генерации, динамики и трансформации колебаний и волн геосфер звукового и инфразвукового диапазонов. Вся информация с комплекса поступает в лабораторное помещение (рис. 2), где после предварительной обработки (фильтрация + децимация) записывается на твёрдые носители с последующей организацией банка данных. С подключением морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН в сеть ДВО имеется возможность в режиме реального времени из Владивостока управлять работой комплекса, получать экспериментальные данные, обрабатывать и интерпретировать их.

Лазерный деформограф измеряет изменение рабочего плеча интерферометра. При создании лазерных деформографов, лазерных нанобарографов и лазерных измерителей вариаций давления гидросферы за основу был выбран модифицированный интерферометр Майкельсона неравноплечего типа.

Точность измерения смещения базы деформографа Δl определяется в основном двумя вещами: применяемыми методами и стабильностью частоты лазера.

Применяемые методы интерферометрии позволяют измерять смещение базы интерферометра с точностью $10^{-6}\cdot\lambda/2$, где λ – длина волны частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, равная 0,63 мкм. Соответственно, измеряемое смещение в этом случае составляет величину порядка 0,3 нм. Стабильность частоты ($\Delta\nu/\nu$) связана с точностью измерения изменения базы деформографа выражением $\Delta l = L\Delta\nu/\nu$, где L – длина рабочего плеча деформографа, $\Delta\nu/\nu$ – стабильность частоты рабочего лазера [2]. В основном в деформографах, разработанных в ТОИ ДВО РАН, применяются частотно-стабилизированные лазеры, стабилизированные по насыщенному йоду, в которых долговременная стабильность составляет 10^{-11}, кратковременная стабильность при этом равна 10^{-12}, воспроизводимость частоты (от включения к включению прибора) 10^{-11}. С учётом долговременной стабильности лазера точность измерения микроперемещения земной коры на базе установки составит 0,52 нм. При использовании в установке частотно-стабилизированных лазеров с лучшей или худшей стабильностью частоты точность измерения микроперемещения соответственно улучшается или ухудшается. Поскольку кратковременная стабильность частоты на порядок лучше, можно говорить о том, что колебания и волны с периодами до 1 мин мы можем измерять с лучшей на порядок точностью. Долговременная стабильность – стабильность частоты лазера в течение рабочего дня (8 ч). Кратковременная стабильность – стабильность частоты лазера в течение 1 мин. Конечно, при условии, что в месте расположения рабочего

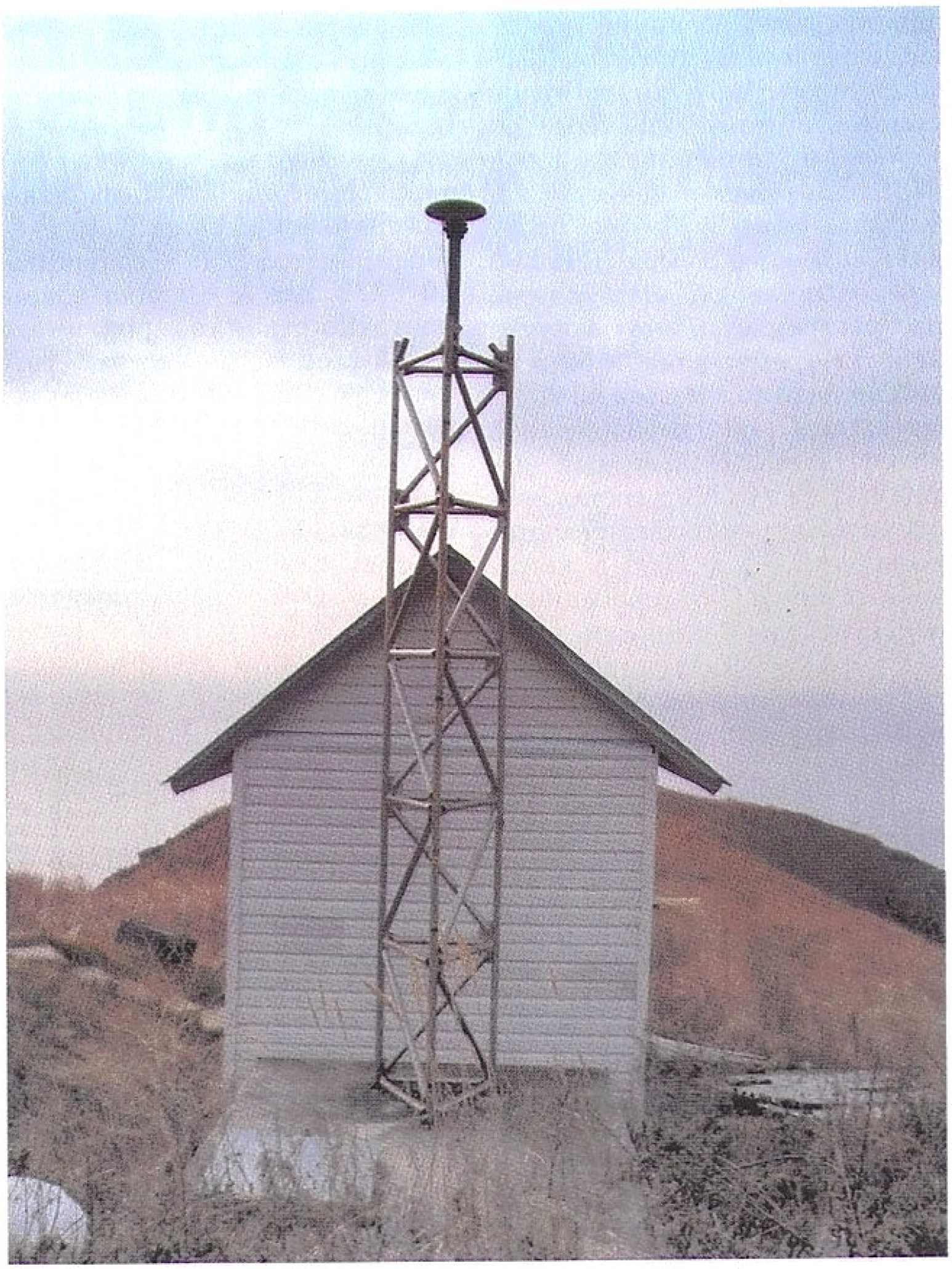

Рис. 1. Наземный лабораторный бокс лазерного деформографа и GPS-антенна

лазера основные метеорологические параметры (температура, влажность, давление) стабильные с большой точностью, паспортные характеристики частотно-стабилизированных лазеров улучшаются. Это влечёт за собой уменьшение ошибок измерения. Амплитудно-частотная характеристика лазерного деформографа линейна в области низких частот начиная с нулевой частоты (условно) [5]. С учётом высокой чувствительности лазерного деформографа и его широкой амплитудно-частотной характеристики можно проводить исследование основных параметров геосфер на уровне фоновых колебаний, что практически невозможно любыми другими установками подобного назначения. Исходя из вышесказанного можно констатировать, что точность измерения микроперемещения базы деформографа составит величину не хуже 0,52 нм. При хорошей стабильности основных метеорологических параметров точность измерения микроперемещения улучшается.

