

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
А В Т О М Е Т Р И Я

2003, том 39, № 5

УДК 550.839

Л. Р. Ярошевич, З. Краевски, Л. Соляж  
(Варшава, Польша)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО  
ИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ  
СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ВРАЩЕНИЯ\*

Предложены и обсуждены области применения световолоконных интерферометров Саньяка. Поскольку такие системы реагируют на абсолютные вращательные движения в плоскости петли интерферометра, открываются возможности их использования для детектирования подобных явлений. С точки зрения сейсмологов таковыми могут считаться сейсмические вращательные волны. Информация о них в большинстве случаев извлекается из зарегистрированных сейсмических сигналов. Эту скрытую информацию со всеми сопутствующими искажениями получают из разности показаний двух включенных антипараллельно маятниковых сейсмометров (систем ДАМС). Предложенная волоконно-оптическая вращательная система (ВОВС) лишена этих недостатков и может быть применена как для калибровки подобных систем, так и детектирования вращательных сейсмических волн. Представлена конструкция системы ВОВС, основанная на хорошо известном принципе оптического гироскопа с оптимизацией на детектирование только чисто вращательных движений. Рассмотрены также возможности ее использования для уточнения работы систем ДАМС. Полученные результаты были использованы для уточнения работы систем ДАМС путем сглаживания данных с помощью сплайнов. Более того, первые применения системы показали, что вероятность появления вращательных волн возможна только при сильных землетрясениях.

**Введение.** Основной целью изучения сейсмических волн является предсказание землетрясений. Регистрация именно этих волн в сравнении с другими физическими явлениями, связанными с землетрясениями, позволяет более точно предсказывать это грозное явление [1], потому что, во-первых, регистрация сейсмических волн может быть осуществлена с высокой точностью и разрешением (эти волны в сравнении со всеми другими сопутствующими волнами имеют наименьшую длину), во-вторых, они менее подвержены искажениям и затуханию при прохождении сквозь толщу земной поверхности.

Существуют три типа сейсмических волн. Волны, распространяющиеся внутри грунта, называются объемными сейсмическими волнами (С- и П-волны). С-волны – это волны сжатия–растяжения или продольные; П-вол-

\* Работа выполнена при поддержке Польского министерства научных исследований и информационных технологий (MUT) (грант № PBS-636).

ны – это поперечные или сдвиговые волны. Для С-волн характерно движение частиц грунта параллельно направлению распространения волны, а для П-волн движение частиц перпендикулярно направлению распространения волны. У П-волны существует два направления поляризации: горизонтальная (ПГ) и вертикальная (ПВ). В первом случае частицы движутся параллельно поверхности грунта, а во втором – по нормали к ней. И, наконец, волны, распространяющиеся по свободной поверхности упругого тела, называются рэлеевскими или поверхностными волнами.

Классические сейсмографы регистрируют только прямолинейные смещения частиц грунта. В реальных ситуациях кроме линейного смещения имеют место вращательные движения, которые могут возникать вследствие как землетрясений, так и взаимодействия сейсмических волн с микроморфическими неоднородностями земных структур [2–4]. Недавно такие события, как следствие неидеальности упругих свойств среды, связанных с дефектами строения (несимметричные дислокации) [5] или дефектами внутренней структуры (микроморфические или микрополярные дефекты) [6, 7], были зафиксированы и названы сейсмическими вращательными волнами (СВВ). Интерес к этим волнам связан с той полезной сейсмической информацией, которую они несут. Например, они позволяют определить точное время прибытия ПГ-волн, потому что вращательная компонента (вокруг вертикальной оси) чувствительна именно к ПГ-волнам. Вертикальные, гетерогенные, изотропные, классические среды можно в первом приближении считать адекватной моделью внутреннего строения Земли, тогда запись вращательной компоненты вокруг вертикальной оси должна обязательно дать ПГ-волну [8].

