

Вращательная сейсмология (обзорная экскурсия)

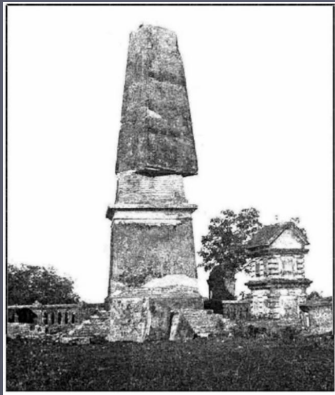


К.В. Кислов

Институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики (ИТПЗ РАН)

"such rotations are negligible"

[C. Richter, Elementary seismology]



«...при воздействии горизонтальной компоненты ускорения возникает плечо сил и крутящий момент, поворачивающий соответствующим образом верхнюю часть объекта»

[Шебалин Н.В., Проблемы макросейсмоки.]



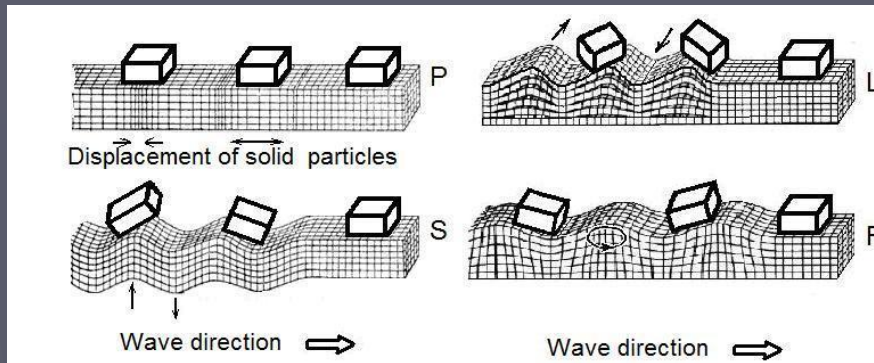
«... the rotational component of seismic signals is in general too small to be directly observed.»

[E.Wielandt, Seismometry]

«The state-of-the-art sensitivity of the general rotation-sensor is not yet enough for a useful geophysical application.»

[Aci and Richards, Quantitative Seismology]





Вращения недеформируемого объема

Повороты могут быть выражены через скорости колебания грунта по двум перпендикулярным направлениям. Например, повороты относительно

вертикальной оси $\varphi_z(t) = \frac{1}{2v} \left[\frac{\partial y}{\partial t} - \frac{\partial x}{\partial t} \right]$, где v – скорость волны, а $\frac{\partial y}{\partial t}$ и $\frac{\partial x}{\partial t}$ –

скорости колебания грунта по перпендикулярным оси вращения направлениям.

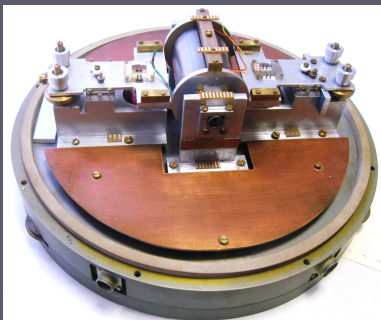
Скорости и ускорения поворотных движений грунта соответственно

выражаются через поступательные ускорения грунта и их первые производные.

Наклонометры
НШ-11 и НШ-11
чувствительны к
линейным
перемещениям

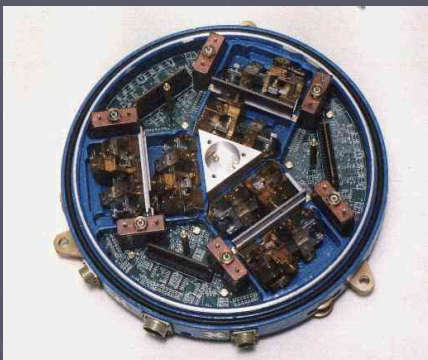
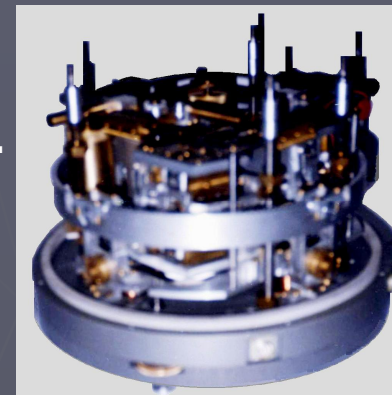


Маятниковые сейсмометры чувствительны к поступательному движению и поворотам. Горизонтальные маятники чувствительны к ускорению линейного движения, наклону, угловому ускорению и поперечным возбуждениям; и вертикальные маятники чувствительны к ускорению линейного движения, угловому ускорению и поперечным возбуждениям.



Наклономер KST-1 на базе механического гироскопа (ИТПЗ РАН + ГосНИИАС)

Пятикомпонентный сейсмометр KSP-3M. Три компоненты линейных движений и две - наклоны с карданного подвеса маятников (ИТПЗ РАН)



Шестикомпонентный сейсмометр KSM-1 с возможностью вычисления наклонов (ИТПЗ РАН)

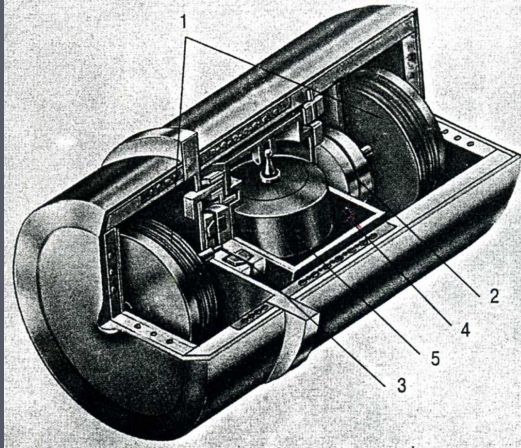


Кварцевый наклономер НКВ-2 Гриднева (ИФЗ РАН)



Антинаклонная платформа с горизонтальным сейсмометром (СПбГУ)

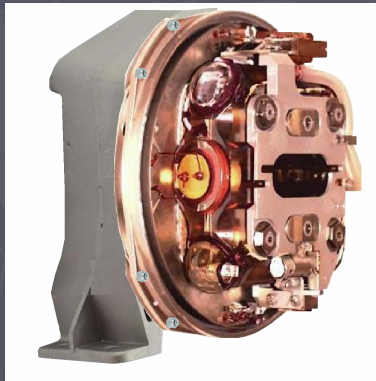
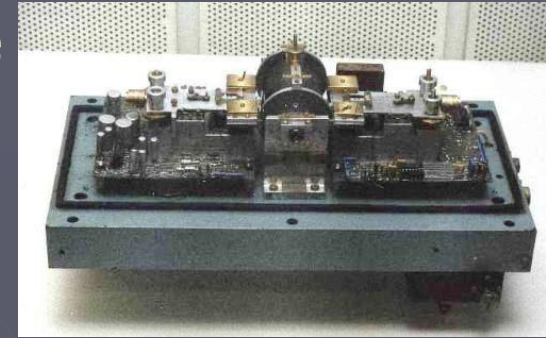
Наклономер KST-1M (ИТПЗ РАН) на базе механического гироскопа



КИНД99-003 - поплавковый гироблок (НИИ ПМ им. ак. В.И.Кузнецова) с электромагнитным подвесом поплавка, ротор подвешен на газодинамических опорах.

Чувствительность $1 \cdot 10^{-8}$ рад/с

- 1 – сильфоны;
- 2 – датчик момента;
- 3 – датчик угла;
- 4 – поплавковая камера;
- 5 – ротор гироскопа



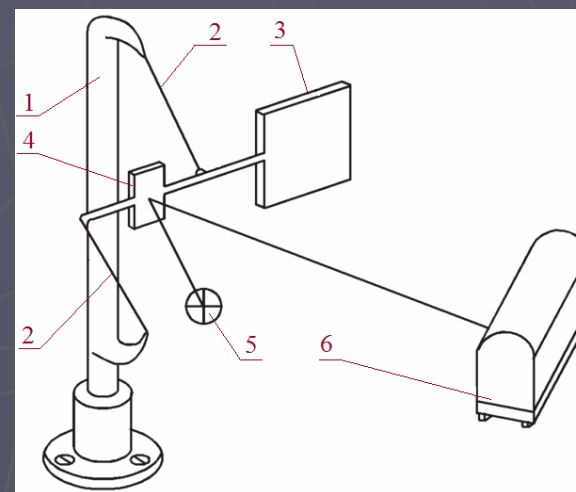
Макет однокомпонентного датчика вращательных движений на основе лазерного гироскопа КМ-11 (ИТПЗ РАН + НПО «Полюс»)



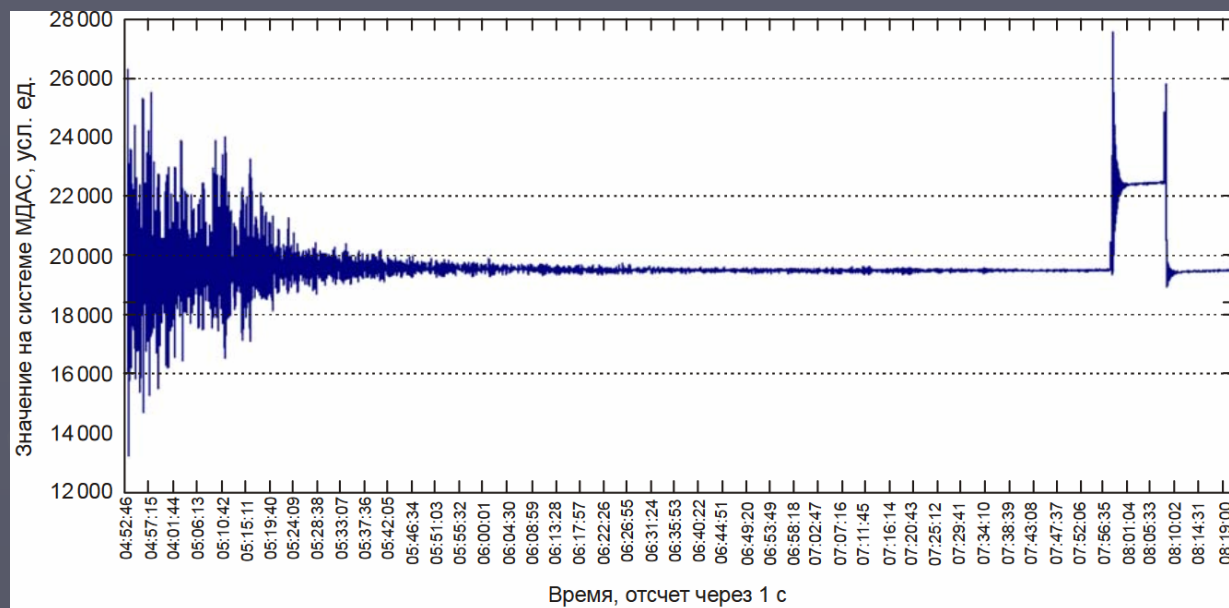
Д.т.н. Гриднев Д.Г. и д.т.н., профессор Собисевич Л.Е. настраивают наклономер НКВ в камере 41-го пикета (Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова).

Принципиальная схема наклономера

- 1 - монтажная рамка;
- 2 - кварцевые нити;
- 3 - демпфирующее устройство (масса маятника);
- 4 - зеркало;
- 5 - осветитель;
- 6 - фотозащитный элемент

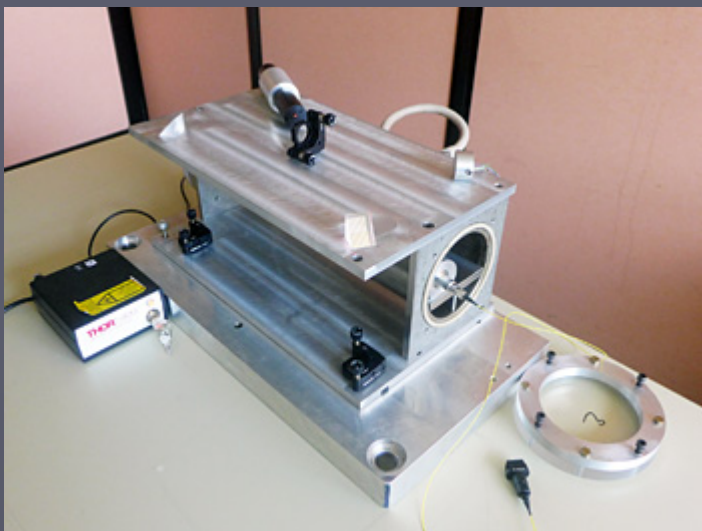


Приборы этого типа применяются для контроля движений гравиметрического постамент на станции космической геодезии NVSK (Ключи, г. Новосибирск).



Запись хода наклона в азимуте СЮ на станции Талая (04.05.2000 г.).
Запись включает землетрясение и калибровку наклономера микрометром.

Это не наклоны, вызванные землетрясением, а их смесь с реакцией
наклономера на линейные движения



ЛЯП сделала ПЛИ

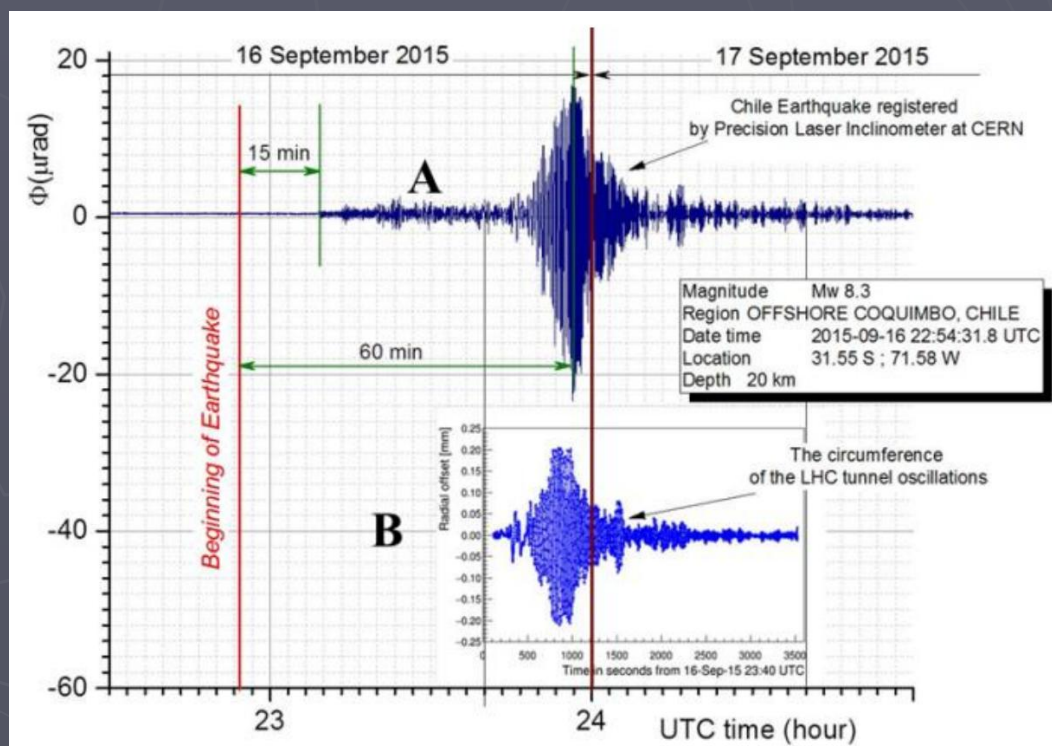
Предназначен для метрологического сопровождения современных ускорителей-коллайдеров.