Применяемые методы направлены на измерение изменения расстояния между двумя или несколькими опорными точками по величине набега фазы лазерного излучения между данными опорными точками [2]. Набег фазы определяется по вариациям интенсивности интерференции, образованной рабочим и эталонным лучами интерферометра. Максимальная величина вариации интенсивности интерференционной картины переходит от одного максимума интерференции к другому. Затем эта вариация может только периодически повторяться. То есть максимальное измеряемое изменение фазы определяется расстоянием между ближайшими максимумами интерференционной картины, которое равно 0,315 мкм. Таким образом, если проводить измерение изменения интенсивности интерференционной картины «внутри», т. е. от максимума к максимуму, то можно подсчитать динамический диапазон установки с учётом максимальной измеряемой величины (0,315 мкм) и минимальной измеряемой величины (0,52 нм). Динамический диапазон при этом составил бы 55 дБ. Система регистрации лазерно-интерференционных систем построена таким образом, что она не только проводит измерение изменения интенсивности интерференционной картины «внутри», т. е. от максимума к максимуму интерференции, но и считает количество прошедших интервалов интерференции. Размер интервала определён расстоянием от максимума к максимуму, т. е. 0,315 мкм. Таким образом, измеряемая величина определяется суммой интервалов интерференционной картины (шаг интерференции) и смещением внутри одного интервала. Отсюда следует, что максимальная измеряемая величина смещения ограничена только быстродействием счётчиков, которые должны под-

считать данные интервалы. Что касается естественных процессов, быстродействие современных счётчиков достаточно, чтобы измерить любые максимальные смещения в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц. При этом мы значительно расширяем динамический диапазон установки, который не ограничен «сверху» (измерение максимально возможного смещения) и ограничен «снизу» (точность измерения перемещения). В настоящее время системы регистрации наших лазерно-интерференционных установок созданы на основе современных микропроцессорных технологий и представляют собой программно-аппаратные комплексы, состоящие из блоков «зашитых» в микропроцессоры программных модулей и сопутствующих электронных систем, функции которых невозможно заменить программами.

Таким образом, можно констатировать, что 52,5-метровый лазерный деформограф обладает следующими характеристиками: точность измерения перемещения участка земной коры – 0,52 нм, частотный диапазон – 0–1000 Гц, динамический диапазон при измерении естественных процессов инфразвукового диапазона практически не ограничен (из-за отсутствия ограничения «сверху»).

Рис. 2. Основной лабораторный корпус

Регистрация цунамигенных и не цунамигенных землетрясений

Лазерный деформограф горизонтального типа был запущен в режим непрерывных измерений вариаций уровня микродеформаций земной коры летом 2000 г. С этого момента получен большой объём данных широкого диапазона частот искусственного и естественного происхождения. В настоящем разделе мы уделим внимание отличительным характеристикам цунамигенных и не цунамигенных землетрясений. Общий вид записи любых землетрясений отличается от искусственных сигналов импульсного характера (взрывов и т. п.). Отличия прослеживаются и при анализе динамических спектрограмм землетрясений и взрывов. Частоты, присутствующие в спектрах землетрясений и взрывов, определяются размером разрыва в гипоцентре землетрясений и зоной локализации взрывов. В качестве характерного примера записи лазерного деформографа, содержащего колебания, вызванные взрывом, на рис. 3 приведена запись сигналов при взрыве 2004 г. в КНДР. Там же приведена динамическая спектрограмма.

Для сравнения на рис. 4 приведена запись сигналов при Сахалинском землетрясении 2000 г. с её динамической спектрограммой.

В дальнейшем мы уделим основное внимание записям лазерного деформографа, содержащим цунамигенные и не цунамигенные землетрясения, которые произошли в океанической коре. Дополнительно проанализируем сигналы от землетрясений, происшедших в континентальной земной коре.

Как отмечалось выше, 26 декабря 2004 г. в Индийском океане произошло мощное землетрясение, которое привело к образованию цунами. При обработке записи 52,5-метрового лазерного деформографа, полученной в декабре 2004 г., была обнаружена деформационная аномалия, связанная с данным цунамигенным землетрясением. На рис. 5 приведена запись лазерного деформографа, содержащая колебания и деформационную аномалию, которые вызваны цунамигенным землетрясением, происшедшим в 00:58:53 в месте с координатами 330° N, 95,87° E. На этом же рисунке дана динамическая спектрограмма. На рис. 6 приведён участок записи большего масштаба, на котором видно начало деформационной аномалии. Судя по записи лазерного деформографа, произошло землетрясение, а затем возникла деформационная аномалия. На базе 52,5-метрового лазерного деформографа деформационная аномалия имеет величину около 59,3 мкм, что составляет деформацию порядка $1{,}1\times10^{-6}$, т. е.