Для регистрации СВВ необходимы принципиально новые методы измерения, так как существующие инерциальные сейсмографы реагируют только на прямолинейное движение [9,10]. В связи с этим были предложены сейсмометры нового типа, состоящие из двух включенных антипараллельно маятниковых сейсмометров (ДАМС) [7] или сейсмометров в виде подвешенной катушки [11]. В зависимости от конструкции они могут регистрировать либо дисторсии (пространственные производные смещений), либо компоненты вращений. К сожалению, моделирование [12] показало, что вращательные движения очень малы в сравнении с поступательными, поэтому чрезвычайно высокая чувствительность этих сейсмометров к поступательным перемещениям может привести к ограничениям в точности оценок вращательной компоненты. Более того, возникает еще серьезная проблема их калибровки, так как используемая конструкция состоит по существу из двух независимых устройств, и вращательная компонента получается косвенным путем как разность их показаний [13, 14].

В связи с этим предложение использовать для этих целей эффект Саньяка является очень привлекательным [15]. Основное преимущество таких систем состоит в том, что они реагируют только на вращательное движение вокруг оси, перпендикулярной к плоскости катушки из оптического волокна, и не реагируют на любые линейные движения или смещения [16]. Сравнение стандартных сейсмограмм и показаний кольцевого лазера при детектировании вращательных движений выявило определенные преимущества последнего [17], главное из которых состоит в чрезвычайно высокой чувствительности [18]. Однако такие кольцевые лазеры очень дороги и к тому же не мобильны. С учетом этого в данной работе представлен относительно дешевый вариант вращательного датчика на основе волоконно-оптической техники,

который по существу является аналогом хорошо известного классического волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) [19]. В отличие от классических предложенная система оптимизирована специально для регистрации вращательного движения без представления информации об угловых смещениях [20]. Компактность системы делает ее мобильной. Таким образом, основная цель данной работы – описание конструкции волоконно-оптического сейсмометра, предназначенного для калибровки ДАМС-систем и детектирования СВВ. Представлена новая методика калибровки ДАМС-систем и некоторые результаты, подтверждающие существование вращательной части сейсмических волн.

**1. Основные принципы работы систем ДАМС.** На рис. 1 представлена система из двух антипараллельных маятниковых сейсмографов, установленных вдоль общей оси, соединенных параллельно, но противоположно ориентированных [21]. В случае когда колебания почвы (грунта) содержат поступательное и вращательное движения, данные, записанные каждым из сейсмографов, содержат как компоненту смещения  $\pm w$ , так и вращательную компоненту  $\alpha$ , умноженную на длину маятника  $l$ , [13]:

$$u(t)_i = \pm w(t) + l\alpha(t), \quad (1)$$

где «+» для  $i = R$  (правый сейсмограф), «-» для  $i = L$  (левый сейсмограф).

Если сейсмографы идентичны, то вращательная компонента  $\alpha(t)$  может быть получена как сумма двух записанных сейсмограмм  $u_L$  и  $u_R$ :

$$\alpha(t) = [u(t)_R + u(t)_L] / l. \quad (2)$$

Как видно, система ДАМС предполагает обязательную идентичность характеристик используемых сейсмографов. Это связано с тем, что вращательные движения могут быть очень малы и сейсмографы с различными характеристиками сильно исказят результаты. Этот аспект должен быть очень тщательно исследован как в лабораторных условиях (калибровочные работы), так и на сейсмических станциях (с учетом влияния возможных городских шумов).

**2. Конструкция световолоконного оптического вращательного сейсмометра.** Как уже упоминалось ранее, для целей детектирования вращательных сейсмических движений необходима специальная конструкция интер-

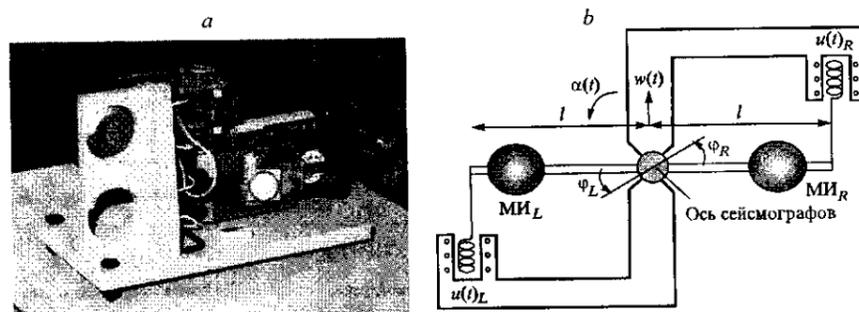


Рис. 1. Система ДАМС: общий вид (а); функциональная схема системы (б): МИ – момент инерции;  $\varphi$  – повороты сейсмографа; индексы  $L, R$  – левый и правый сейсмографы;  $u(t)_L, u(t)_R$  – сигналы левого и правого сейсмометров