чувствительность $2.4 \cdot 10^{-11}$ рад/Гц^{1/2} в частотном диапазоне 10^{-3} -12.3 Гц.

Запись землетрясения 2015 г. в Чили (Mw 8.3) проведена в Женеве (ЦЕРН).

В 2019 г. инклинометр установлен в Италии (Европейский гравитационно-волновой детектор VIRGO).

Предполагается создание сети из 6-ти приборов в Армении.



1. Амплитуды вращений в ближней зоне могут быть на один-два порядка больше, чем ожидалось.

[Takeo, M. (1998). Ground rotational motions recorded in near-source region. Geophys. Res. Lett., 25(6), 789–792]

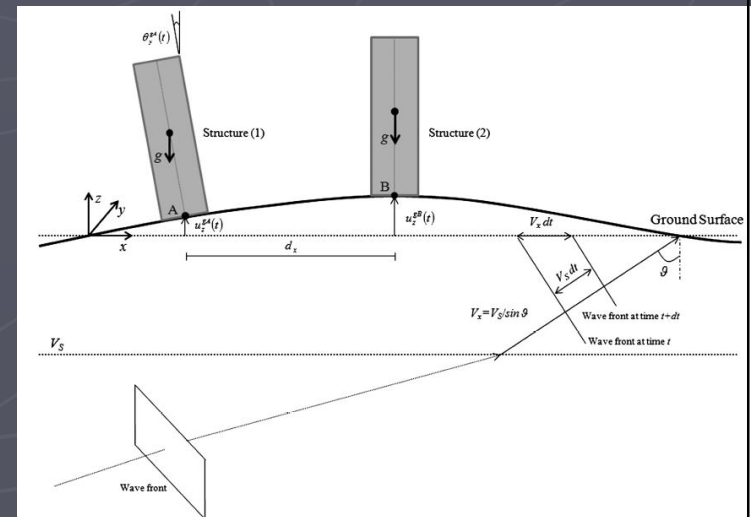
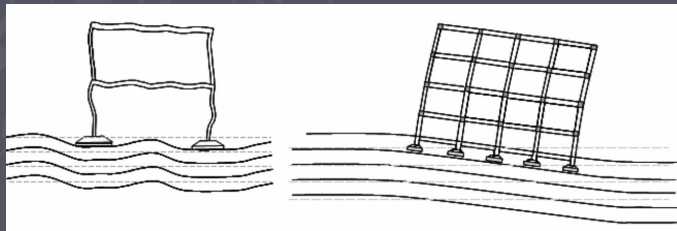
Расчетная максимальная скорость вращения была $1,5 \times 10^{-3}$ рад / с. Наибольшая скорость вращения составила $2,6 \times 10^{-2}$ рад/с вокруг горизонтальной оси север-юг во время землетрясения магнитудой 5,2.

[Liu et al., 2006; Jaroszewicz and Wiszniowski, 2008; Liu et al., 2009; Stupazzini et al., 2009; Trifunac, 2009; Li et al., 2012; Chiu et al., 2013]

2. Развитие сейсмометрии привело к созданию приборов, регистрирующих вращательные движения и не чувствительных к перемещениям.

3. Появились очень чувствительные лазерные гироскопы с большим периметром для обеспечения экспериментов по обнаружению гравитационных волн.

4. Назрела необходимость изучения отклика зданий и сооружений на вращательные движения, чем бы они не были вызваны: несовпадением центра жесткости и центра масс сооружения, ротационными движениями грунта, ветровыми нагрузками.



Первые наблюдения anomalно большого вращения

В [Bouchon, Aki, 1982] рассчитана максимальная скорость вращения $PRV = 1,5$ мрад / с, создаваемая в окрестности источника 30-километровым сдвиговым разломом со смещением 1 м (т. е. землетрясением с магнитудой $M \sim 6$).

В [Takeo, 1998]

Рой землетрясений 1997 г. (станция KAW, Ито, полуостров Идзу, Япония; $\Delta < 8$ км)

При $M_{5,2}$ зарегистрирована $PRV = 2,6 \times 10^{-2}$ рад / с вокруг оси NS,
 $3,3 \times 10^{-3}$ рад / с вокруг оси Z

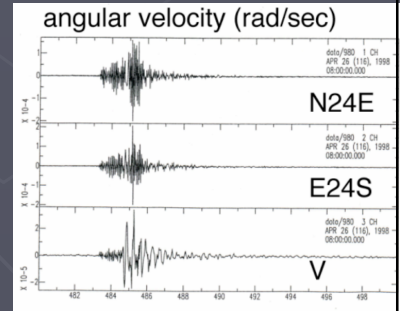
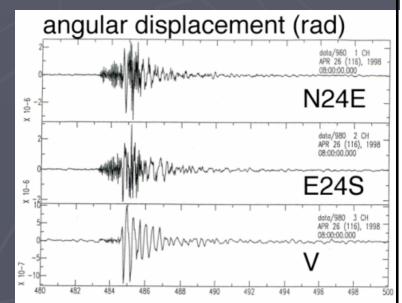
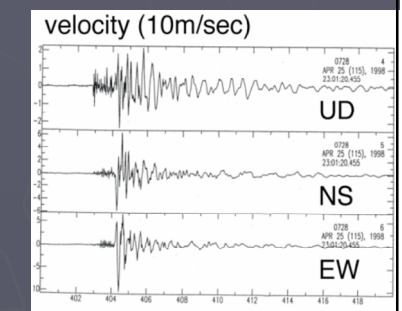
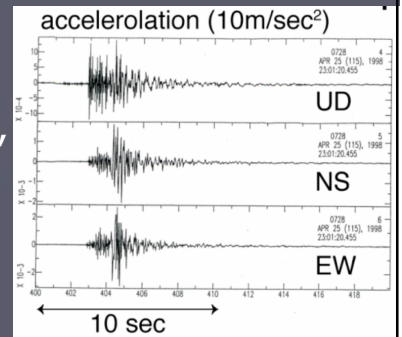
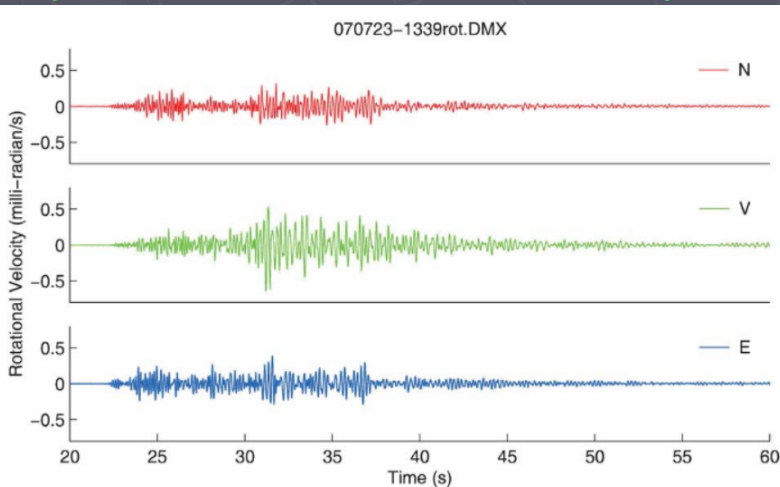
Рой землетрясений 1998 г. Ускорения, скорости, вращательные смещения и скорости вращения, вызванные землетрясением с магнитудой 2,4 \longrightarrow

Высокие уровни вращательных движений достигаются при низких уровнях ускорения. Вращательные движения примерно в 100 раз больше, чем наблюдаемые в Паркфилде [Spudich, Fletcher, 2010].

В [Liu et al., 2009]

С мая 2007 по февраль 2008 (станция HGSD, Тайвань; Δ от 14 до 260 км) для землетрясений с $M \sim 5$ $PRV \sim$ мрад / с

При землетрясении 23 июля 2007 ($M_w 5.1$, $\Delta = 51$ км) $PRV = 0,63$ мрад / с для вертикальной составляющей. Амплитуды вертикальной составляющей намного выше, чем для двух горизонтальных, в то же время пиковое ускорение грунта (PGA) было выше у горизонтальных компонент.



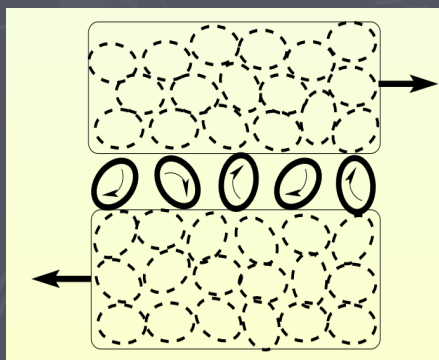
←

1. Вращательные движения на телесеismicких расстояниях вполне укладываются в рамки классической теории упругости.
2. Вращательные движения большой амплитуды наблюдаются не при каждом землетрясении.
3. Вращательные движения большой амплитуды наблюдаются пока только в Японии и на Тайване. Наблюдения же проводятся еще и в Северной Америке, в Европе и в Китае.

Максимальная величина нормальных вращений: $2\pi A / \lambda$, где A - амплитуда и λ длина волны

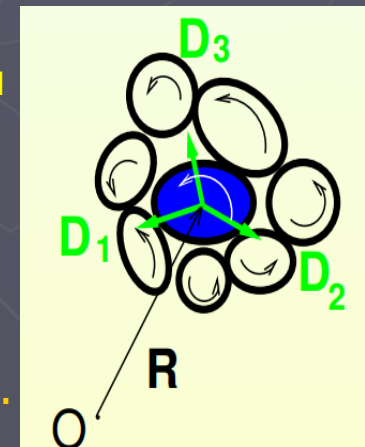
Реальные материалы Земли являются гетерогенными, анизотропными и нелинейными, особенно в зоне повреждений, окружающих разломы, и в слабо консолидированных осадочных породах и почве под сейсмическими станциями.

Спиновые волны, ротационная модель сейсмического процесса [Викулин, 2008]



Теория упругости братьев Коссера (микрополярная упругость):

- локальное вращение частиц континуума,
 - пара напряжений (крутящий момент на единицу площади),
 - силовое напряжение (сила на единицу площади).
- Каждая точка подвергается воздействию сил и пар.



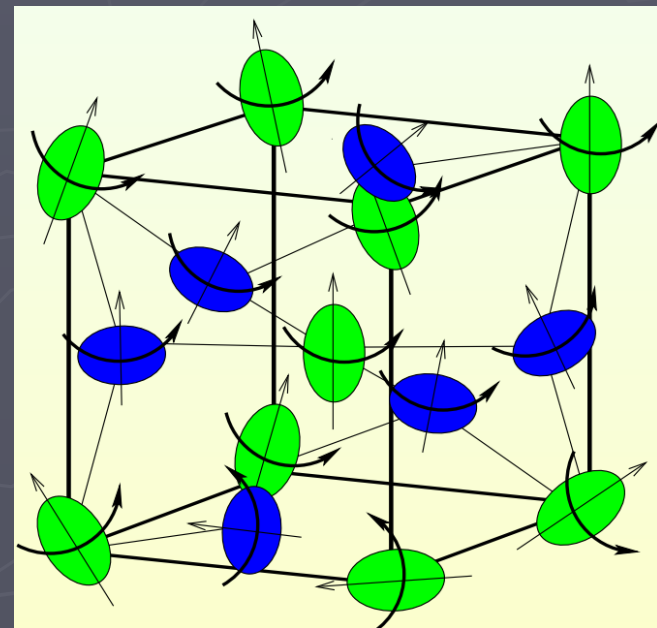
Гетерогенные материалы с зернистой структурой, композиты под нагрузкой, вызывают вращение (достаточно жестких) зерен (псевдосреда Коссера).

При распространении волн в неограниченной трехмерной редуцированной среде Коссера (сыпучие материалы), волны сдвига-вращения имеют запрещенную зону частот, где вся энергия уходит на поворотные движения; волна не распространяется в среде, а локализуется вблизи источника [Grekova E.F. Wave propagation in rocks modeled as reduced Cosserat continuum, 2004].

В полной линейной среде Коссера поверхностные волны Рэлея диспергируют, в то время как в классической теории упругости волны Рэлея распространяются без дисперсии [Лялин А.Е. О распространении поверхностных волн в среде Коссера, 1982].

Сложные среды не ограничиваются теорией братьев Коссера. Есть и другие, еще более сложные обогащенные континуумы.

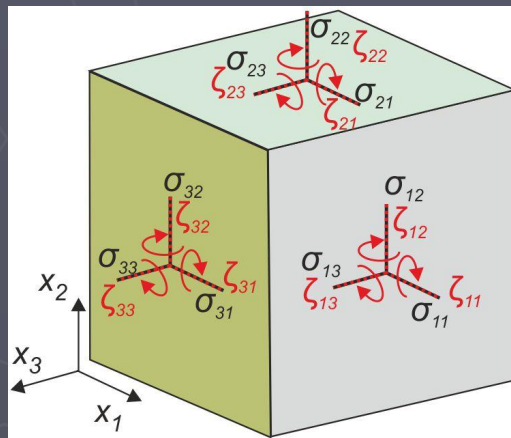
Среда Кельвина - специальная среда Коссера с частицей, обладающей большим спином



Если энергия вращения хранится в зоне разлома, как она хранится?
Как вращательная упругость связана с обычной?
Каков характер динамического разрушения (разблокировки) гранулированных сред?
Как соотносятся несимметричные напряжения или упругость Коссера и т.д., с проблемой хранения крутящих моментов.
Какова геометрия (квази) статических вращений в гранулированных средах?
Каково влияние жидкостей?
Существует ли вращательная ползучесть?
Затухание силы вращения?
и др.