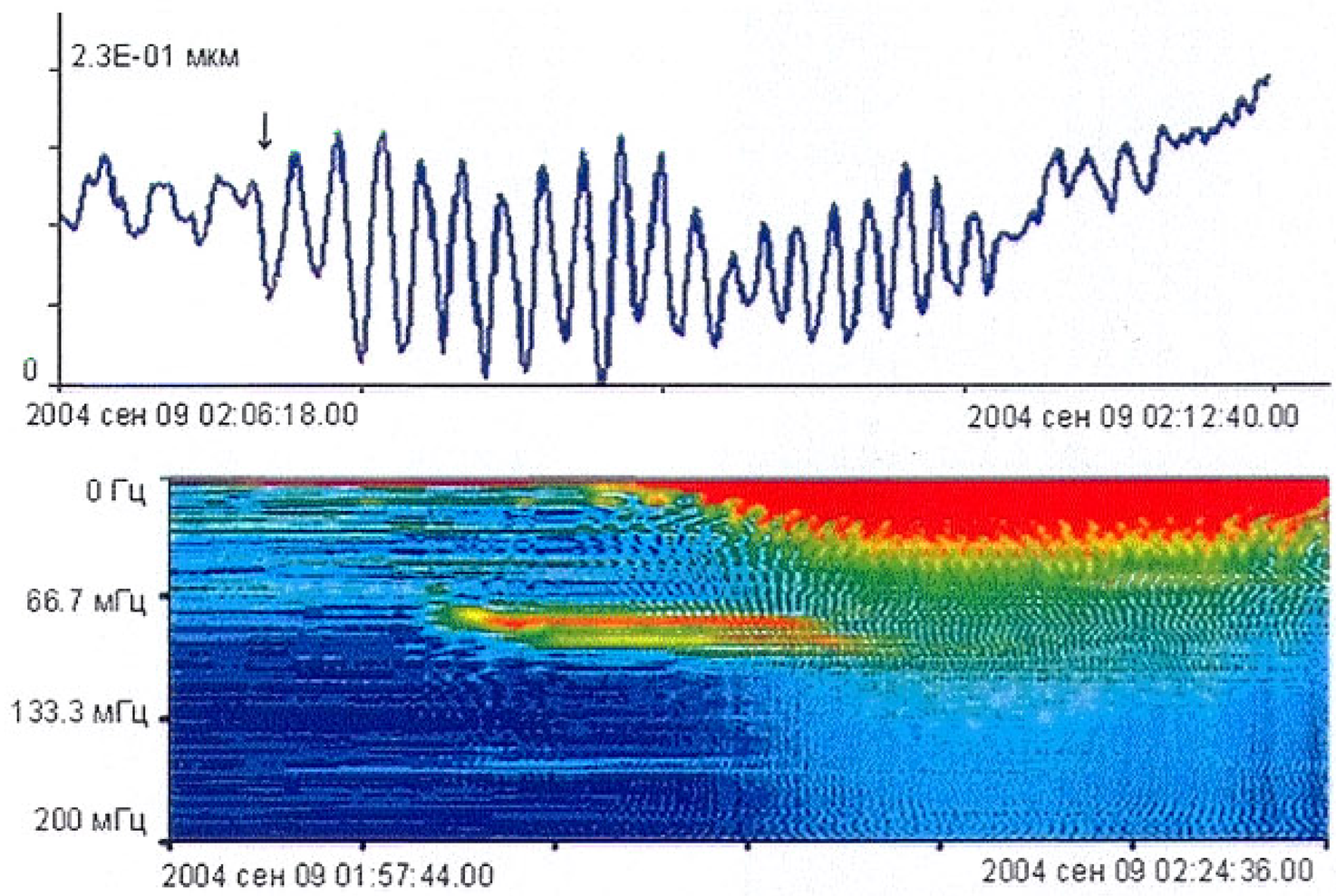

Рис. 3. Запись лазерного деформографа и её спектрограмма, взрыв в КНДР

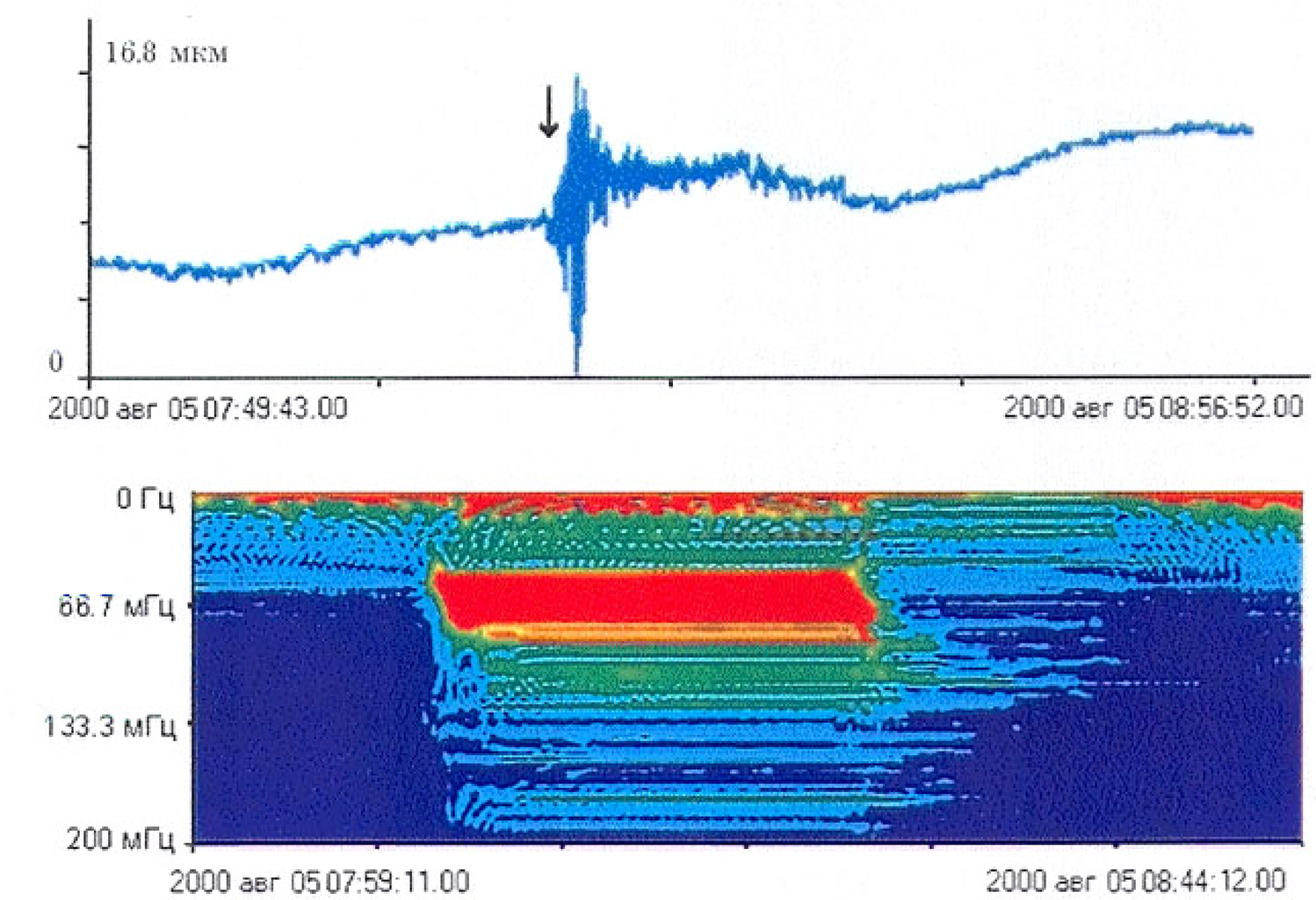

Рис. 4. Запись лазерного деформографа и её спектрограмма. Сахалинское землетрясение

значительно больше амплитуды полусуточного или суточного прилива, наблюдающегося в месте расположения лазерного деформографа [2]. 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. От места возникновения землетрясения до места расположения деформографа колебания и аномалия, вызванные цунамигенным землетрясением, распространялись 19 мин 54 с. Деформационная аномалия привела к образованию цунами, а не колебания, вызванные землетрясением. По записи лазерного деформографа можно было бы со 100-процентной 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 зоны 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. 7 приведена отфильтрованная полосовым фильтром с граничными частотами 1–0,01 Гц запись лазерного деформографа с цунамигенным землетрясением, а на рис. 8 – запись широкополосного сейсмографа, содержащая это же землетрясение [6]. Подобным сейсмографами снабжены практически все сейсмостанции Японии. На рис. 9 – отфильтрованная тем же фильтром запись лазерного деформографа Сахалинского не цунамигенного землетрясения.