ферометра Саньяка и новая система обработки получаемых сигналов. Главное требование, которому должна отвечать оптическая часть, – это максимальная чувствительность (в диапазоне от  $10^{-8}$  до  $10^{-10}$  рад/с), поэтому сенсорная петля должна содержать большое количество витков, намотанных на каркас, с возможным максимальным радиусом; кроме того, источник света должен иметь достаточно высокую мощность. Главные требования при конструировании системы обработки сигналов – совместимость со стандартным записывающим сейсмографом KST, необходимая полоса частот и соответствующий блок квантования сигнала. Эти требования определяют основные отличия волоконно-оптического сейсмографа от волоконно-оптического интерферометра Саньяка (ВОИС) и волоконно-оптического гироскопа. Созданная система BOBC-1 показана на рис. 2, а. В ней используется источник света мощностью 1 мВт с длиной волны  $\lambda = 1300$  нм и радиусом сенсорной петли  $R = 0,1$  м, содержащей 400 м световолоконного кабеля типа PANDA. Блок фотодетектирования на основе микросхемы типа 7260 (EG&G) реализует синхронное детектирование, используя фазовый модулятор света с частотой 147,7 кГц. С учетом оптических потерь 30 дБ рассчитанная чувствительность системы, определяемая шумами, составила  $0,14$  град/ч  $\cdot$  Гц $^{-2}$  [22]. Калибровка системы выполнена с применением вращательной компоненты Земли на широте Варшавы ( $\varphi = 52^{\circ}20''$ ) [23]. Поскольку интерферометр Саньяка реагирует только на абсолютную скорость вращения в плоскости петли [16], то при ориентации BOBC-1 в северном или южном направлении он должен дать сигнал, эквивалентный скорости  $\pm 11,86$  град/ч, и в направлении Запад–Восток – равный нулю. Процедура калибровки дала соответственно 400 и 20 мВ (рис. 2, б). Эти данные были применены при калибровке чувствительности BOBC-1, равной 1,15 град/ч, которая оказалась в два раза ниже, чем ожидалось для используемого динамического диапазона. Наконец, для записи данных был использован стандартный сейсмический регистратор KST. Аналого-цифровой преобразователь работал с частотой квантования 1 кГц, и затем сигнал был перезаписан в память с частотой квантования 100 Гц.

Одной из хорошо известных областей применения BOBC-1 как оптических гироскопов является дрейф, так как все оптические гироскопы дают угловые смещения в результате интегрирования скорости вращения. Поэтому точность всей системы очень чувствительна к реализации процесса интегрирования. Чувствительность системы растет с уменьшением времени интег-

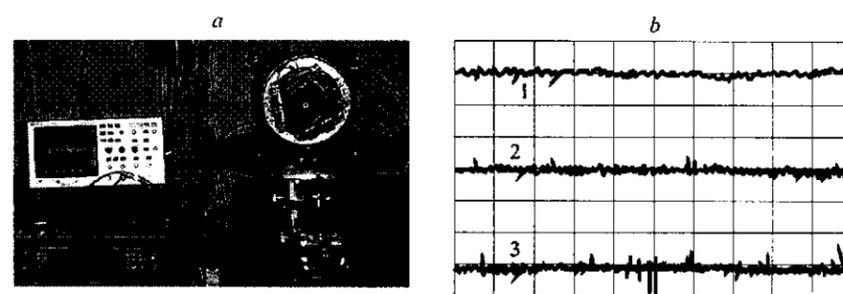


Рис. 2. Система BOBC-1: общий вид системы, ориентированной в направлении Запад–Восток, (а); осциллограмма электронных сигналов во время калибровки системы (б): кривая 1 – северное, 2 – западное или восточное, 3 – южное направления