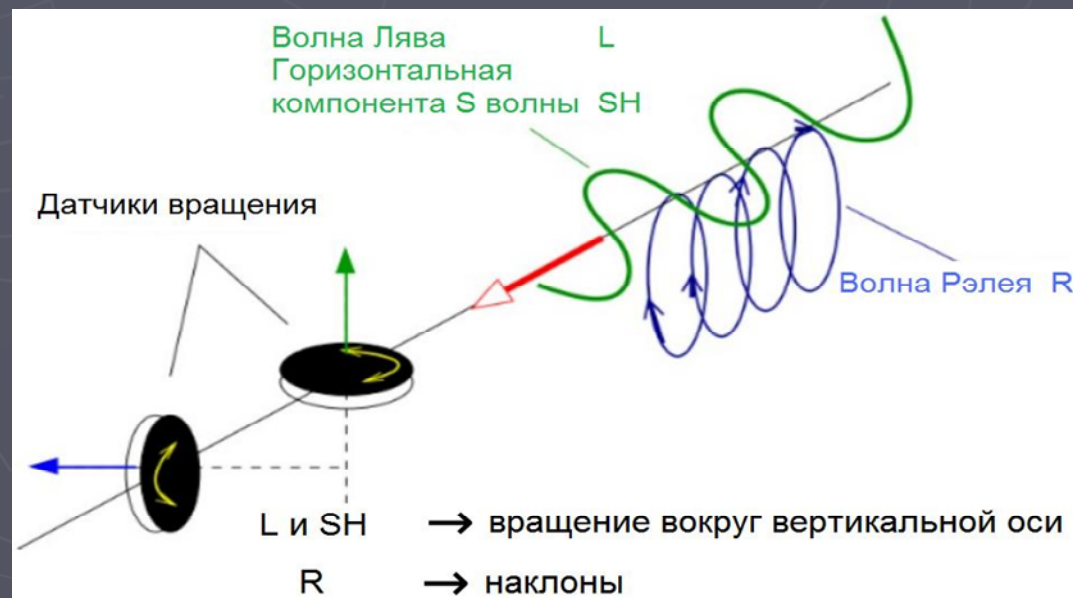
François Nicolas Cosserat



Eugène-Maurice-Pierre Cosserat

Для чего нужна информация о вращательных движениях?

1. Совместное рассмотрение поступательной и вращательной составляющей помогает в интерпретации сейсмического сигнала:
 - может быть достигнуто улучшение отношения сигнал / шум для сейсмических наблюдений [*Brokešová, Málek, 2013*]:
 - повышается качество сейсмических записей линейных перемещений за счет коррекции чувствительности приборов к вращательным движениям:
 - возможна уверенная идентификация фаз землетрясения и определение направления на источник [*Gaebler, 2010*], существенно повышается четкость вступления поперечных волн.
2. При исследовании свойств очага и строения среды
 - совместное рассмотрение поступательной и роторной составляющих помогает однозначно определять положение плоскости разрыва в очаге [*Халчанский, 2001*] и повышает возможности томографии [*Bernauer, et. al., 2009*]
3. Изучение распределения и величины вращательных движений в сейсмоопасных зонах необходимо:
 - для оценки поведения зданий при землетрясениях [*Falamarz-Sheikhabadi, Ghafory-Ashtiany, 2010*]
 - при изучении влияния свойств грунта непосредственно под источником сигнала, а также нелинейных эффектов в сейсмоопасных зонах [*Lee, et. al., 2009*].



Для чего нужна информация о вращательных движениях? (продолжение)

4. Исследование строительных конструкций

- выявляет их критичность к вращательным движениям,
- определяются моды вращательных движений и резонансные частоты [Lee, et. al., 2009].

5. Вулканология [Rotational..., 2007]

6. Анализ собственных колебаний Земли [Lantz, et. al., 2009].

- датчики вращения (вертикальная составляющая) обеспечивают дополнительные наблюдения свободных тороидальных колебаний, которые затруднены стандартными датчиками

7. Коррекция показаний прецизионных приборов, чувствительных к вращательным движениям, в том числе направленных на поиск гравитационных волн [Lantz, et. al., 2009].

8. Сейсморазведка.

- повышается способность разделять P- и S-волны и детектировать с большой точностью прибытие поверхностной волны. [Teisseyre, 2010; Igel, et. al., 2010];
- крутильный датчик выгодно отличается способностью разделять сигналы от мощного удаленного источника от сигналов ближнего слабого источника.

9. Датчики вращения имеют большой потенциал для дистанционного мониторинга подземного бурового оборудования



Диапазоны величин – требования к приборам (2012 г.)

Телесејсмика

разрешение 10^{-10} рад / сек / Гц^{1/2} в диапазоне от 0,1 мГц до 10 Гц

Ближнее поле

Сейсмологические приложения

разрешение 10^{-7} рад / сек в диапазоне от 0,01 Гц до 0,1 Гц

Инженерные приложения

разрешение 10^{-7} рад / сек

максимальная величина несколько рад/с

в диапазоне от 0,01 Гц до 100 Гц

При этом датчики должны быть нечувствительны к линейному движению.

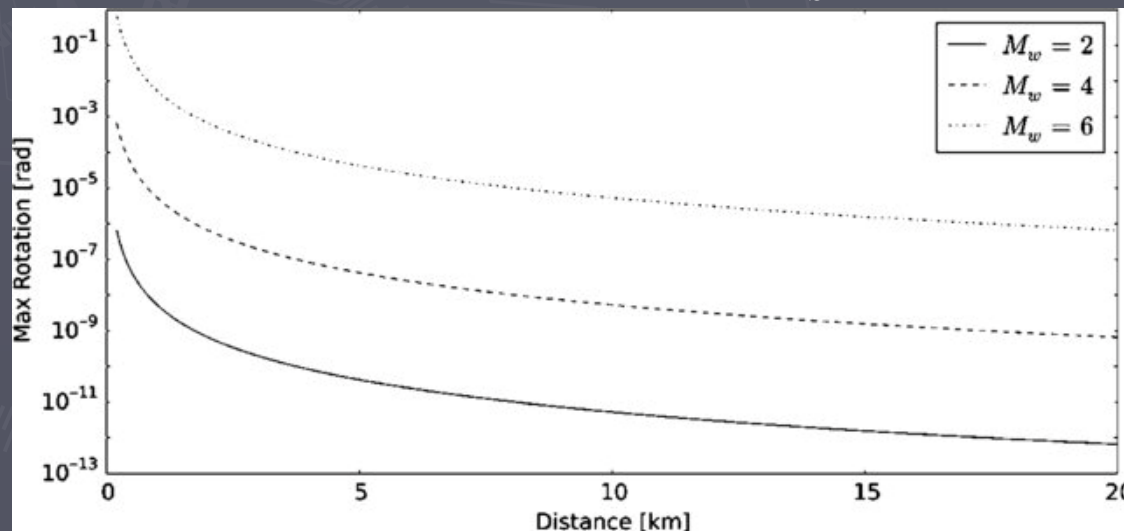
Должны фиксироваться 3 компоненты вращения.

Диапазоны сейсмических явлений

динамический
частотный

10^{-14} рад / сек $\leq \Omega \leq 1$ рад / сек

3 мГц $\leq f_s \leq 10$ Гц



Теоретическая оценка максимальных статических вращений как функция расстояния. На сегодняшний день не наблюдались напрямую.

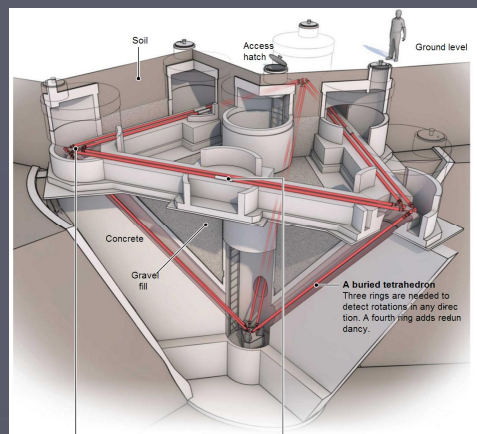
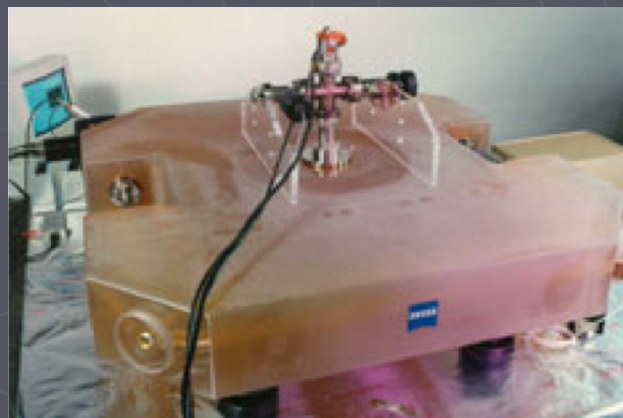
GEO, вертикальная установка



UG-2 (39,7×21 м,
Новая Зеландия)



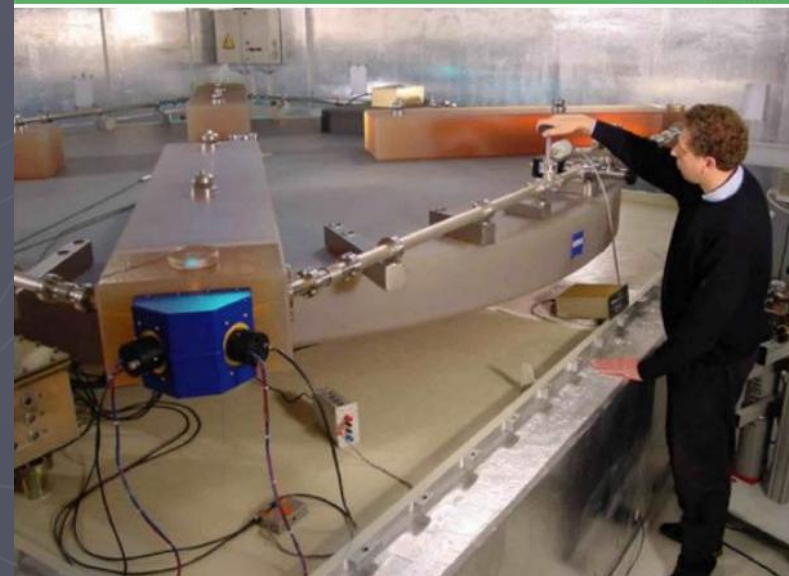
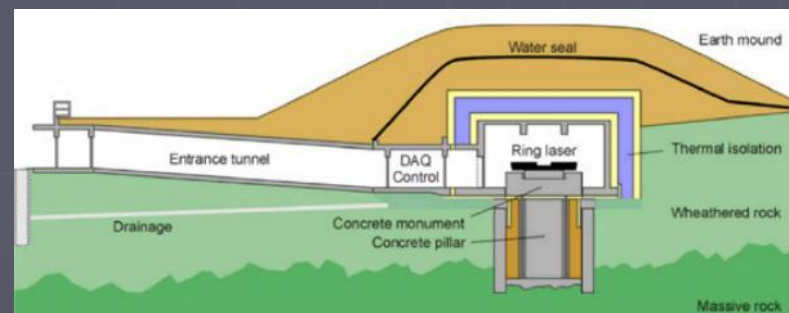
С-II. Монолитная конструкция,
Процесс сборки
(Новая Зеландия)



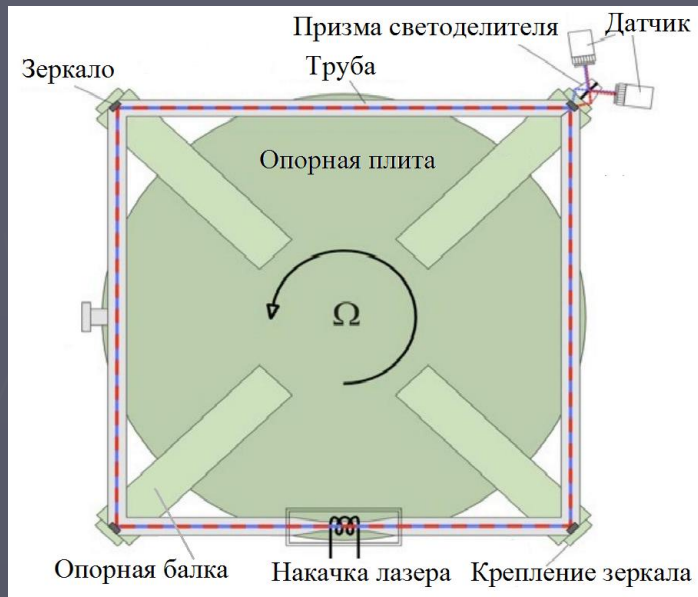
ROMY (г. Мюнхен, Германия)

Лазерные гироскопы с
большим периметром

G ring (г. Ветцель, Германия)



Первый кольцевой лазер (1963 г. США)

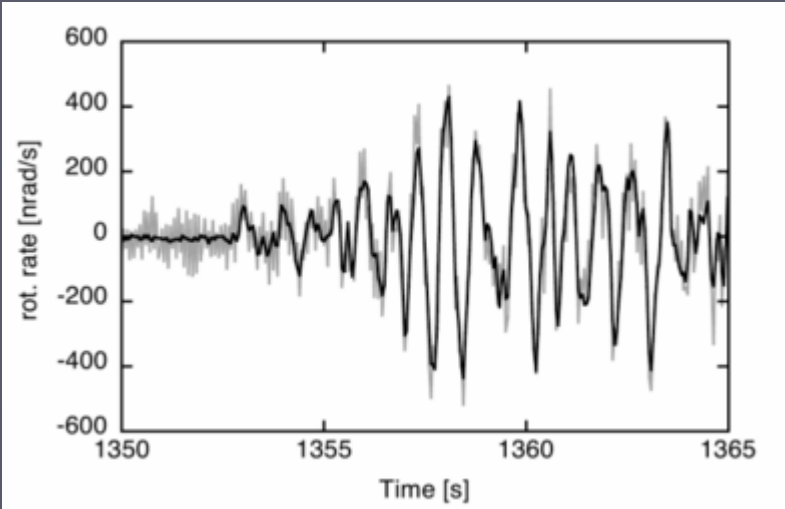


Модель	Площадь контура (м ²)	Периметр контура (м)	Чувствительность (рад/с)
С-П	1	4	146.2×10^{-12}
GEOsensor	2.56	6.4	108.1×10^{-12}
G-0	12.25	14	11.6×10^{-12}
G	16	16	12×10^{-12}
UG1	367.5	77	17.1×10^{-12}
UG2	834.34	121.4	7.8×10^{-12}