Рис. 7 и 9 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 не цунамигенного практически невозможно. Учитывая, что волна цунами достигла ближайшего побережья через 2 ч после землетрясения, из

вышесказанного следует, что только по записи одного деформографа можно было бы предсказать появление волны цунами и спасти людей при организации соответствующей службы оповещения. Точные координаты любых событий можно определить по данным трёхкоординатного деформографа. Создание нескольких таких деформографов, пространственно распределённых по поверхности Земли, позволит решить задачу пеленгации и идентификации различных событий катастрофического характера и их предвестников.

События 13 января 2007 г. подтвердили вышесказанное. В Тихом океане вблизи Японии и Курильских островов в месте с координатами 46,25° N, 154,46° E произошло землетрясение с магнитудой 8,2 [7]. На о-ве Хоккайдо и всех Курильских островах была объявлена тревога цунами. Цунами не было. На рис. 10 приведена запись 52,5-метрового лазерного деформографа, на которой зарегистрированы колебания, вызванные данным землетрясением. Там же помещена динамическая спектрограмма. Начало землетрясения отмечено стрелкой. На рис. 11 приведён участок записи лазерного деформографа большего масштаба, на котором стрелкой отмечено начало прихода волн от землетрясения.

Землетрясение произошло в 04 ч 23 мин 19,4 с гринвичского времени, а волны от него были зарегистрированы лазерным деформографом в 04 ч 31 мин 07 с (гринвичское время). То есть сигналы от землетрясения до деформографа прошли за время равное 467,6 с (7 мин 46,6 с). Расстояние от эпицентра землетрясения до места расположения деформографа равно 1895 км. С учётом времени распространения колебаний от эпицентра до деформографа можно утверждать, что скорость их распространения примерно равна 4,053 км/с. Что следует основного из анализа записей лазерного деформографа 13 января 2007 г.? Никаких резких изменений в характере записи лазерного деформографа ни до землетрясения, ни после его начала не произошло. Это указывает на то, что данное землетрясение не вызвало подвижек морского дна, которые могли бы привести к цунами. Следовательно, при анализе записи лазерного деформографа можно было бы с большой уверенностью утверждать, что данное землетрясение не приведёт к образованию цунами. Далее

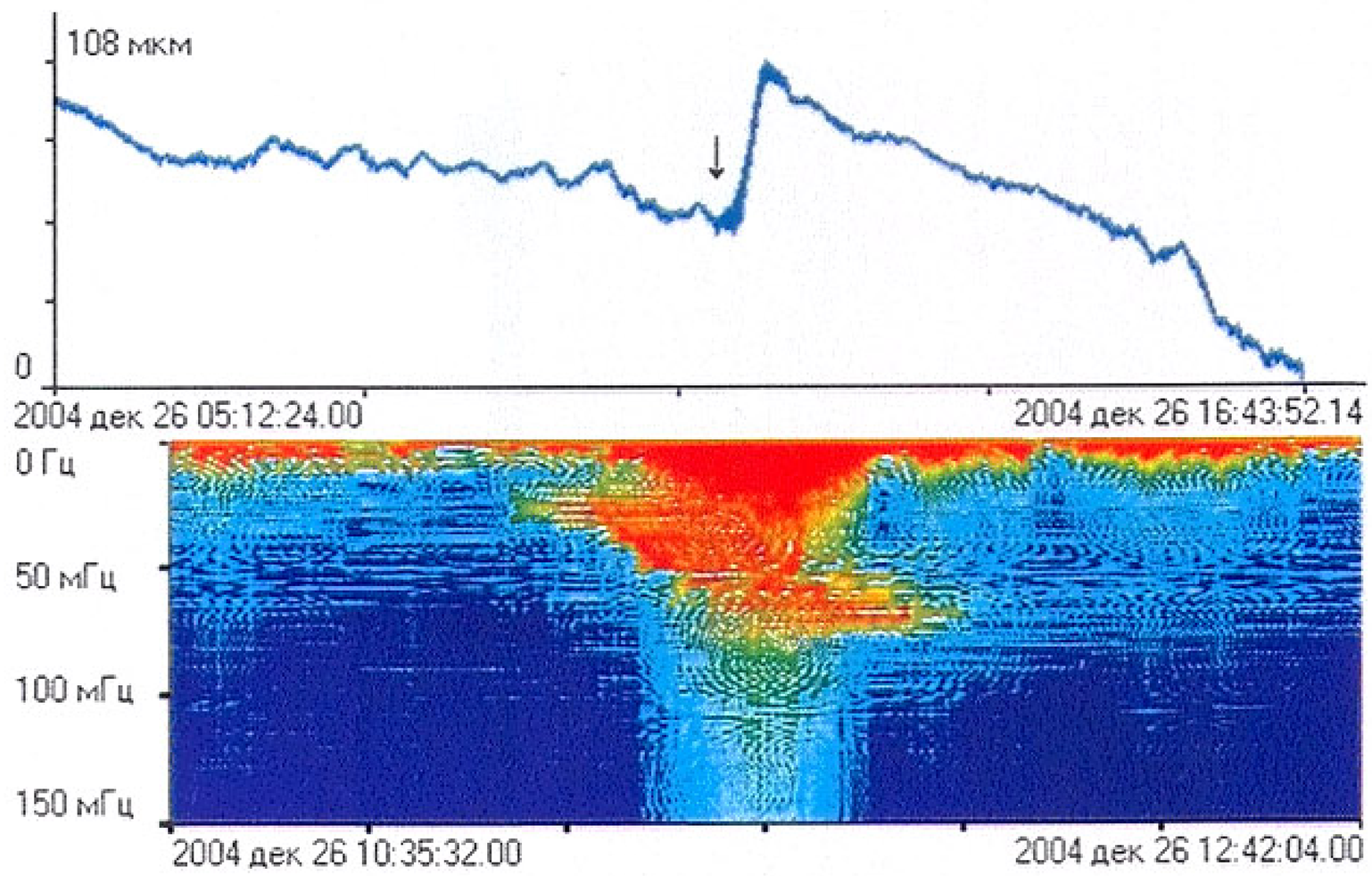

Рис. 5. Запись лазерного деформографа с деформационной аномалией. Спектрограмма. Начало землетрясения отмечено стрелкой