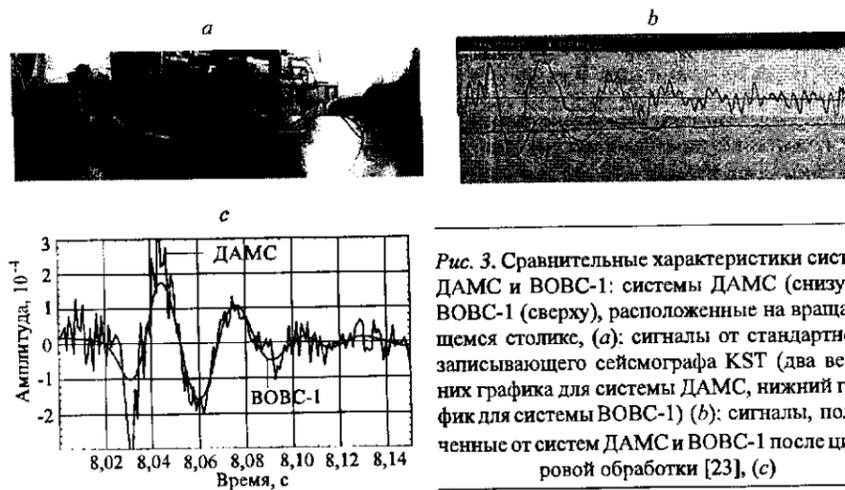


Рис. 3. Сравнительные характеристики систем ДАМС и ВОВС-1: системы ДАМС (снизу) и ВОВС-1 (сверху), расположенные на вращающемся столике, (а): сигналы от стандартного записывающего сейсмографа КСТ (два верхних графика для системы ДАМС, нижний график для системы ВОВС-1) (б): сигналы, полученные от систем ДАМС и ВОВС-1 после цифровой обработки [23], (с)

рирования, но дрейф элементов системы заставляет увеличивать его [19]. Таким образом, дрейф, связанный с постоянной компонентой выходного сигнала, влияет на точность работы ВОВС и должен быть детально рассмотрен и учтен. Применение ВОВС-1 как ВОВС, где конечным параметром является скорость вращения, а не угловое смещение, прямо полученное из сигнала интерферометра Саньяка [16], не требует интегрирования. Это дает возможность исключить влияние дрейфа на точность измерений соответствующим выбором динамического диапазона частот сигнала. Цифровой фильтр, встроенный в КСТ, обеспечивает такой выбор, потому что его нижняя частота пропускания, равная 0,1 Гц, исключает влияние флуктуаций окружающей среды на ВОВС-1 [24], в то время как его верхняя частота 20 Гц согласована с инерционностью системы синхронного детектирования ( $\tau_0 = 50$  мс). Необходимо отметить, что верхняя частота должна быть согласована со скоростью вращательных сейсмических волн [25].

**3. Лабораторные испытания ДАМС и ВОВС-1.** Система ВОВС-1 вначале была использована для исследований системы ДАМС. Обе системы, как показано на рис. 3, а, размещались на вращающемся столе так, чтобы вращательные явления доминировали над поступательными ( $w \ll la$ ). Вращение со скоростью Земли на широте Варшавы (т. е. ~12,86 град/ч) дало 400 мВ сигнала с выхода КСТ в фазе с сигналом от ДАМС (рис. 3, б). Эти данные были использованы для оценки вращательной компоненты согласно (2) для выравнивания левого канала ДАМС в соответствии с методом, предложенным в [26]:

$$u'_L \rightarrow u_L \sqrt{\sum u_R u_R / \sum u_L u_L}. \quad (3)$$

Результаты, представленные на рис. 3, с, свидетельствуют о хорошем согласии показаний ДАМС и ВОВС-1. В то же время система ДАМС хуже реагировала на вращение. Как видно из рисунка, сигнал ДАМС сильно зашумлен, тогда как сигнал ВОВС-1 очень гладкий. Это свидетельствует о преимуществе прямого метода измерений перед дифференциальным. Отсюда следует, что источники погрешности ДАМС должны быть проанализированы и устранены.

3.1. *Оценка основного источника ошибок системы ДАМС.* Источником флуктуаций в показаниях ДАМС, очевидно, является неидентичность характеристик используемых сейсмографов, а предложенный в соответствии с (3) метод выравнивания каналов недостаточно эффективен. По-видимому, корреляция, подобная (3), не адекватна представленным данным, потому что она минимизирует квадрат суммы  $u_L$  и  $u_R$ , которые содержат антикорреляционные вращательные компоненты  $i\alpha$ . Таким образом, алгоритм (3) минимизирует как ошибки, так и вращательную компоненту, разрушая последнюю. Более того, как показал модельный эксперимент [27], эта процедура особенно не эффективна, если компоненты ДАМС имеют разные характеристики затухания. В такой ситуации различие в характеристиках отдельных компонент системы в сочетании с процедурой квантования приводит, как показано на рис. 4, к появлению существенных ошибок. В этом модельном эксперименте разность постоянных времени правого и левого сейсмографов  $\Delta\beta$  принята равной 0,05. Кроме того, было исследовано влияние шумов каждого из сейсмографов на ошибки измерений.