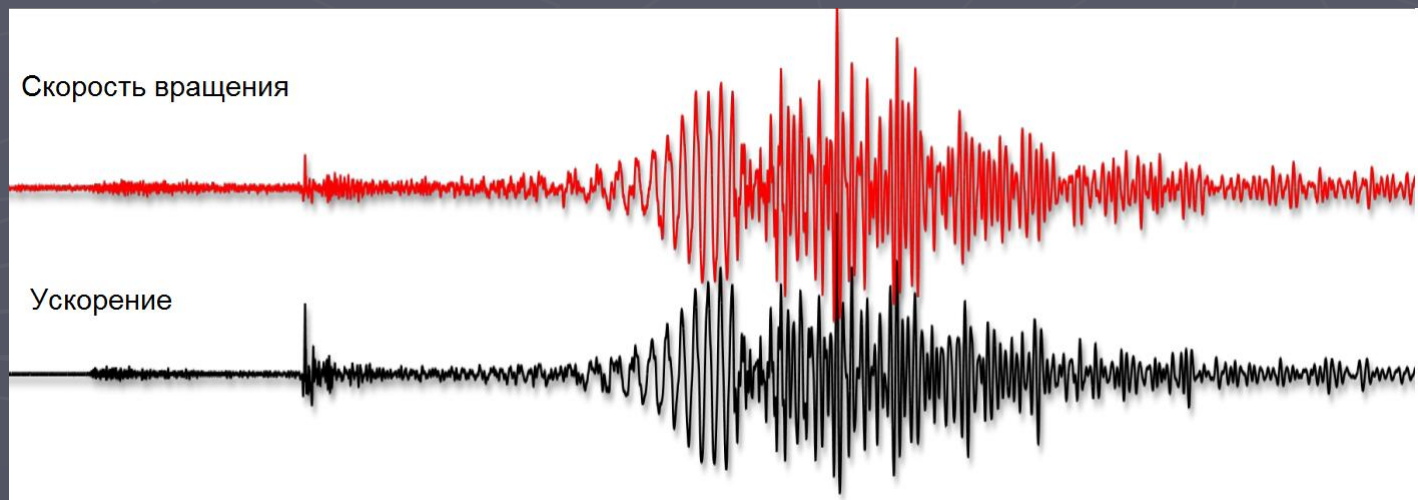
Разность частот в квадратном гироскопе, вызванную вращением приближенно: $\Delta\nu = \frac{1}{4} \frac{P}{\lambda} \Omega$

P — периметр,
 Ω — угловая скорость вращения,
 λ — длина волны



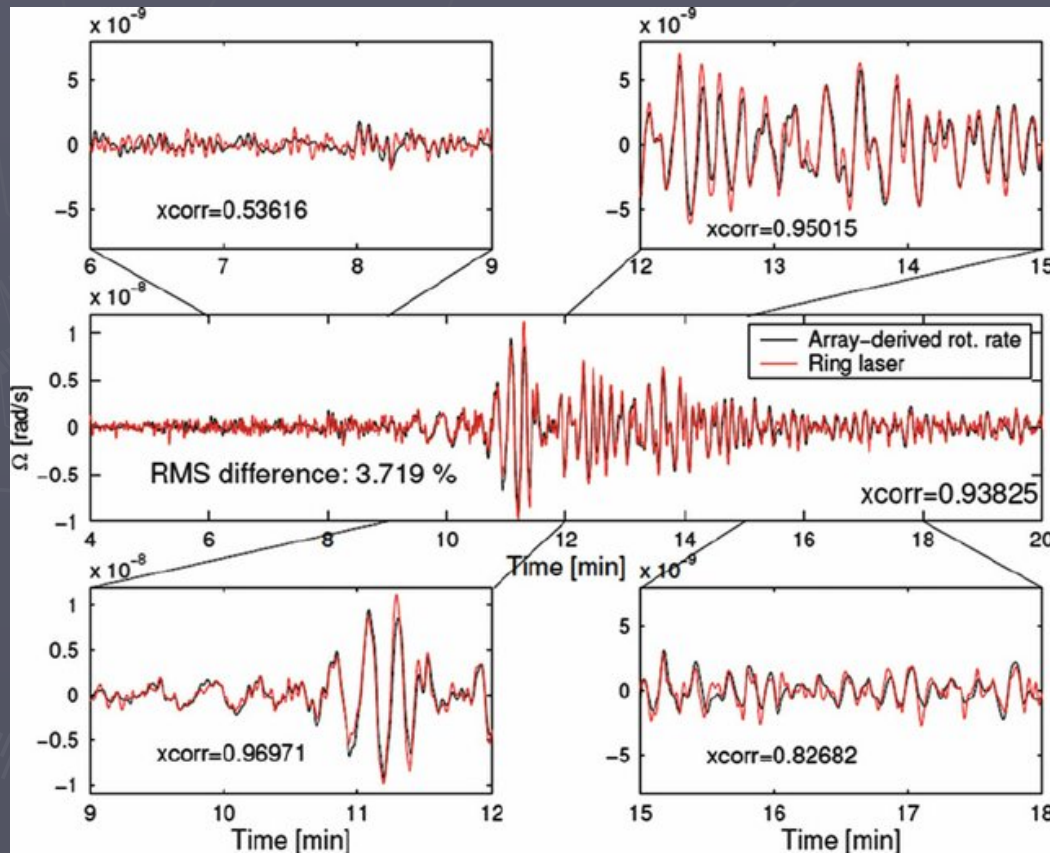
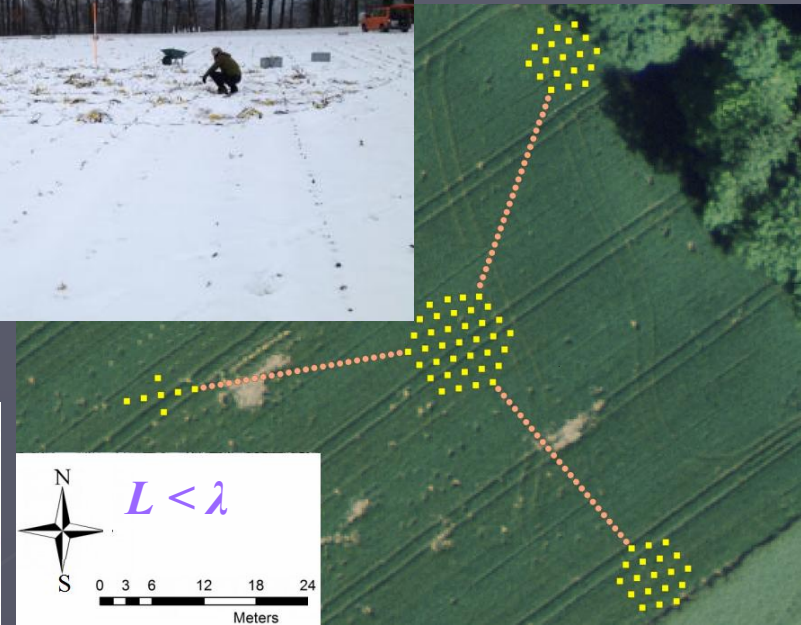


Сравнение записей C-II и UG1 установленных в одном месте (Новая Зеландия). Землетрясение на Фиджи 19 августа 2002 года, M7.7. C-II шумнее, т.к. меньше периметр.



Взаимосвязь между скоростью вращения и поперечным ускорением достаточно хорошая (например, коэффициент корреляции $> 0,95$), можно оценить фазовые скорости путем деления амплитуд пиков обеих трасс.

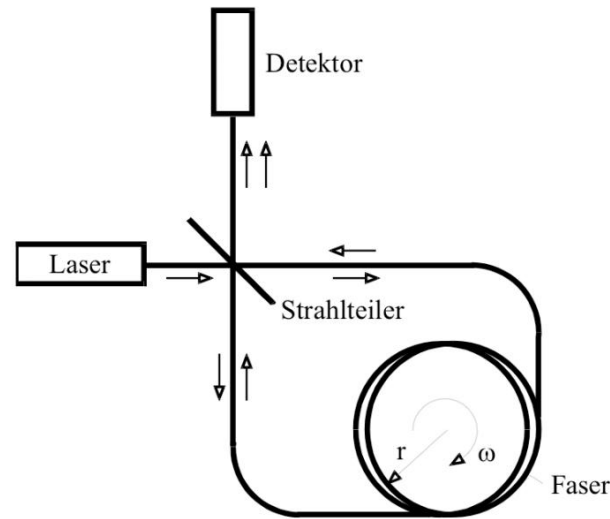
Малоаппертурная сейсмическая антенна



Сравнение записей скорости вращения кольцевым лазером и массивом сейсмометров. Землетрясение М6.3 Эль-Хосейма, Марокко, 24.02.2004



FOG = Fiber Optic Gyro
Sensitivity: $\approx 0.001^\circ/s$



FOSREM BB



BlueSies-3A



iXBlue

μ FORS-36m /-1

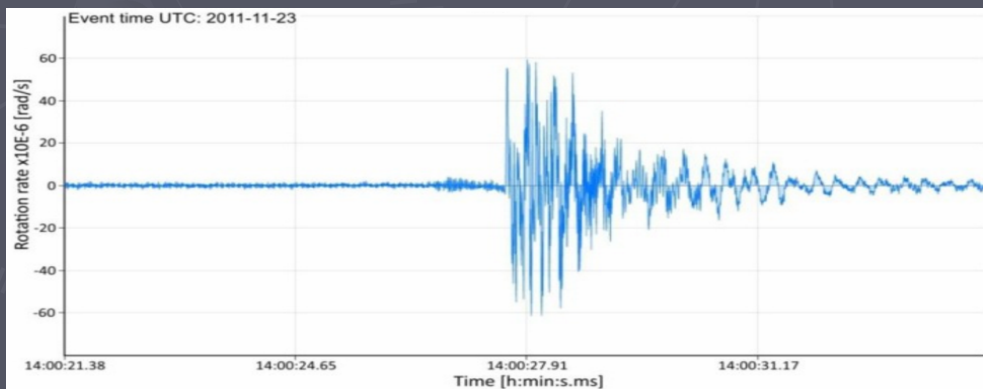
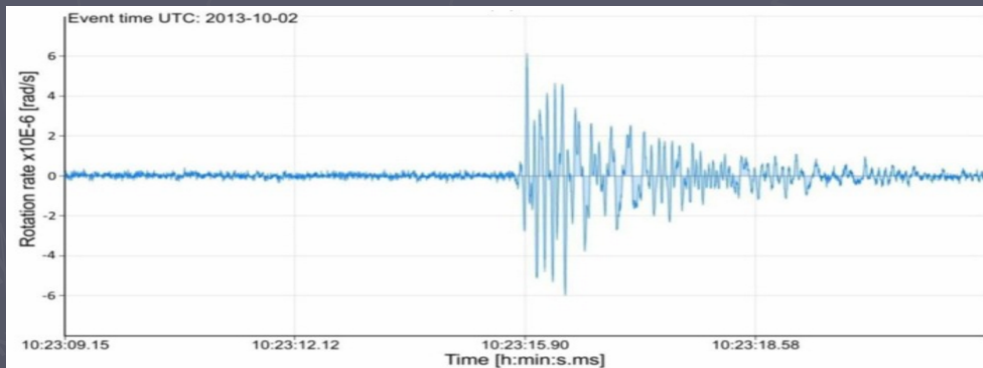
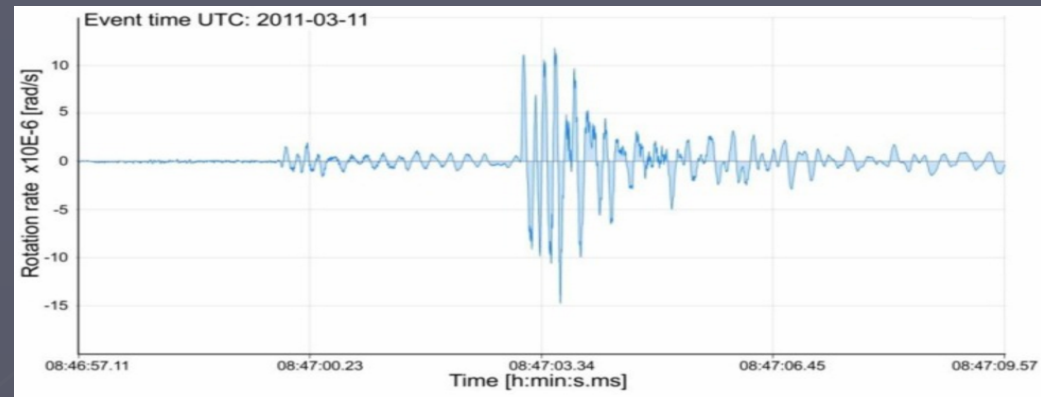


AFORS-1



Примеры записей вращательных движений сейсмических событий, зарегистрированных в Ксиге (Książ), Польша с помощью AFORS-1.