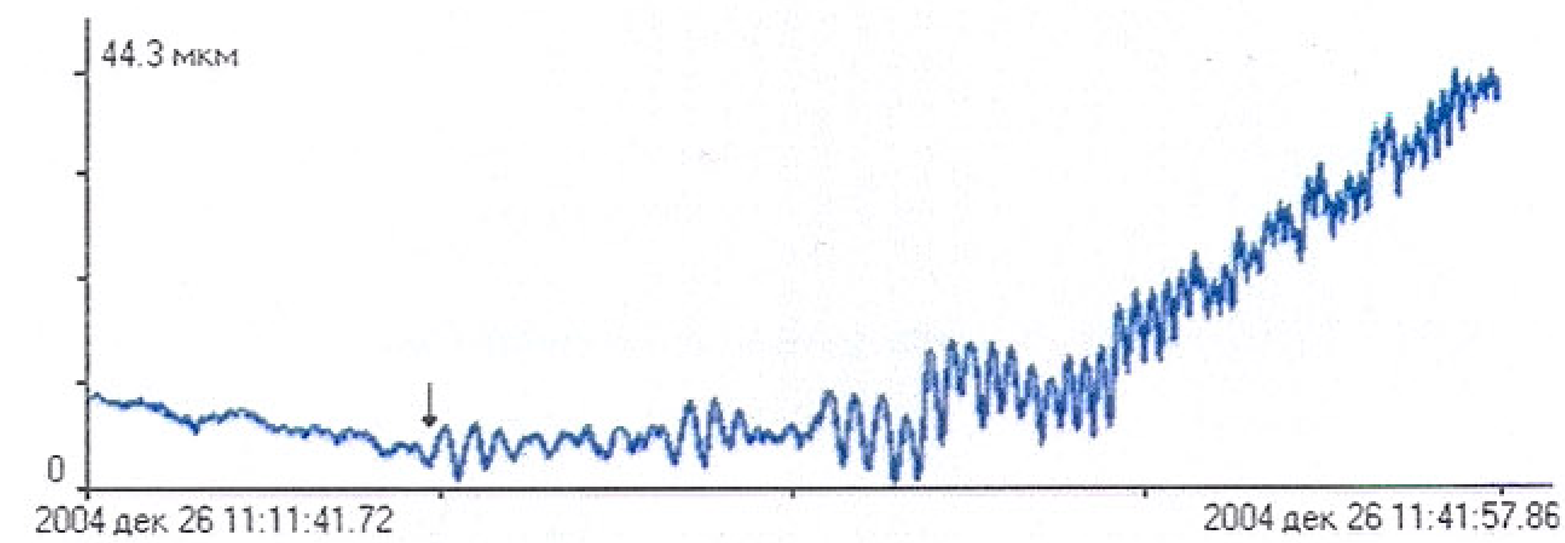

Рис. 6. Запись лазерного деформографа большего масштаба с деформационной аномалией. Начало землетрясения отмечено стрелкой

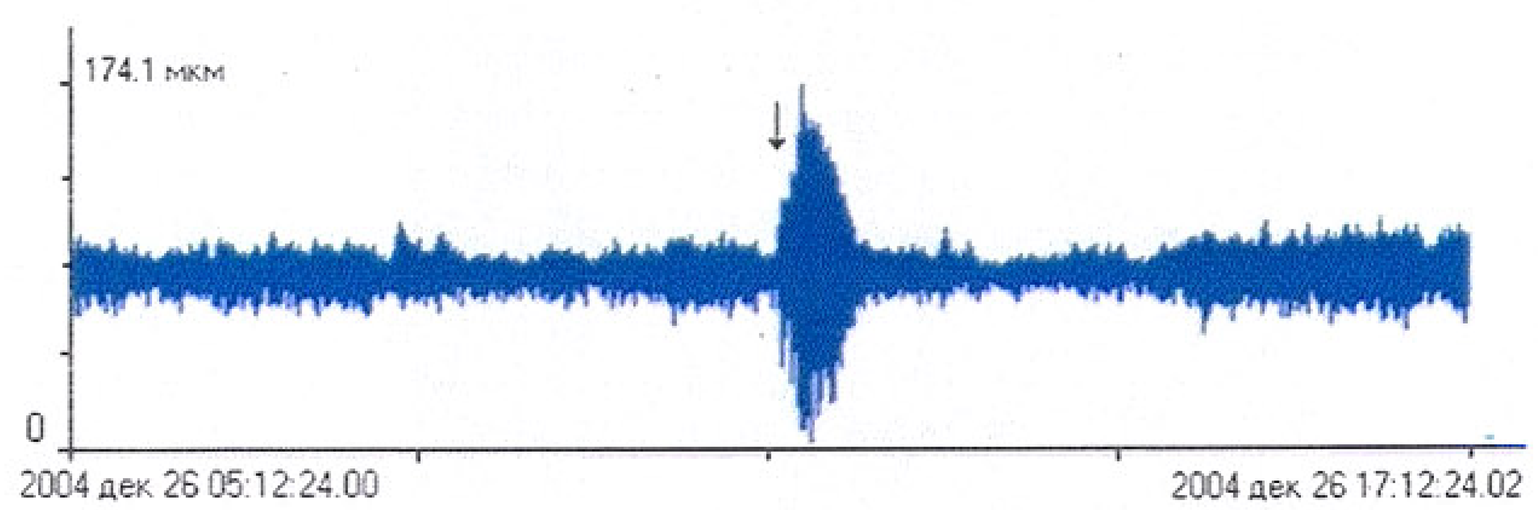

Рис. 7. Отфильтрованная запись лазерного деформографа цунамигенного землетрясения полосовым фильтром (100–0,1 с)