Как следует из графиков, существенные ошибки возникают в той области, где вращательные движения имеют малую амплитуду в сравнении со смещениями. Поскольку именно эта область отвечает реальным сейсмическим событиям, метод калибровки ДАМС является очень важным для оценки достоверности полученных впоследствии результатов.

3.2 *Новый метод улучшения работы ДАМС.* Для успешной работы системы ДАМС предложена, например, в работе [13] фильтрация в спектральной области методами быстрого фурье-преобразования, а в [14] – фильтрация во временной области.

Однако эти методы используют так называемое тест-позиционирование ДАМС (сейсмографы поворачивают так, чтобы точно выставить параллельность их осей), которое, вообще говоря, изменяет условия работы. Поэтому

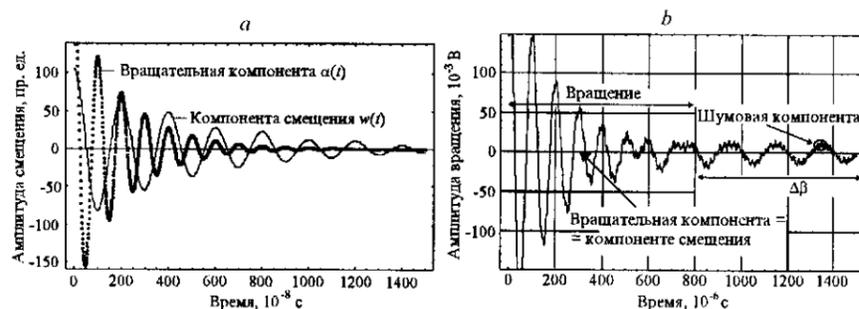


Рис. 4. Результаты модельного эксперимента (имитирование сейсмического события): вращательная и поступательная компоненты сигнала (а); вращательная компонента сигнала, зарегистрированная системой ДАМС [27], (б)

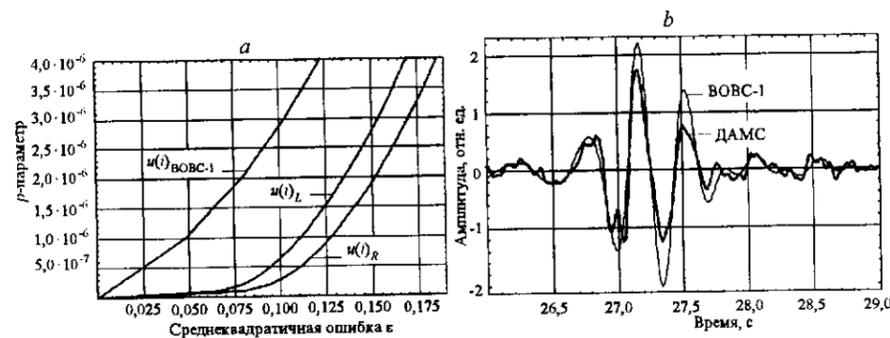


Рис. 5. Зависимость между параметрами  $\epsilon$  и  $p$  в системах ДАМС и ВОВС-1 (а); результаты сглаживания сигналов, представленных на рис. 3, с [28], (б)

были предложены другие способы обработки данных [28]. В большинстве своем эти методы используют сглаживание с помощью сплайнов [29, 30]. Записанные цифровые данные  $\mathbf{Y} = \{Y_i, i = 0, \dots, N\}$  с временем квантования  $\Delta t$  сглаживаются функциями вида

$$S(t) = a_j \tau^3 + b_j \tau^2 + c_j \tau + d_j,$$

$$j\Delta t \leq t \leq (j+1)\Delta t, \quad \tau = t - j\Delta t, \quad j = 0, \dots, N-1. \quad (4)$$