Землетрясение $M = 9,0$
в Японии 11.03. 2011



Ближние землетрясение
 $M = 2.3-3.3$
Любин, Польша

Сравнение волоконно-оптических датчиков и лазерного гироскопа с твердым периметром G-ring

Parameter	Unit	G-Ring	μ FORS-1	LCG ⁽¹⁾	AFORS-1	BlueSeis-3A
Axial		uniaxial	uniaxial	triaxial	uniaxial	triaxial
Sensitivity	rad/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$	9×10^{-11}	3×10^{-5}	6.3×10^{-7}	4×10^{-9}	2×10^{-8}
Maximum Rate	rad/s	1	17.5	No data	6.4×10^{-3}	0.1
Dyn. Range	dB	280	115	No data	124	135
Freq. Band	Hz	0.003–10	No data	DC–100	0.83–106.15	DC–100

Для улучшения характеристик используют

- катушки увеличенного диаметра (от 40 до 68 см),
- модифицированную квадрупольную намотку,
- длинное волокно (от 11 до 15 км),
- полое фотонно-кристаллическое волокно, для снижения нелинейных эффектов

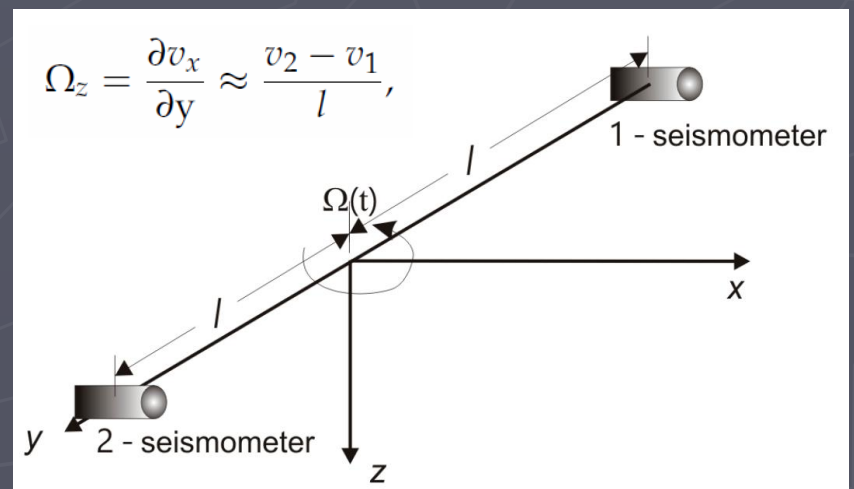
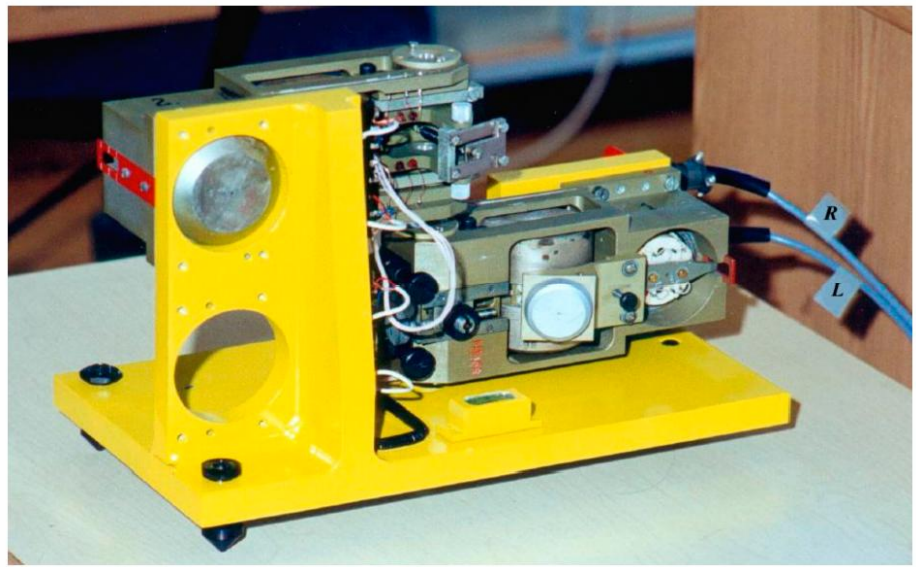
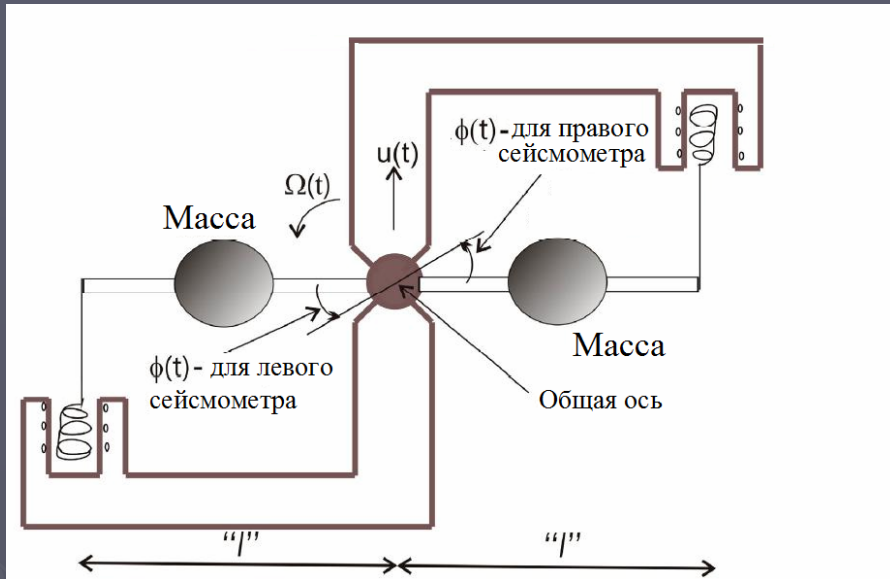
Последние разработки:
динамический диапазон
диапазон частот

$$1,13 \times 10^{-8} \text{ рад/с} \leq \Omega \leq \text{несколько рад / с}$$

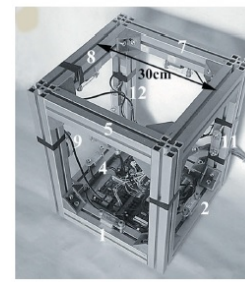
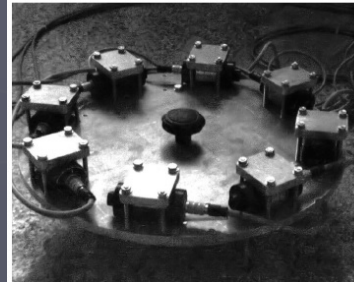
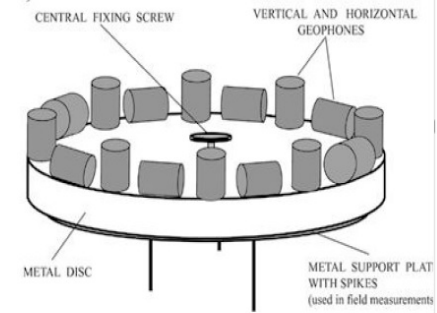
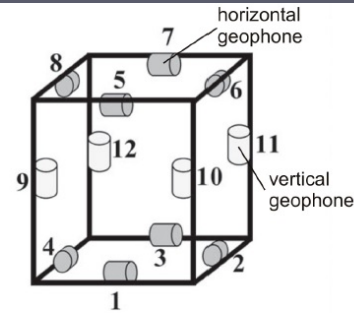
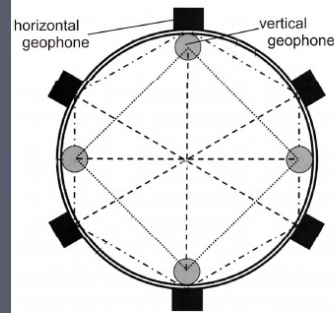
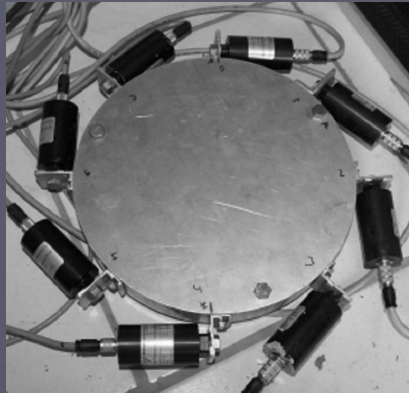
$$\text{DC} \leq f_s \leq 328,12 \text{ Гц}$$

Перспективная оценка максимальной чувствительности $5 \times 10^{-9} \text{ рад/с}$

Ротационный сейсмометр TAPS; $\phi(t)$ - угол поворота маятника



Rotaphone



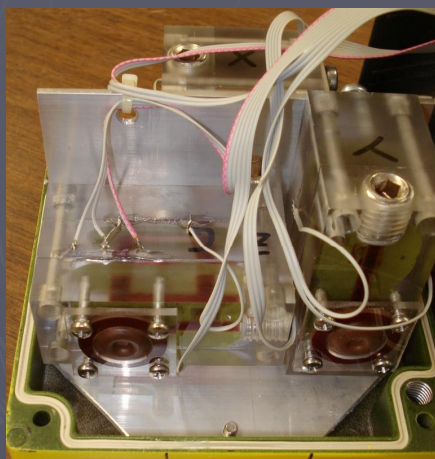
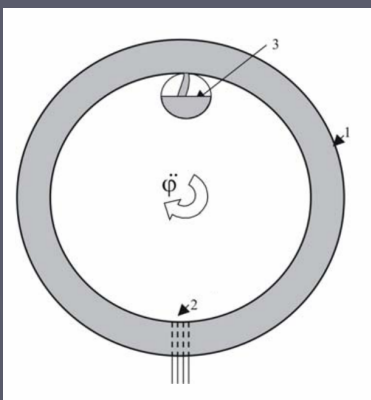
Близки к требованиям на приборы для инженерных приложений, но частотные диапазоны все еще слишком узкие

$$\Omega_x = \frac{\partial v_z}{\partial y} = -\frac{\partial v_y}{\partial z}, \quad \Omega_y = \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{\partial v_z}{\partial x}, \quad \Omega_z = \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{\partial v_y}{\partial x}$$

		TAPS	Rotaphone D (справа)
Частотный диапазон	Hz	7×10^{-1} –50	2–80 ⁽²⁾
Чувствительность	rad/s	1×10^{-7}	3.77×10^{-9}
Максимальная скорость	rad/s	1×10^{-1}	3.17×10^{-2}
Динамический диапазон	dB	120	120
Между парными датчиками	m	0.28	0.40
Operating temperature	°C	–10–45	–40–100 ⁽⁴⁾
Кол-во x тип датчика		$2 \times$ SM-3	$16 \times$ SM-6

Молекулярно-электронные датчики

Электрохимический преобразователь вращательных движений. 1 – корпус, 2 – преобразующая ячейка, 3 – расширительный объем

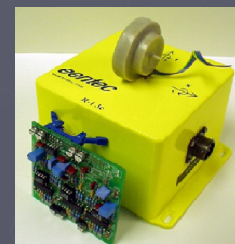


Реклама :

нечувствителен к линейным движениям;
нечувствителен к поперечным вращениям;
разрешение 3×10^{-7} рад / с² / Гц^{1/2};
динамическим диапазон > 120 дБ;
частотный диапазон 0,05-20 Гц.

На самом деле:

чувствителен к поперечным вращениям – 2%;
разрешение 6×10^{-5} рад / с²;
динамическим диапазон 80 дБ при $f > 1$ Гц
и т.д.



R-1

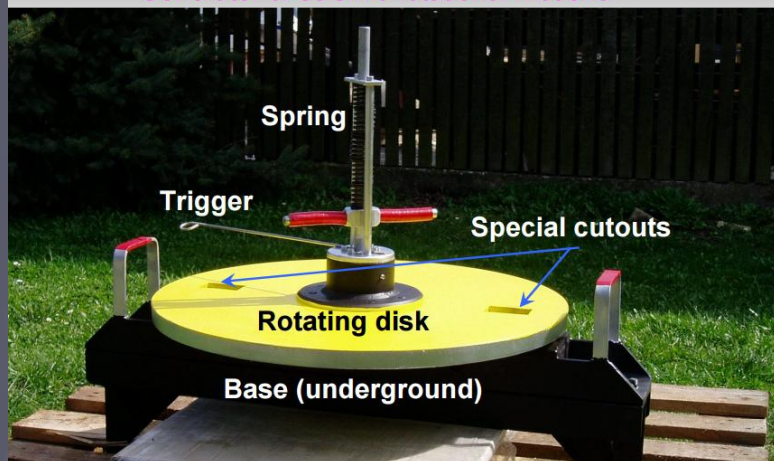


R-2

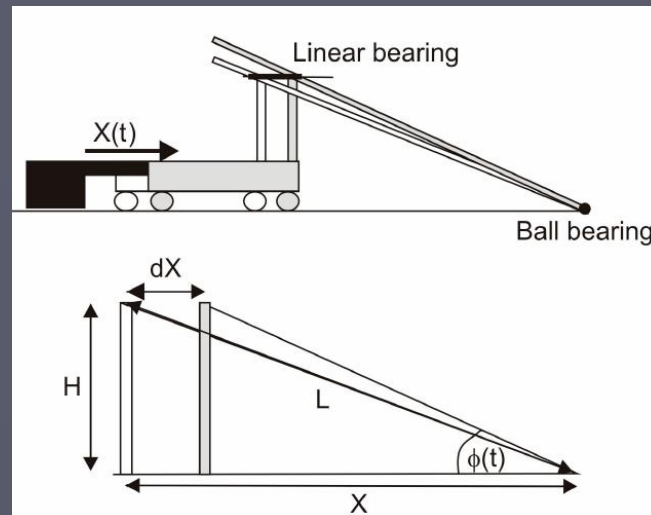


Многокомпонентный сейсмодатчик СМЕ-206С

Generator of seismic rotational motions



Málek, Brokešová, 2010



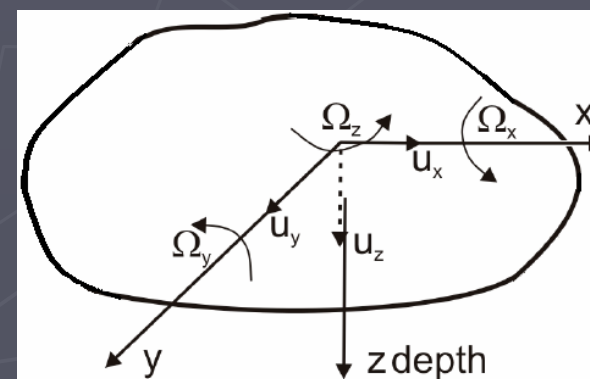
Jaroszewicz et al., 2016



Для понимания записанных вращательных данных необходимы:

- чувствительность, линейность и частотная характеристика;
- уровень клипа (подразумевает динамический диапазон датчика);
- чувствительность к поперечным движениям, как вращательным, так и поступательным;
- собственный шум и разрешение;
- чувствительность к температуре, давлению, напряжению питания и т.д.;
- стабильность характеристик во времени.