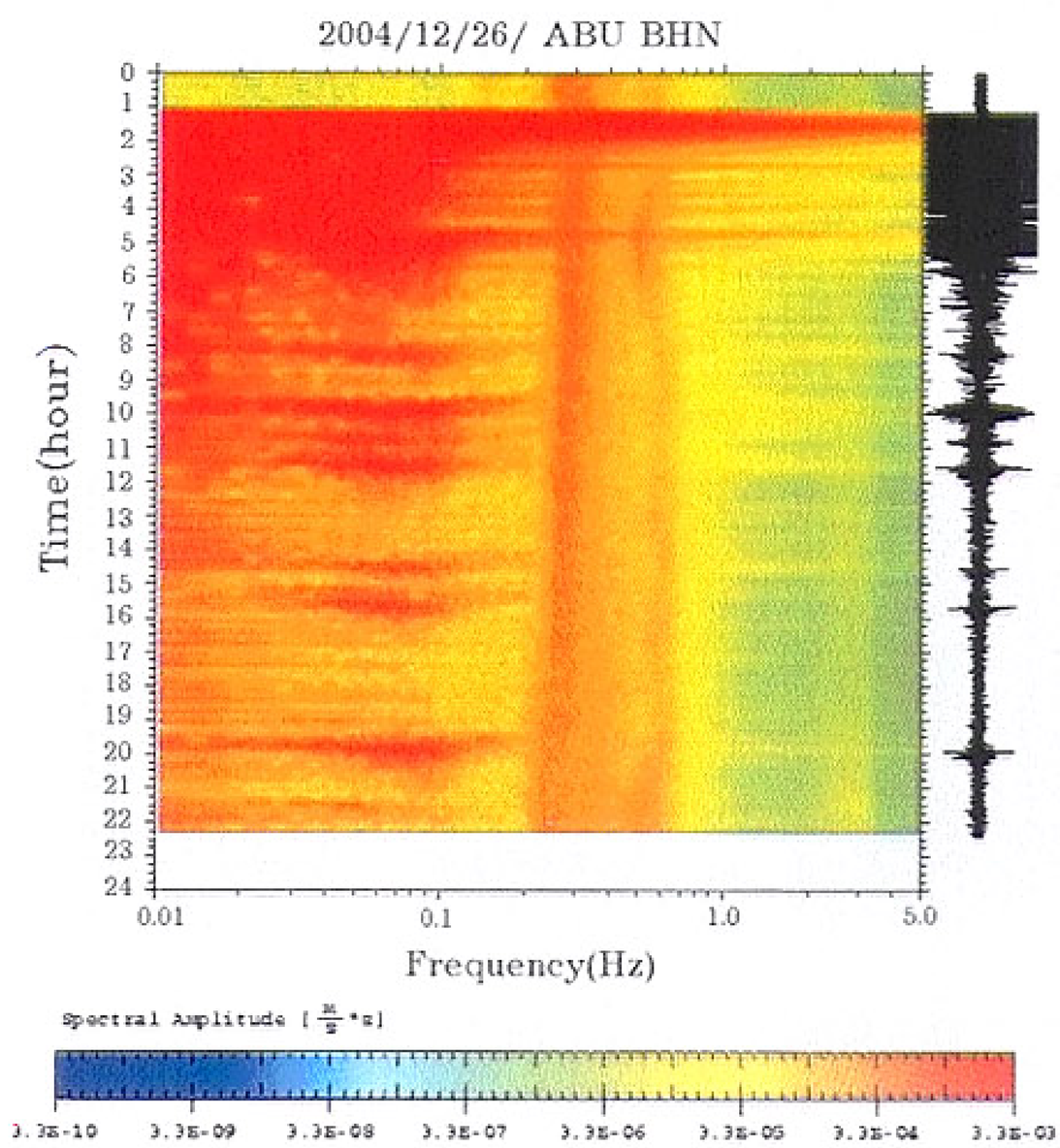

Рис. 8
Спектрограмма и запись широкополосного сейсмографа, установленного на одной из сейсмостанций Японии

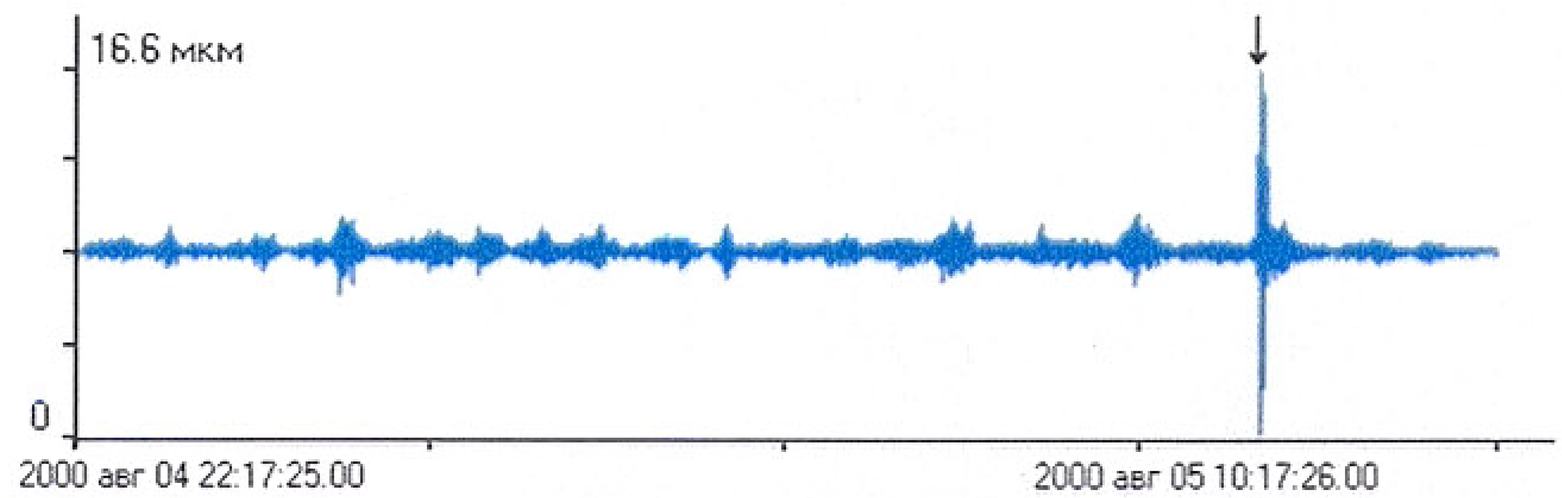

Рис. 9. Отфильтрованная полосовым фильтром (100–0,1 с) запись лазерного деформографа Сахалинского землетрясения