В этом случае минимизируется функционал

$$F[S] = p \int_0^{N\Delta t} [S''(t)]^2 dt + \sum_{i=0}^N p_i [S(i\Delta t) - Y_i]^2, \quad p \geq 0, \quad p_i > 0. \quad (5)$$

Следует отметить наличие соотношения между параметром  $p$  вышеприведенной функции и среднеквадратичной ошибки  $\epsilon$  [29], определенной как

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N p_i (Y_i - S(i\Delta t))^2} / \sqrt{\frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N p_i Y_i^2}. \quad (6)$$

Это соотношение, вычисленное для  $p_i = 1 \{i = 0, \dots, N\}$  методом подгонки [31], представлено на рис. 5, а. Видно, что процедура сглаживания генерирует ошибки для ДАМС, которые на порядок больше, чем для ВОВС-1. Эффективность этого метода для улучшения детектирования вращательных движений ДАМС (в сравнении с методом, результаты которого показаны на рис. 3, с) представлена на рис. 5, б для параметра сглаживания  $p$ , равного  $5 \cdot 10^{-6}$ , который был выбран как оптимальный. Он оказался достаточно большим для сглаживания вращательной компоненты, но ухудшил реальную компоненту поступательной части [28]. Следует отметить, что вращательная компонента была выбрана на порядок больше, чем поступательная, в то время как в реальной ситуации происходит наоборот.

**4. Результаты регистрации сейсмических событий в стандартных условиях сейсмической станции.** Чтобы зарегистрировать реальные сейс-

мические события, системы ДАМС и ВОВС-1 были установлены в помещении стандартной сейсмической обсерватории Ксяж. Эта станция состоит из платформы для закрепления датчиков, установленной на «стабильной скале», и удаленного помещения, где находится регистрирующая аппаратура КСТ. Правильность работы ВОВС-1 была проверена с помощью КСТ [23]. Первые результаты сейсмических событий (небольшое землетрясение в горном районе Силезии, произошедшее 28.12.2001 г. в 9 ч 33 мин), записанных упомянутой выше системой, представлены на рис. 6. Интересен

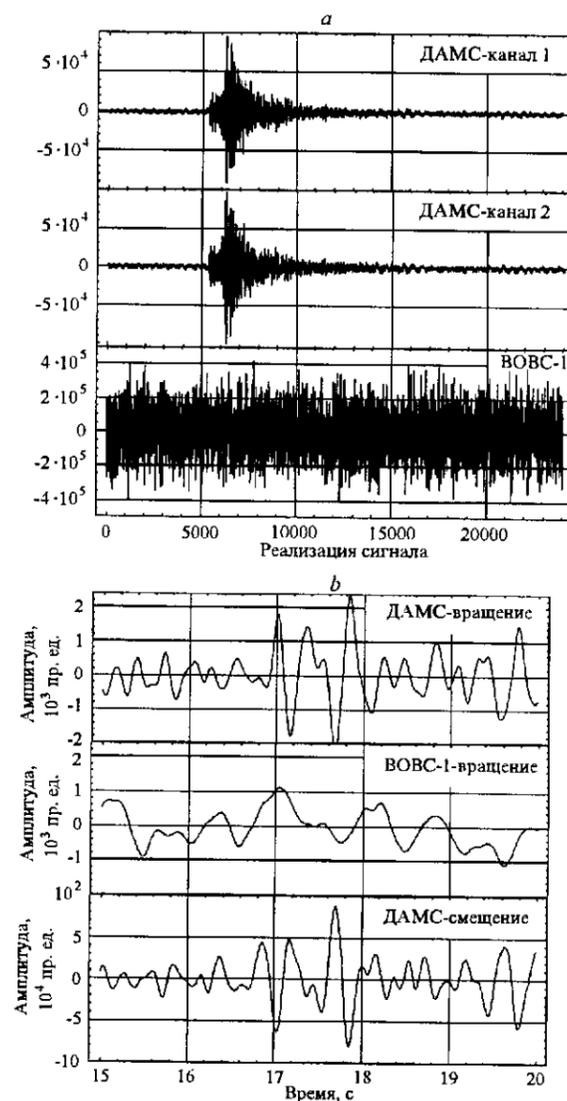


Рис. 6. Сейсмические явления, зарегистрированные системами ДАМС и ВОВС-1 при землетрясении в Ксяже: сигналы на выходе КСТ (а); расчетные вращательная компонента и компонента смещения (б)