Надо создать модель низкого уровня шума «rLNM»



Вопросы

- ▶ Можно ли извлечь достоверную достаточно значимую информацию (об источнике или среде) из совместных измерений вращательных и линейных движений (по сравнению с обычными линейными измерениями)?
- ▶ В каких обстоятельствах достаточны вращения, вычисленные из данных массива сейсмометров?
- ▶ Как мы можем использовать горизонтальные компоненты вращения (наклоны) в дальних измерениях? Отражают ли они состояние грунта под датчиком?
- ▶ Почему движения вращения, наблюдаемые от локальных землетрясений в Японии и на Тайване, в 10-100 раз больше, чем выведенные из теоретических соображений? Чем на самом деле это обусловлено?
- ▶ Как разобраться в источниках, распространении и локальных эффектах от вращательных измерений в ближнем поле?
- ▶ Что можно узнать из измерений вращательного шума?
- ▶ Какова оптимальная конфигурация для установки вращательных датчиков в зданиях и сооружениях? Сколько их необходимо и где они должны быть установлены?
- ▶ Возможно ли разработать дешевые датчики вращательных движений удовлетворяющие запросам (телесеизмика, ближняя зона, исследование зданий и сооружений, сейсморазведка)?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ▶ Несмотря на недавние достижения, ротационная сейсмология является областью в зачаточном состоянии. Многие вопросы не решены потому, что наблюдения были очень редкими и некачественными. Мобильные датчики вращательного движения все еще далеки от идеала. Это остается главной преградой на ближайшие годы.
- ▶ Вращательные движения можно разделить на две группы: наблюдаемые на телесеismicких расстояниях и регистрируемые в ближней зоне.
- ▶ На больших расстояниях возможно использование обычной теории упругости. Здесь применимы кольцевые лазеры и сейсмические антенны. Это конечно весьма дорогостоящие методы и создать из них сеть проблематично. Но даже на основе единичных датчиков может быть получена интересная информация.
- ▶ В ближней зоне какие-либо достоверные выводы можно делать, только систематизировав большое количество данных. С другой стороны здесь амплитуды вращательных движений гораздо выше, и развертывание сетей, основанных на относительно недорогих датчиках возможно. Такие сети должны быть созданы в сейсмоопасных районах, где ожидаются сильные землетрясения. И не в одном, а в нескольких.
- ▶ Объективное и обоснованное рассмотрение таких сложных явлений, как вращательные деформации, возможно только на основе обширной регистрации крутильных колебаний при землетрясениях, а также вращательных деформаций грунтов и расположенных на них зданий.
- ▶ И окончательный вывод: Если какой-либо сейсмолог хочет заниматься интересным делом ближайшие лет двадцать – это один из возможных объектов его деятельности.

Литература

Интернет-ресурсы и ранние исследования

- ▶ <http://www.rotational-seismology.org/>
- ▶ Молекулярно-электронные сейсмические датчики вращательных колебаний METR-01/-03, METR-11/-13 и 6-ти компонентные сейсмические датчики CME-106C/206C <http://www.r-sensors.ru/ru/products/rotational/CME-206%D0%A1-rus/>
- ▶ Технология и применение гироскопов: обзор в промышленной перспективе <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/10/2284/htm>
- ▶ Portable sensor (iXBlue). <http://www.blueseis.com/>
- ▶ Igel H., Cochard A., Flaws A., Suryanto W., Schuberth B., Schreiber U., Pham Dinh Nguyen, Velikoseltsev A. Rotational Ground Motions: A New Observable for Seismology? http://eost.u-strasbg.fr/semipgs/pres_Heiner_Igel.pdf
- ▶ Igel H., Cochard A., Fichtner A., Flaws A., Schreiber U., Schuberth B., Suryanto W., Pham D.N., Velikoseltsev A., Vernon F., Wassermann J., Bernauer M., Bernauer F., Kurrle D. Low-Frequency Rotational Seismology: Observations with Ring Laser Technology/ Презентация. <https://slideplayer.com/slide/4601297/>
- ▶ Newmark N.M. Torsion in symmetrical buildings, Proc. Fourth World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile. 3.19-32. 1969.
- ▶ Richter, C.F. (1958). Elementary seismology, W.F. Freeman and Company, San Francisco, and Bailey Bros. & Swinfen Ltd., London
- ▶ Micropolar Elasticity / ed. W. Nowacki, W. Olszak. Springer-Verlag Wien. 1974. [10.1007/978-3-7091-2920-3](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2920-3)
- ▶ Droste, Z., and Teisseyre, R. (1976). Rotational and displacemental components of ground motion as deduced from data of the azimuth system of seismograph. Pub. Inst. Geophys. Polish Acad. Sci., 97, 157–166.
- ▶ Токмаков В.А., Харин Д.А. Об измерении поворотных колебаний сейсмическими приборами. В кн.: Сейсмические приборы. М., Наука, Вып. 12, с.57-59, 1979.
- ▶ Ковальчук М.Н., Левшенко В.Т., Тон Ю.Д., Шейн Б.Н. А.с.№828149 (СССР). Крутильный сейсмометр. Заявл. 15.06.79 № 2780727/1825; Опубл. в Б.И., № 17, 1981.
- ▶ Bouchon M, Aki K. 1982 Strain, tilt, and rotation associated with strong ground motion in the vicinity of earthquake faults. Bull. Seismol. Soc. Am. 72, 1717–1738.
- ▶ Лялин А.Е. О распространении поверхностных волн в среде Коссера / А.Е. Лялин, В.А. Пирожков, Р.Д. Степанов // Акустический журнал. — 1982. — Т. 28. — № 6. — С. 838–840.
- ▶ Гусев Г.А. Двухкоординатный наклومتر с емкостным преобразователем перемещений // Дисс. канд. физ.мат.н. по ВАК 01.04.12, Геофизика, Москва 1984.
- ▶ Agnew, D.C. (1986). Strainmeters and tiltmeters. Rev. Geophys., 24, 579-624.
- ▶ Грайзер В.М. Метод оценки наклонов земной поверхности по акселерограммам сильных движений. Вопросы инженерной сейсмологии Вып.29 М., с. 154-157, 1988.
- ▶ Линьков Е.М. Петрова Л.Н., Дунаев А.В. Наблюдения длиннопериодных колебаний Земли горизонтальным сейсмометром на антинаклонной платформе // Сейсмические приборы. Вып.21. -М.: Наука, 1990, С. 90-96.
- ▶ Козлов В.А., Матвеев В.М., Петькин Н.В., Ромашко Д.Н. Вращательная составляющая упругого волнового поля в ближней зоне точечного источника на поверхности // Прикладная механика и техническая физика. 1991. № 3. С. 130–134.
- ▶ Шнирман Г.Л. Астазирование маятников. — М.: Наука, 1992. — 165 с.
- ▶ Nigbor, R.L. (1994). Six-degree-of-freedom ground motion measurement. Bull. Seism. Soc. Am., 84, 1665–1669.
- ▶ Takeo M., Ito H.M. What can be learned from rotational motions excited by earthquakes? // Geophys. J. Int. 1997. V. 129. P.319–329.
- ▶ Bodin, P., Gombert, J., Singh, S.K., and Santoyo, M. (1997). Dynamic deformations of shallow sediments in the valley of Mexico, part I: Three dimensional strains and rotations recorded on a seismic array. Bull. Seism. Soc. Am., 87, 528–539.
- ▶ Eringen A.C. Microcontinuum Field Theories. I. Foundation and Solids/ A.C. Eringen. — Springer-Verlag New York, 1998. 319 p.
- ▶ Takeo, M. (1998). Ground rotational motions recorded in near-source region. Geophys. Res. Lett., 25(6), 789–792.
- ▶ Халчанский С.А. Проблема регистрации угловых перемещений в сейсмологии // Сейсмические приборы. Вып. 30. М.: ОИФЗ РАН, 1998. С. 80-82.
- ▶ Pancha A., Webb T.H., Stedman G.E., McLeod D.P., Schreiber K.U. Ring laser detection of rotations from teleseismic waves Geophys. Res. Lett., 27 (21), 3353-3556 (2000).
- ▶ Михайлов Д.Н. Тектонические волны ротационного типа с излучением сейсмических сигналов / Д.Н. Михайлов, В.Н. Николаевский // Физика Земли. — 2000. — № 10. — С. 3–10.
- ▶ Eringen A.C. Microcontinuum Field Theories I. Foundations and Solids / Springer Science+Business Media, LLC 2001. DOI [10.1007/978-1-4612-0555-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0555-5)
- ▶ Huang B.S. Evidence for azimuthal and temporal variations of the rupture propagation of the 1999 Chi-Chi Taiwan, earthquake from seismic data recorded by a dense array, Geophys. Res. Lett. 28. 3377-3380. 2001.
- ▶ Егупов К.В. Проблемы проектирования на сейсмостойкость протяженных и несимметричных сооружений // Сейсмостойкое строительство. 2000. № 1. С.23-30.
- ▶ Trifunac M.D., Todorovska M.I. A note on the useable dynamic range of accelerographs recording translation // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Volume 21, Issue 4, June 2001, Pages 275-286.
- ▶ Халчанский С.А. Проблема регистрации вращательного движения при землетрясении // Дис. по ВАК 25.00.10, кандидат технических наук 2001.
- ▶ Wielandt E. Seismometry / in International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part A. ed. William H.K. Lee, Paul Jennings, Carl Kisslinger, Hiroo Kanamori Academic press. 2002.

2003 – 2007 гг.

- ▶ Huang, B. S. (2003) .Ground rotational motions of the 1991 Chi-Chi, Taiwan, earthquake as inferred from dense array observations .Geophys .Res .Lett., 30(6), 1307–1310.
- ▶ Schreiber KU, Kugel T, Stedman GE (2003) Earth tide and tilt detection by a ring laser gyroscope.J Geophys Res 108(B2). doi:10.1029/2001JB000569
- ▶ Teisseyre R, Suchcicki J, Teisseyre KP, Wiszniowski J, Palangio P . (2003) Seismic rotation waves: basic elements of theory and recording .Annali di Geofisica 46 (4): 671–685.
- ▶ Igel H .Rotational motions induced by the M8.1 Tokachi-oki earthquake, September, 25, 2003 / H .Igel, U .Schreiber, A .Flaws, B .Schuberth, A .Velikoseltsev, A .Cochard.// Geophysical research letters .– 2005 .– Vol .32 .– L08309 .– P .1–5.
- ▶ Шебалин Н.В .Проблемы макросейсмологии .М.: Наука, 2003 .(Вычислительная сейсмология, Вып .34) .С .57–200.
- ▶ Grekova E.F .Wave propagation in rocks modeled as reduced Cosserat continuum / E.F .Grekova, G.C .Herman// Proceedings of 66th EAGE (European Association of Geoscientists and Engineers) conference, Paris .– 2004 .– P098 .– P .1–4.
- ▶ Spudich, P., and J. B. Fletcher (2008) .Observation and prediction of dynamic ground strains, tilts and torsions caused by the M 6.0 2004 Parkfield, California, earthquake and aftershocks derived from UPSAR array observations, Bull .Seismol .Soc .Am .98, no .4, 1898–1914, doi 10.1785/0120070157.
- ▶ Teisseyre R., J .Suchcicki, K .P .Teisseyre, J .Wiszniowski, Palangio P .Seismic rotation waves: basic elements of theory and recording // ANNALS OF GEOPHYSICS, VOL .46, N .4, August 2003, DOI: <https://doi.org/10.4401/ag-4375>
- ▶ Аносов Г.И., Константинова Т .Г., Делеменев И.Ф .Некоторые сведения о крутильных деформациях при землетрясениях в связи с развитием методов сейсмического микрорайонирования и усиления зданий .В кн.: Вихри в геологических процессах .Изд .КГПУ .Петропавловск-Камчатский .2004 .С.246-252.
- ▶ Дроздук В.Н .Кручение зданий при землетрясениях // Вихри в геологических процессах (ред .А.В .Викулин) .Петропавловск-Камчатский: КГПУ .2004 .С .257-259.
- ▶ Graizer V.M .Effect of tilt on strong motion data processing // Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 (2005) 197–204.
- ▶ Schreiber, K .U., Igel, H., Cochard, A., Velikoseltsev, A., Flaws, A., Schuberth, B., Drewitz, W., and Müller, F .(2005) .The GEOsensor project: rotations — a new observable for seismology .In: Flury, Rummel, J., R., Reigber, C., and Rothacher, M .(ed.), Observation of the Earth System from Space .Heidelberg: Springer Verlag, 1–19.
- ▶ Igel, H., Schreiber, U., Flaws, A., Schuberth, B., Velikoseltsev, A., and Cochard, A .(2005) .Rotational motions induced by the M8.1 Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003 .Geophys .Res .Lett., 32: L08309, doi:10.1029/2004GL022336.
- ▶ Jaroszewicz LR., Krajewski Z., Solarz L., Teisseyre R .Apphcaton of the FORS-II for investigation of the seismic rotational waves // Proc SPIE 5774 .2005 .375-393.
- ▶ Викулин А.В .Крутильные сейсмические колебания и их регистрация // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии .Выпуск 3 .Материалы Всероссийского совещания «Современная геодинамика и сейсмичность Центральной Азии: фундаментальный и прикладной аспекты» .Иркутск, ИЗК СО РАН, 2005 .С .180-181.
- ▶ Кулеш М.А .Построение и анализ аналитического решения для поверхностной волны Рэлея в рамках континуума Коссера / М.А .Кулеш, В.П .Матвеев, И.Н .Шардаков// Прикладная механика и техническая физика .– 2005 .– Т .46 .– № 4 .– С .116–124.
- ▶ Buret T., Ramecourt D., Honthaas J., Paturel Y., Willemenot E., Gaiffe T. Fibre optic gyroscopes for space application // Optical Fiber Sensors. OSA Technical Digest (CD). Paper MC4.
- ▶ Cochard A., Igel H., Schuberth B., Suryanto W., Velikoseltsev A., Schreiber U., Wassermann J., Scherbaum F., Vollmer D .Rotational motions in seismology: theory, observation, simulation // Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotational Effects / Eds .R .Teisseyre et al .Springer Verlag, 2006 .P.391–411.
- ▶ Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / Eds .R .Teisseyre, M .Takeo, E .Majewski .Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006 .582 p.
- ▶ Graizer V.M .Tilts in Strong Ground Motion // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol .96, No .6, pp .2090–2102, December 2006 doi: 10.1785/0120060065
- ▶ Jaroszewicz LR., Krajewski Z., Solarz L., Teisseyre R .Apphcaton of the fiber-optic Sagnac interferometer in the investigation of the seismic rotational waves // Meas Sci Technol .2006 .17: 4, 1186-1193.
- ▶ Majewski E .Seismic rotation waves: Spin and twist solitons .In Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects, ed. Teisseyre R., Takeo M., Majewski E.. 255–272. Berlin: Springer.
- ▶ Majewski E .Rotational energy and angular momentum of earthquakes // Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / Eds .R .Teisseyre, M .Takeo, E .Majewski .Springer Verlag, Berlin, 2006a, p .216–225.
- ▶ Schreiber KU, Stedman G, Igel H, Flaws A (2006) Ring laser gyroscopes as rotation sensors for seismic wave studies .In: Teisseyre R, Takeo M, Majewski E (eds) Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects .Springer, Berlin, pp 377–390.
- ▶ Suryanto, W., Igel, H., Wassermann, J., Cochard, A., Schuberth, B., Vollmer, D., Scherbaum, F., Schreiber, U., and Velikoseltsev, A .(2006) .First comparison of array-derived rotational ground motions with direct ring laser measurements .Bull .Seism .Soc .Am., 96, 2059–2071.
- ▶ Teisseyre R, Takeo M, Majewski E (eds) .2006 Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects .Berlin, Germany: Springer.
- ▶ Trifunac, M .D .(2006) .Effects of torsional and rocking excitations on the response of structures .In: Teisseyre, R., Takeo, M .and Majewski, E .(ed.), Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects, p .569–582, Springer Verlag, Heidelberg.
- ▶ Vikulin A.V .Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model // Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / Eds .R .Teisseyre, M .Takeo, E .Majewski .Berlin Heidelberg New York: Springer, 2006 .P .273-289.
- ▶ Кулеш М .А .О распространении упругих поверхностных волн в среде Коссера // Акустический журнал .– 2006 .– Т .52 .– № 2 .– С .227–235.
- ▶ Igel H, Cochard A, Wassermann J, Flaws A, Schreiber U, Velikoseltsev A, Dinh N.P .Broad-band observations of earthquake-induced rotational ground motions .// Geophys .J .Int .2007 .168(1), 182–196 . doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03146.x
- ▶ Rotational Seismology and Engineering Applications - Online Proceedings for the First International Workshop: Menlo Park, California, U.S.A., Open-File Report 2007-1144, USGS Publication, Edited by: William H K .Lee , Mehmet Celebi , Maria I .Todorovska , and Michael F .Diggles, 2007. Workshop 2007. <https://pubs.usgs.gov/of/2007/1144/WorkshopReport.pdf>
- ▶ Rotational Seismology and Engineering Applications: Proceedings for the First International Workshop Menlo Park, California, U.S.A, Open-File Report 2007-1144 (version 2.0), USGS Publ., 2007; <https://pubs.usgs.gov/of/2007/1144/WorkshopReport.pdf>
- ▶ Teisseyre R .Rotations and Micro-Motions in Seismic Wave Field: from Asymmetric Continuum to Relativity Theory // в сб. Ротационные процессы в геологии и физике / Отв .ред .Е.Е .Милановский .М.: КомКнига, 2007, с .189-209.
- ▶ Викулин А.В .Циркулярнополяризованные (спиновые) волны в литосфере // // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России .Труды региональной научно-технической конференции, 11 – 17 ноября 2007 г .Петропавловск-Камчатский, том 1 .Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН .2008 .С .55-58.
- ▶ Кулеш М.А .Дисперсия и поляризация поверхностных волн Рэлея для среды Коссера / М.А .Кулеш, В.П .Матвеев, И.Н .Шардаков // Известия РАН .Механика твердого тела .– 2007 .– № 4 .– С .100–113.