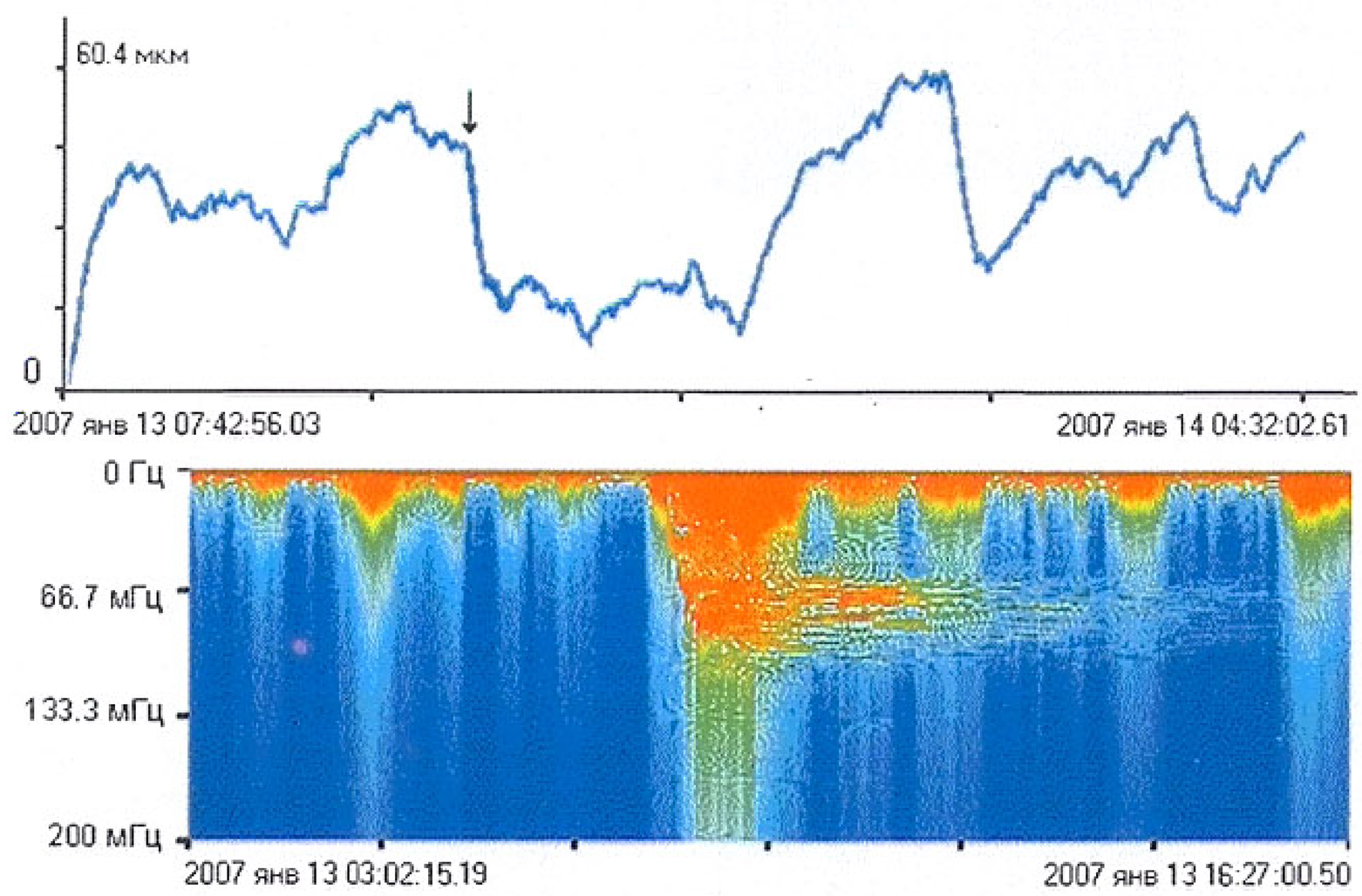

Рис. 10 . Запись лазерного деформографа. Начало землетрясения отмечено стрелкой

проанализируем ответ на следующий вопрос: можно было бы по данным только деформографа предупредить население о-ва Хоккайдо и Курильских островов, что будет цунами, если бы возникла деформационная подвижка? Землетрясение произошло в месте, где глубина моря составляет 3800 м. Подвижка морского дна привела бы к образованию цунами, скорость распространения которой составляла бы примерно 0,2 км/с ($c^2 = gH$, где c – скорость, g – ускорение свободного падения, H – глубина моря). Она смогла бы достичь о-ва Итуруп примерно за 36,3 мин, о-ва Хоккайдо и о-ва Кунашир – позднее, а п-ова Камчатка – примерно за 45,4 мин. Лазерный деформограф зарегистрировал сигналы от землетрясения примерно через 8 мин после его начала. Из простого сравнения времён распространения цунами до ближайшего побережья и колебаний от землетрясения до деформографа можно утверждать, что только по одной записи лазерного деформографа можно было бы сделать вывод о цунамиопасности происшедшего землетрясения и объявить, при необходимости, тревогу. Для этого необходимо, чтобы экспериментальные данные лазерного деформографа анализировались в режиме реального времени соответствующими службами.

Конечно, оперативность этой информации возрастает при расположении деформографов подобного типа на близлежащих от землетрясений побережьях. По записи широкополосного сейсмографа Японской службы, приведённой на рис. 12, нельзя судить об опасности возникновения цунами.

52,5-метровый лазерный деформограф является деформографом горизонтального типа и ориентирован по линии север–юг. С указанной выше точностью он измеряет изменение

горизонтальных смещений по данной линии. Вертикальные смещения и смещения по линии запад–восток он измеряет значительно хуже [7], хотя, как показывают экспериментальные исследования, этой чувствительности достаточно для любых сигналов, генерируемых землетрясениями. Для уверенной регистрации смещений любых направлений и возможной пеленгации их источников необходимо использование трёхкоординатных лазерных деформографов. В настоящее время на морской экспериментальной станции ТОИ ДВО РАН «Мыс Шульца» проводятся работы по вводу в режим непрерывных измерений вертикального 3,5-метрового лазерного деформографа и 17,5-метрового горизонтального лазерного деформографа, ориентированного по линии запад–восток. Вместе с 52,5-метровым лазерным деформографом они образуют систему трёхкоординатного лазерного деформографа.