тот факт, что ВОВС-1 не зарегистрировал никаких вращательных движений, в то время как ДАМС показал наличие линейных движений, характерных для этого землетрясения (рис. 6, *a*). После цифровой обработки (см. разд. 3.2) ДАМС дал вращательную компоненту, но ВОВС-1 ее не подтвердил (рис. 6, *b*). Необходимо подчеркнуть, что вычисленная вращательная компонента оказалась на два порядка ниже, чем поступательная (см. рис. 6, *b*, нижняя кривая). Исследования полученных результатов позволяют сделать вывод, что, возможно, вращательные движения в этом случае отсутствовали. Если ВОВС-1 в этот период работал корректно, то этот вывод можно считать правильным, либо вращательные движения были ниже его чувствительности.

Отсутствие вращательного движения, продемонстрированное ВОВС-1, может быть подтверждено и результатами других измерений. Как показано в [23], сумма сигналов от обоих каналов ДАМС, зарегистрированных в Ксяже, и сигнал от одного канала связаны с перемещением Земли только линейной зависимостью, в то время как данные, полученные в Ойцуве, содержат много нелинейностей. Это, по-видимому, также говорит об отсутствии вращательных движений во время землетрясения, зарегистрированного в Ксяже.

**Заключение.** Представлены идеи и первые экспериментальные результаты применения ВОИС для детектирования сейсмических вращательных волн. По ряду причин они обещают существенный прогресс в сейсмологии. Во-первых, представленная система ВОВС-1 реагирует только на вращательные движения, что, по-видимому, не может быть достигнуто с помощью других систем. Кажется, что ее данные легко идентифицируются. Более того, эта система работает в режиме реального времени, что дает ей дополнительные преимущества. Во-вторых, она может быть использована для исследования других типов сейсмометров, например ДАМС. Представленные результаты способствуют развитию новых методов анализа данных, зарегистрированных ДАМС. Этот метод, основанный на использовании сглаживающих сплайнов, дает возможность получать более четкие данные о характеристиках вращательных движений, получаемых с помощью системы ДАМС. Более того, ВОВС-системы могут обеспечить наиболее удобные диапазоны измерений и параметры чувствительности (например, чувствительность  $4 \cdot 10^{-7}$  рад/с, а диапазон частот от 0,1 до 20 Гц при самокалибровке и т. п.). В связи с этим сейчас разрабатывается новая система ВОВС-2, которая, как ожидается, будет реагировать на сейсмические вращательные волны только при сильных землетрясениях. Она за счет увеличения числа витков светового волокна до 1100 м и диаметра петли до 0,63 м должна увеличить чувствительность до  $8 \cdot 10^{-8}$  рад/с в полосе 20 Гц. Возможности создаваемой системы, по мнению авторов, уникальны, но необходимо доказать, что записанные сигналы связаны с землетрясением. Как показали первые результаты, полученные в Ксяже, такого рода сейсмические волны появляются, вероятно, только при сильных землетрясениях. Сильные землетрясения происходят достаточно редко и неожиданно, поэтому конструируемая система ВОВС-2 должна быть испытана за достаточно большой промежуток времени в непрерывном режиме.