2008 – 2009 гг.

- ▶ Jaroszewicz L.R., Wiszniowski J. (2008) Measurement of Short-Period Weak Rotation Signals .In: Teisseyre R., Nagahama H., Majewski E. (eds) Physics of Asymmetric Continuum: Extreme and Fracture Processes .Springer, Berlin, Heidelberg.
- ▶ Rabeendran N .A Study of Ring Laser Gyroscopes / A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science .University of Canterbury, 2008, 88p.
- ▶ Spudich, P., and Fletcher J .B .Observation and prediction of dynamic ground strains, tilts and torsions caused by the M 6.0 2004 Parkfield, California, earthquake and aftershocks derived from UPSAR array observations // BSSA, 2008, 98 (4), P .1898–1914.
- ▶ Teisseyre, R., Nagahama, H., and Majewski, E. (editors) (2008) .Physics of Asymmetric Continua: Extreme and Fracture Processes: Earthquake Rotation and Soliton Waves .Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- ▶ Trifunac, M .D. (2008) .Buildings as sources of rotational waves .In Physics of Asymmetric Continua: Extreme and Fracture Processes, ed .R .Teisseyre, H .Nagahama, and E .Majewski, chapter I.5 .Berlin & Heidelberg: Springer-Verlag.
- ▶ Викулин А.В .Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика, 2008, т .49 (6), с .559—570.
- ▶ Гравиров В.В .Экспериментальные результаты регистрации наклонов почвы атмосферного происхождения гиронаклономером типа KST-1. // Естественные и технические науки.- М.: Спутник+, 2008, № 6, с.159-160.
- ▶ Кулеш М.А., Матвеев В.П., Шардаков И.Н .ВОЛНЫ В УПРУГОЙ СРЕДЕ КОССЕРА //Математическое моделирование систем и процессов .2008 .№16, с .64-75.
- ▶ Ротационные процессы в геологии и физике / Отв .ред .Е.Е .Милановский .М.: КомКнига, 2007 .528 с.
- ▶ Bernauer M., Fichtner A., and Igel H .Inferring earth structure from combined measurements of rotational and translational ground motions // Geophysics, Vol .74, No .6 November-December 2009; P .Wcd41–Wcd47, 8 Figs .10.1190/1.3211110 http://www.geo.uu.nl/~fichtner/papers/2009_fichtner_Geophysics.pdf
- ▶ Ferreira A., Igel H .Rotational motions of seismic surface waves in a laterally heterogeneous earth // Bull .Seismol .Soc .Amer .2009 .V .99 .P.1429–1436.
- ▶ Fichtner, A., and Igel, H. (2009) .Sensitivity densities for rotational ground-motion measurements .Bull .Seism .Soc .Am., 99(2B), 1302–1314.
- ▶ Graizer, V. (2009) .Tutorial on measuring rotations using multipendulum systems .Bull .Seism .Soc .Am., 99(2B), 1064–1072.
- ▶ Gravirov V.V .Application of Optimal Filters for Detecting Seismic Signals from Long-Period Channel of Girotiltmeter // Seismicheskie Pribori (Seismic Instruments), 2009, 45(1), P .23-33.
- ▶ Knopoff L., Yun-Tai Chen Single-Couple Component of Far-Field Radiation from Dynamical Fractures Bulletin of the Seismological Society of America May 01, 2009, Vol.99, 1091-1102 .
- ▶ Kozák, J .T .Tutorial on earthquake rotational effects: historical examples // BSSA, 2009, 99 (2B), P .998–1010.
- ▶ Lantz B., Schofield R., O'Reilly B., Clark D.E., DeBra D .Review: Requirements for a ground rotation sensor to improve advanced LIGO // BSSA, 2009, 99, 980–989.
- ▶ Lee W .H .K ., Huang B.-S ., Langston C .A., Lin C.-J ., Liu C.-C ., Shin T.-C., Teng T.-L ., Wu C.-F .Review: Progress in Rotational Ground-Motion Observations from Explosions and Local Earthquakes in Taiwan // Bulletin of the Seismological Society of America (2009) 99 (2B): 958-967. doi:10.1785/0120080205
- ▶ Lee W .H .K, Celebi M., Todorovska M .I., Igel H .Introduction to the Special Issue on Rotational Seismology and Engineering Applications // BSSA, 2009, 99 (2B), P .945–957. doi:10.1785/0120080344
- ▶ Lee WHK, Igel H, Trifunac MD .2009 Recent advances in rotational seismology .Seismol .Res.Lett .80, 479–490 .doi:10.1785/gssrl.80.3.479
- ▶ Liu C.-C., Bor-Shouh Huang, William H .K .Lee, Lin C .J .Observing Rotational and Translational Ground Motions at the HGSD Station in Taiwan from 2007 to 2008 // BSSA .99(2B):1228-123 DOI:10.1785/0120080156
- ▶ Majewski E .Spinors and Twisters in the Description of Rotational Seismic Waves and Spin and Twist Solitons // Bulletin of the Seismological Society of America May 01, 2009, Vol.99, 1137-1146.
- ▶ Nigbor R.L., Evans J.R., Hutt C.R .Laboratory and Field Testing of Commercial Rotational Seismometers // BSSA, 2009, 99, P .1215-1227.
- ▶ Pham N., Igel H., Wassermann J., Cochard A., Schreiber U .The effects of tilt on interferometric rotation sensors // Bull .Seismol .Soc .Amer .2009 .V .99 .P.1352–1365.
- ▶ Pujol J .Tutorial on Rotations in the Theories of Finite Deformation and Micropolar (Cosserat) Elasticity // Bulletin of the Seismological Society of America May 01, 2009, Vol.99, 1011-1027.
- ▶ Rotational seismology and engineering applications / Eds .W.H.K .Lee, M .Celebi, M.I .Todorovska, H .Igel .Bull .Seismol .Soc .Am., Spec .Issue, 2009, v .99, 1486 p.
- ▶ Schreiber K .U., Velikoseltsev A., Carr A .J., Franco-Anaya R .The Application of Fiber Optic Gyroscopes for the Measurement of Rotations in Structural Engineering // BSSA., 2009, 99, P .1207-1214.
- ▶ Stupazzini M, de la Puente J, Smerzini C, Käser M, Igel H, Castellani A .2009 Study of rotational ground motions in the near-field region .Bull .Seismol .Soc .Am .99, 1271–1286 . doi:10.1785/0120080153
- ▶ Stupazzini, M., de la Puente J., Smerzini C., Käser M., Igel H., Castellani A .Study of rotational ground motion in the near-field region // BSSA, 2009, 99 (2B), P .1271–1286.
- ▶ Stupazzini, M., J .de la Puente, C .Smerzini, M .Käser, H .Igel, and A .Castellani (2009) .Study of rotational ground motion in the near-field region, Bull .Seismol .Soc .Am .99, no .2B, 1271–1286.
- ▶ Takeo, M. (2009) .Rotational motions observed during an earthquake swarm in April, 1998, at offshore Ito, Japan .Bull .Seism .Soc .Am., 99(2B), 1457–1467.
- ▶ Trifunac M .D., The role of strong motion rotations in the response of structures near earthquake faults, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.29 (2009) 382-393.
- ▶ Twiss R.J .An Asymmetric Micropolar Moment Tensor Derived from a Discrete-Block Model for a Rotating Granular Substructure // .Bulletin of the Seismological Society of America May 01, 2009, Vol.99, 1103-1131.
- ▶ Wang H., Heiner Igel, František Gallovič, and Cochard A .Source and Basin Effects on Rotational Ground Motions: Comparison with Translations // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol .99, No .2B, pp .1162–1173, May 2009, doi: 10.1785/0120080115
- ▶ Wang H., Igel H., Gallovič F., and Cochard A .Source and Basin Effects on Rotational Ground Motions: Comparison with Translations // BSSA, 2009, 99 (2B), P .1162–1173. doi:10.1785/0120080115
- ▶ Wu CF, Lee WHK, Huang HC .2009 Array deployment to observe rotational and translational ground motion along the Meishan fault, Taiwan: a progress report .Bull .Seismol .Soc .Am .99, 1468–1474 . doi:10.1785/0120080185
- ▶ Гарагаш И.А., Николаевский В.Н .Механика Коссера для наук о Земле // Вычислительная механика сплошных сред, 2009, т .2, № 4, с .44—66.
- ▶ Гравиров В.В .Методы уменьшения помех сейсмического гиронаклономера // Дисс.канд физ.мат.н .по ВАК 25.00.10, Москва 2009.

2010– 2012 гг.