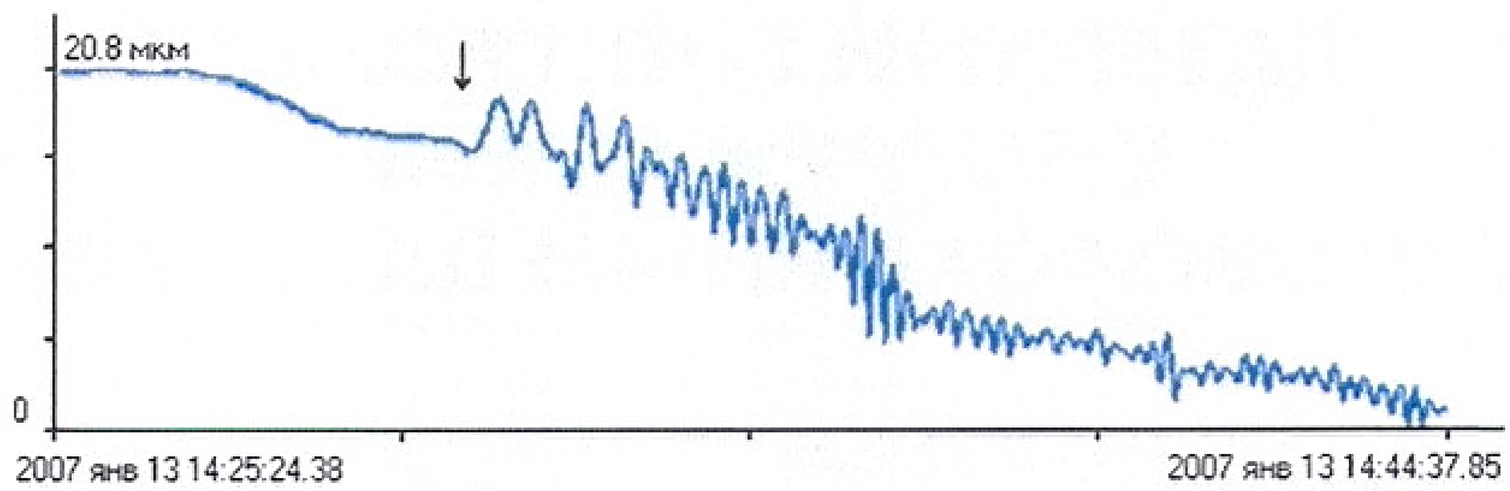

Рис. 11. Запись лазерного деформографа большего масштаба. Начало землетрясения отмечено стрелкой

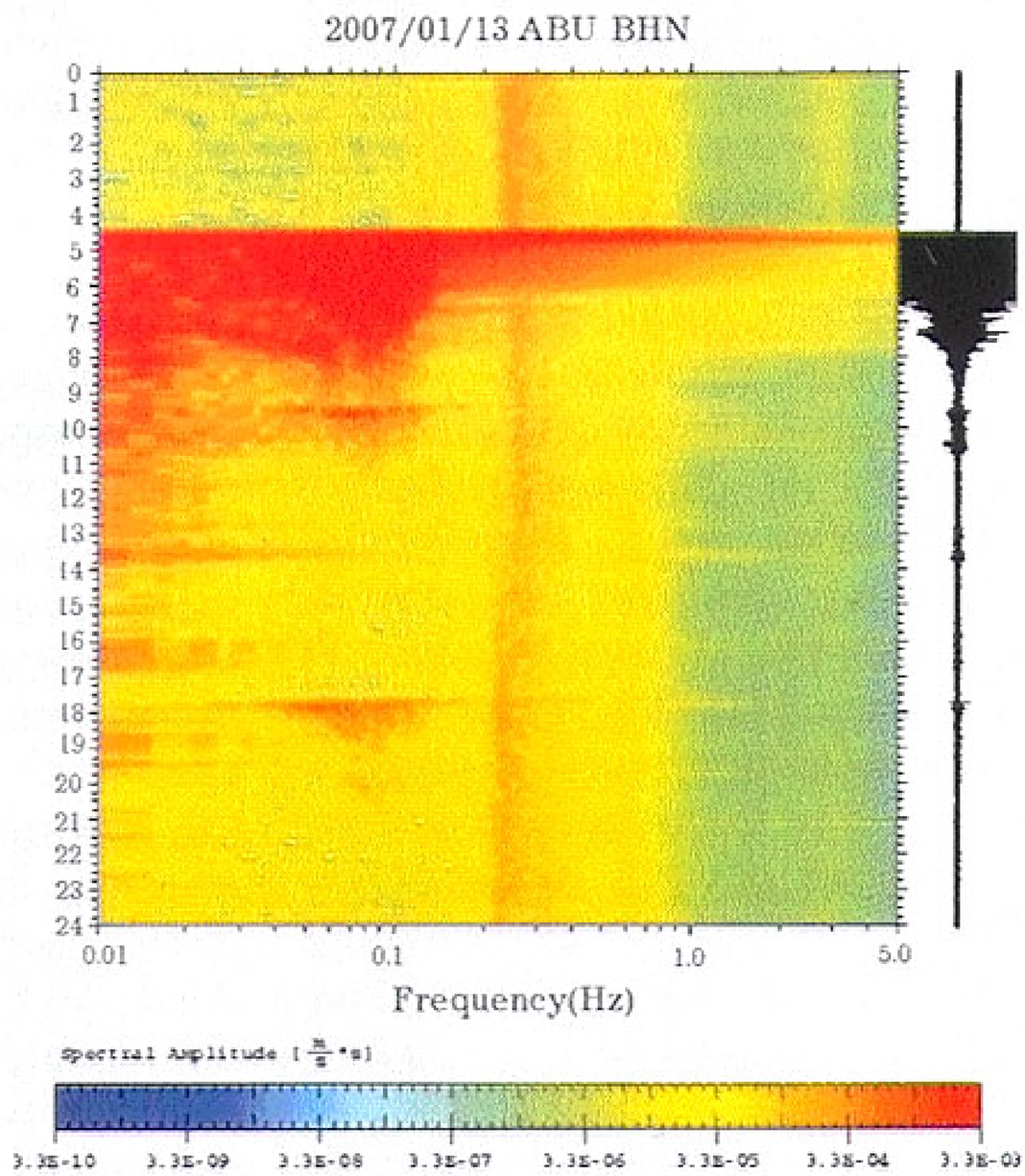

Рис. 12 Спектрограмма и запись широкополосного японского сейсмографа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере регистрации сигналов от цунамигенных и не цунамигенных землетрясений обосновывается необходимость создания технологии пеленгации и идентификации опасных гидродинамических процессов Земли на основе применения современных лазерно-интерференционных методов.

Показано, что наиболее эффективным методом пеленгации и идентификации опасных гидродинамических процессов Земли является деформационный метод, основанный на использовании трёхкоординатных лазерных деформографов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 06-05-64448-а, № 06-05-96040-р-восток-а, № 06-05-08043-офи, № 06-05-96916-р-офи), ДВО (1, 2 и 3-й разделы конкурса «ДВО-2007»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт геофизической службы РАН www.ceme.gsras.ru.

2. Долгих Г.И. Исследование волновых полей океана и литосферы лазерно-интерференционными методами. Владивосток: Дальнаука, 2000. 160 с.

3. Долгих Г.И., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв 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.

4. Долгих Г.И., Батюшин Г.Н., Валентин Д.И., Долгих С.Г., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В., Яковенко С.В. Сейсмоакустико-гидрофизический комплекс для мониторинга системы «атмосфера–гидросфера–литосфера» // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 3. С. 120–122.

5. Долгих Г.И. Лазерно-интерференционный комплекс // Сейсмические приборы. 2003. Вып. 39. С. 13–27.

6. http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/waveform/prev.html

7. Долгих Г.И., Ковалёв С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.