Авторы выражают признательность профессору Р. Тейсияре и доктору Р. Свилю за полезные дискуссии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Aki K., Richards P. G.** Quantitative Seismology: Theory and Methods. N. Y.: W. H. Freeman and Company, 1980.
2. **Hobbs W. H.** Earthquakes. N. Y.: Appleton and Co., 1907.
3. **Gutenberg B.** Grundlagen der Erdbebenkunde. Frankfurt: University of Frankfurt a/M., 1926.
4. **Davison Ch.** The Founders of Seismology. Cambridge: Cambridge University Press, 1927.
5. **Nagahama H., Teisseyre R.** Seismic rotation waves: dislocations and disclinations in a micromorphic continuum // *Acta Geophys. Pol.* 2001. **49**. P. 119.
6. **Teisseyre R.** Earthquake processes in a micromorphic continuum // *Pure Appl. Geophys.* 1973. **102**. P. 15.
7. **Teisseyre R., Nagahama H.** Micro-inertia continuum: rotations and semi-waves // *Acta Geophys. Pol.* 1999. **47**. P. 259.
8. **Takeo M., Ito H. M.** What can be learned from rotational motions excited by earthquakes? // *Geophys. Journ. Intern.* 1997. **129**. P. 319.
9. **Usher M. J., Burch R. F., Gurlap C.** Wide-band feedback seismometers // *Phys. Earth Planet. Interiors.* 1979. **18**. P. 38.
10. **Riedesel M. A., Moore R. D., Orcutt J. A.** Limits of sensitivity of inertial seismometers and velocity transducer and electronic amplifiers // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1990. **80**. P. 1725.
11. **Moirya T., Marumo R.** Design for rotation seismometers and their calibration // *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.* 1998. **61**. P. 99.
12. **Bouchon M., Aki K.** Strain, tilt, and rotation associated with strong ground motion in the vicinity of earthquake faults // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1982. **72**. P. 1717.
13. **Teisseyre R., Suchcicki J., Teisseyre K. P.** Recording the seismic rotation waves: reliability analysis // *Acta Geoph. Pol.* 2003. **51**. P. 37.
14. **Nowozynski K., Teisseyre K. P.** Time-domain filtering of seismic rotation waves // *Ibid.* P. 51.
15. **Sagnac G.** L'ether lumineux demontre par l'effet du vent relatif d'ether dans un interferometre en rotation uniforme // *Compte-rendus a l'Academie des Sciences.* 1913. **95**. P. 708.
16. **Post E. J.** Sagnac effect // *Rev. of Modern Phys.* 1967. **39**. P. 475.
17. **McLeod D. P., Stedman G. E., Webb T. H., Schreiber U.** Comparison of standard and ring laser rotational seismograms // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1998. **88**. P. 1495.
18. **Cochard A., Schreiber U., Igel H. et al.** Observations and simulations of rotational motions recorded by a ring laser // *EGS-AGU-EUG Joint Assembly 2003. Nicca, EAE03-A-13160*, 2003.
19. **Ezekiel S., Arditty H. J.** Fibre Optic Rotational Sensors and Related Technologies. N. Y.: Springer, 1982.
20. **Jaroszewicz L. R., Swillo R., Krajewski Z.** Fiber-optic rotational seismometer // *Pat. Appl.* 2002.
21. **Moriya T., Teisseyre R.** Discussion on the recording seismic rotation waves // *Acta Geoph. Pol.* 1999. **47**. P. 351.
22. **Jaroszewicz L. R., Szelmanowski A.** Application of fibre optic gyroscope for quality research of angular rotation in slow-speed platforms // *SPIE.* 1997. **3479**. P. 284.

23. **Jaroszewicz L. R., Krajewski Z.** Possibility of fibre-optic rotational seismometer design // SPIE. 2002. 4900. P. 416.
24. **Jaroszewicz L. R.** Polarization behavior of different fiber-optic interferometer configurations under temperature changes // Opt. Appl. 2001. 31. P. 399.
25. **Teisseyre R., Majewski E.** Earthquake Thermodynamics and Phase Transformations in the Earth's Interior. N. Y.: Academic Press, 2001.
26. **Teisseyre R.** The two antiparallel pendulum seismometers – channels equalization and rotation detection procedures // Private announcement, Warsaw, 2002.
27. **Jaroszewicz L. R., Krajewski Z., Solarz L., Teisseyre R.** Fiber-optic Sagnac interferometer as a system for the electromechanical rotational seismometer calibration and a new sensor of the rotational seismic events // EGS-AGU-EUG Joint Assembly 2003. Nicca, poster G11-1WE3P-1930, 2003.
28. **Jaroszewicz L. R., Krajewski Z., Solarz L. et al.** A new area of the fiber-optic Sagnac interferometer application // Intern. Microwaves and Optoelectronics Conf. IMOC-2003. Brazil, 2003. In press.
29. **Kojdecki M. A.** Private communication, Feb. 2002.
30. **Eubank R. L.** Spline Regression in Smoothing and Regression: Approaches, Computation, and Application /Ed. M. G. Schimek. N. Y.: John Willey & Sons, Inc., 2000.
31. **Flannery B. P., Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T.** Numerical Recipes, The art of Scientific Computing. [http:// www.nr.com](http://www.nr.com)

*Институт прикладной физики,  
Военный технологический университет,  
E-mail: jarosz@wat.edu.pl*

*Поступила в редакцию  
6 июня 2003 г.*