- ▶ 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague October 10–13, 2010.
- ▶ Castellani, A., and Guidotti, R. (2010). Free field rotations: Relevance on buildings in near field. Second IWGoRS Workshop, October 11-13, Prague, Czech Republic. [Presentation file available at: <http://karel.troja.mff.cuni.cz/~vackar/IWGoRS/Castellani.pdf>, last accessed 08.03.2020]
- ▶ Chayamghamian M.R. Torsional motion due to small-scale geological irregularity // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague, 2010, P. 39-40.
- ▶ Falamarz-Sheikhabadi M.R., Ghafory-Ashtiany M. Rotational Component Effects in Modern Seismic Codes // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague, 2010, P.28-29.
- ▶ Gaebler P. Phase velocity and source direction estimation using collocated measurements // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague, 2010, P. 24-25.
- ▶ Graizer V. (2010). Strong Motion Recordings and Residual Displacements: What Are We Actually Recording in Strong Motion Seismology? Seism. Res. Lett., 81, 635-639.
- ▶ Gravurov V.V. Optimal Filters Application for Allocation of Seismic Signals in Long Period Channel of the Gyrotiltmeter // Seismic Instruments, 2010, Vol. 46, No. 1, pp. 13–20.
- ▶ Grekova E. Nonlinear isotropic elastic reduced Cosserat continuum as a possible model for geomedium. Spherical prestressed state // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague October 10–13, 2010, p.33-35.
- ▶ Igel H., Kurrle D., Ferreira A., Wassermann J., Gaebler P., Schreiber U. Observations of Long-Period Rotational Ground Motions: From ambient noise to Earth's Free Oscillations // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague, 2010, P.36-37.
- ▶ Kurrle, D., Igel, H., Ferreira, A. M. G., Wassermann, J., and Schreiber, U. (2010). Can we estimate local Love wave dispersion properties from collocated amplitude measurements of translations and rotations? .Geophys. Res. Lett., 37, L04307, doi:10.1029/2009GL042215.
- ▶ Lin, C. J., Huang, H. P., Liu, C. C., and Chiu, H. C. (2010). Application of Rotational Sensors to Correcting Rotation-Induced Effects on Accelerometers. Bull. Seism. Soc. Am., 100, 585 - 597.
- ▶ Teisseyre R. Why Rotation Seismology: Confrontation between Classic and Asymmetric Theories // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague, 2010, P. 8.
- ▶ Málek J., Brokešová J. GENERATOR OF SEISMIC ROTATIONAL MOTIONS // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Masaryk's College, Prague, 2010
- ▶ Spudich P., Fletcher J.B. Observation and Prediction of Dynamic Ground Strains, Tilts, and Torsions Caused by the Mw 6.0 2004 Parkfield, California, Earthquake and Aftershocks, Derived from UPSAR Array Observations // Bulletin of the Seismological Society of America. V. 98 (4). P. 1898–1914. doi: <https://doi.org/10.1785/0120070157>
- ▶ Teisseyre R. Why Rotation Seismology: Confrontation between Classic and Asymmetric Theories // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague October 10–13, 2010, p. 8.
- ▶ Yang Z., Chen Y. Current Status of Rotational Seismology Studies in PKUCEA Joint Research Center of Modern Seismology of China Theories // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague, 2010, P.24.
- ▶ Zembaty Z. On a possibility of acquiring strong motion rotation from rockburst effects // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Programme & Abstracts. Masaryk's College, Prague, 2010, P. 27-28.
- ▶ Agafonov V.M., Neumoin K.A., Safonov M.V. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow. 6th European Workshop on the seismic behaviour of Irregular and Complex Structures (6EWICS) O. Lavan, M. De Stefano (eds.) Haifa, Israel, 2011.
- ▶ Lin CJ, Huang H-P, Pham ND, Liu C-C, Chi W-C, Lee WHK. 2011 Rotational motions for teleseismic surface waves. Geophys. Res. Lett. 38, L15301 doi:10.1029/2011GL047959
- ▶ Chi, W. C., Lee, W. H. K., Lin, C. J., and Liu, C. C. (2011). Inversion of ground motion data from a seismometer array using a modification of Jeager's method // Bulletin of the Seismological Society of America(2011),101(6):3105 <http://dx.doi.org/10.1785/0120100204>
- ▶ Igel, H., Nader, M. F., Kurrle, D., Ferreira, A. M., Wassermann, J., & Schreiber, K. U. (2011). Observations of Earth's toroidal free oscillations with a rotation sensor: The 2011 magnitude 9.0 Tohoku Oki earthquake // Geophysical Research Letters, 38(21).
- ▶ Merkel, A.; Tournat, V.; Gusev, V. Experimental evidence of rotational elastic waves in granular photonic crystals. Phys. Rev. Lett. 2011, 107, 225502.
- ▶ Schreiber, K. U., Velikoseltsev, A., Bosse, H., and Krause, M. (2011). The comparison of μ FORS and R-1 rotation sensors, unpublished report.
- ▶ Basu D, Whittaker AS, Constantinou MC (2012) Estimating rotational components of ground motion using data recorded at a single station. J Eng Mech ASCE 138(9):1141–1156.
- ▶ Belfi J., Beverini N., Carelli G., Di Virgilio A., Maccioni E., Saccorotti G., Stefani F., Velikoseltsev A. Horizontal rotation signals detected by "G-Pisa" ring laser for the Mw=9.0, March 2011, Japan earthquake // J. Seismol. 2012. DOI 10.1007/s10950-012-9276-9.
- ▶ Bernauer, M., Fichtner, A., & Igel, H. (2012). Measurements of translation, rotation and strain: new approaches to seismic processing and inversion. Journal of seismology, 16(4), 669-681.
- ▶ Brokesova J, Malek J, Kolinsky P. 2012 Rotaphone, a mechanical seismic sensor system for field rotation rate measurements and its in situ calibration. J. Seismol. 16, 603–621. doi:10.1007/s10950-012-9274-y
- ▶ Falamarz-Sheikhabadi M. R., Ghafory-Ashtiany M. Approximate formulas for rotational effects in earthquake engineering, Journal of Seismology, Vol.16 (2012) 815-827.
- ▶ Grekova E.F. Nonlinear isotropic elastic reduced Cosserat continuum as a possible model for geomedium and geomaterials. Spherical prestressed state in the semilinear material // Journal of Seismology, 2012, 16(4), P. 695–707.
- ▶ Hadziioannou C, Gaebler P, Schreiber U, Wassermann J, Igel H (2012) Examining ambient noise using collocated measurements of rotational and translational motion. J Seismol 16(4):787–796.
- ▶ Leugoud R.J., Kharlamov A.V. Second generation of a rotational electrochemical seismometer using magnetohydrodynamic technology // J Seism. Soc. 2012, 16, P. 587–593.
- ▶ Lee, W. H. K., Evans, J. R., Huang, B.-S., Hutt, C. R., Lin, C.-J., Liu, C.-C., Nigbor, R. L. (2012): Measuring rotational ground motions in seismological practice. - In: Bormann, P. (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1-27. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_5.3
- ▶ Li, S., Lai, X., Sun, Y. et al. Calculation of ground rotational motions using seismic array data. J. Earth Sci. 23,173–179 (2012). <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0242-9>
- ▶ Málek J., Brokešová J. Generator Of Seismic Rotational Motionsrotational Motions // 2nd International workshop on Rotation Seismology and Engineering Applications. Masaryk's College, Prague, 2010. <http://karel.troja.mff.cuni.cz/~vackar/IWGoRS/Malek.pdf>
- ▶ Великосельцев А.А., А.М. Боронахин, Ткаченко А.Н. Использование оптических датчиков угловой скорости для измерения вращательного движения в сейсмологии // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48, № 3, с.61-74.

2013– 2018 гг.

- ▶ Basu D, Whittaker AS, Constantinou MC (2013) Extracting rotational components of earthquake ground motion using data recorded at multiple stations .Earthq Eng Struct Dyn 42:451–468.
- ▶ Brokešová J., Málek J .Rotaphone, a self-calibrated six-degree-of-freedom seismic sensor and its strong-motion records // Seismol .Res .Lett .2013, 84, P .737–744.
- ▶ Chiu, C.K., Hsiao, F.P. and Jean, W.Y .(2013) .“A novel life time cost-benefit analysis method for seismic retrofitting of low-rise reinforced concrete buildings”, Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, Vol .9, No .9, pp .891–902.
- ▶ Schreiber, K. U., & Wells, J .P .R.(2013) .Invited review article: Large ring lasers for rotation sensing .Review of Scientific Instruments, 84(4), 041101.
- ▶ Bernauer, M., Fichtner, A., & Igel, H .(2014) .Reducing nonuniqueness in finite source inversion using rotational ground motions .Journal of Geoph. Research: Solid Earth, 119(6), 4860-4875.
- ▶ Prossidings of the Royal Society A 8 December 2015 Volume 471, issue 2184 Proc .R .Soc .A 2015 471 20140997; DOI: [10.1098/rspa.2014.0997](https://doi.org/10.1098/rspa.2014.0997) .Published 2 December 2015. Opposite sense ground rotations of a pair of Cavendish balances in earthquakes <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/471/2184/20140997>
- ▶ Великосельцев А.А., Лукьянов Д.П., Виноградов В.И., Шрайбер К.-У .Современное состояние и перспективы развития сверхбольших оптических гироскопов для применения в геодезии и сейсмологии // Квантовая электроника, 2014, том 44, номер 12, 1151–1156/ <http://mi.mathnet.ru/ge16076>
- ▶ Bourdillon A., Ropars G., Gaffet S., Floch A. L .Opposite sense ground rotations of a pair of Cavendish balances in earthquakes // Prossidings of the Royal Society A, 2015, Volume 471, issue 2184 .A 471: 20140997. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2014.0997>
- ▶ Gaebler, P .J., Sens-Schönfelder, C., & Korn, M .(2015) .The influence of crustal scattering on translational and rotational motions in regional and teleseismic coda waves .GJI, 201(1), 355-371.
- ▶ Igel H., Bernauer M., Wassermann J., Schreiber K.U .(2015) Seismology, Rotational, Complexity .In: Meyers R .(eds) Encyclopedia of Complexity and Systems Science .Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_608-1
- ▶ Tanimoto, T., Hadziioannou, C., Igel, H., Wasserman, J., Schreiber, U., & Gebauer, A .(2015) .Estimate of Rayleigh to Love wave ratio in the secondary microseism by collocated ring laser and seismograph // Geophysical Research Letters, 42(8), 2650-2655.
- ▶ Donner, S., Bernauer, M., & Igel, H .(2016) Inversion for seismic moment tensors combining translational and rotational ground motions .Geophysical Journal International, 207(1), 562-570.
- ▶ Jaroszewicz L.R., Kurzych A., Krajewski Z., Marć P., Kowalski J.K., Bobra P., Zembaty Z., Sakowicz B., Jankowski R .Review of the Usefulness of Various Rotational Seismometers with Laboratory Results of Fibre-Optic Ones Tested for Engineering Applications // Sensors, 2016, 16(12), 2161, 22p. doi:10.3390/s16122161
- ▶ Lindner, F., Wassermann, J., Schmidt Aursch, M .C., Schreiber, K .U., & Igel, H .(2016) .Seafloor Ground Rotation Observations: Potential for Improving Signal to Noise Ratio on Horizontal OBS Components // Seismological Research Letters.
- ▶ Lombardi AM, Cucci L, Tertulliani A (2016) The first world catalog of earthquake-rotated objects (EROs), part II: statistical analyses and related interpretations .Bull Seismol Soc Am .,106(2):386 .
- ▶ Reinwald, M., Bernauer, M., Igel, H., & Donner, S .(2016) .Improved finite-source inversion through joint measurements of rotational and translational ground motions: a numerical study .Solid Earth, 7(5), 1467.
- ▶ Sollberger, D., Schmelzbach, C., Van Renterghem, C., Robertsson, J., & Greenhalgh, S .(2016) .Singlecomponent elastic wavefield separation at the free surface using source-and receiver-side gradients .In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016 (pp .2268-2273) .Society of Exploration Geophysicists.
- ▶ Sollberger, D., Schmelzbach, C., Robertsson, J .O., Greenhalgh, S .A., Nakamura, Y., & Khan, A .(2016) .The shallow elastic structure of the lunar crust: New insights from seismic wavefield gradient analysis .Geophysical Research Letters, 43(19).
- ▶ Tanimoto, T., Lin, C .J., Hadziioannou, C., Igel, H., & Vernon, F .(2016) .Estimate of Rayleigh to Love wave ratio in the secondary microseism by a small array at Piñon Flat observatory, California .Geophysical Research Letters, 43(21).
- ▶ Wassermann, J., Wietek, A., Hadziioannou, C., & Igel, H .(2016) .Toward a Single Station Approach for Microzonation: Using Vertical Rotation Rate to Estimate Love Wave Dispersion Curves and Direction Finding .// Bulletin of the Seismological Society of America.
- ▶ Строительный ресурс. Вращательные движения грунта. 16.08.2016. <http://spb-sovtrans.ru/prikladnaya-seysmologiya/848-vraschatelnye-dvizheniya-grunta.html>
- ▶ Marañó S., Hobiger M., Fäh D .Retrieval of Rayleigh Wave Ellipticity from Ambient Vibration Recordings // Geophys .J .Int .(2017), 209 (1): 334–352.
- ▶ Passaro V.M.N., Antonello Cuccovillo , Lorenzo Vaiani , Martino De Carlo and Campanella C .E .Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective //Sensors 2017, 17(10), 2284; <https://doi.org/10.3390/s17102284>
- ▶ Salvermoser, J., Hadziioannou, C., Hable, S., Krischer, L., Chow, B., Ramos, C., Wassermann, J., Schreiber, U., Gebauer, A & Igel, H .(2017) .An event database for rotational seismology .Seismological Research Letters.
- ▶ van der Baan M .Tutorial on rotational seismology and its applications in exploration geophysics // GEOPHYSICS .2017 Volume 82, Issue 5 <https://doi.org/10.1190/geo2016-0497.1>
- ▶ Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Ляблин М.В., Плужников А.А., Ди Джироламо Б., Гайде Ж.-Кр., Мергельюль Д .Компенсация углового шумового колебания лазерного луча в прецизионном лазерном инклинометре // Письма ЭЧАЯ .2017 .Т .14 .С .661—672
- ▶ Азарян Н.С., Будагов Ю.А., Ляблин М.В., Плужников А.А., Ди Джироламо Б., Гайде Ж.-Кр., Мергельюль Д .Определение максимальной частоты угловых колебаний поверхности Земли, регистрируемых прецизионным лазерным инклинометром // Дубна: ОИЯИ .- 2017 .- 13, Препринт; P13-2017-35.
- ▶ Рутман Ю.Л., Симборт Э., Бондарев Д.Е Анализ динамики сейсмоизолированного сооружения с учетом его крутильных колебаний // Вестник гражданских инженеров, номер: 2 (61) год: 2017 страницы: 112-118.
- ▶ "Lord of the Rings", Science 21 Apr 2017: Vol .356, Issue 6335, pp .236-238 DOI: 10.1126/science.356.6335.236 <http://science.sciencemag.org/content/356/6335/236>
- ▶ Aleshin I .M., S .D .Ivanov, V .N .Koryagin, Y .O .Kuzmin, F .V .Perederin, I .A .Shirokov, Fattakhov E .A .Online Publication of Tiltmeter Data Based on the SeedLink Protocol // Seismic Instruments, May 2018, Volume 54, Issue 3, pp 254–259.
- ▶ Cucci L., Lombardi A.M., Tertulliani A .Earthquake-Rotated Objects (EROs) induced by the 2016 Mw6.0 Amatrice (Central Italy) earthquake: the contribution from site and source effects // Bulletin of Earthquake Eng., 2018, 16 (3), P .1061–1077.
- ▶ Fremd V .M .Piezoelectric Rotational Accelerometers // Seismic Instruments, 2018, Volume 54, Issue 3, pp 293–298.
- ▶ Gopala Krishna Rodda, Dhiman Basu .Coherency model for translational and rotational ground motions // Bulletin of Earthquake Engineering, July 2018, Volume 16, Issue 7, pp 2687–2710.
- ▶ Kislov K.V., Gravurov V.V .On the question of the rotational seismology // XII-th international Conference and School Problems of Geocosmos, Book of Abstracts, St .Petersburg, 2018, p .122.
- ▶ Schmelzbach C., Donner S., Igel H., Sollberger D., Taufiqurrahman T., Bernauer F., Häusler M., Van Renterghem C., Wassermann J., Robertsson J .Advances in 6C seismology: Applications of combined translational and rotational motion measurements in global and exploration seismology // Geophysics, 2018, 83(3), P .WC53–WC69.
- ▶ Бугаев А.С., Антонов А.Н., Агафонов В.М., Белотелов К.С., Вергелес С.С., Дудкин П.В., Егоров Е.В., Егоров И.В., Жевненко Д.А., Жабин С.Н., Зайцев Д.Л., Криштоп Т.В., Неешпапа А.В., Попов В.Г., Усков В.В., Шабалина А.С., Криштоп В.Г. Измерительные приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей // Радиотехника и электроника, 2018. 63(12). С. 1249-1262

2019– 2020 гг.

- ▶ Bernauer F., Wassermann J., Igel H .Application of dynamic tilt correction with direct measurements of rotation // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019 . <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/FelixBernauer.pdf>
- ▶ Atif M., Dhabu A.C, Raghukanth S.T.G., Manam S.R .Seismic Response of reduced micropolar elastic half-space// IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019. <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/MOHAMMADATIF.pdf>
- ▶ Chen C., Wang Y., Sun L.-X., Li D.-Q .Comparisons of Travelling-Wave Method and Difference Method for Calculating Rotational Components // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019 . <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/ChangChen.pdf>
- ▶ Dhabu, A.C., Raghukanth, S.T.G .Fundamental Solutions to Static and Dynamic Loads for Homogeneous Reduced Micropolar Half-Space // Pure Appl .Geophys .176, 4881–4905 (2019) . <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02225-0>
- ▶ DUDEK M., TEISSEYRE K .P., JAROSZEWICZ L.R., STEPOWSKI L., KURZYCH A.T., KRAJEWSKI Z., KOWALSKI J.K .Near-field rotations excited by the microblast-method excavations // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019. <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/MichalDudek.pdf>
- ▶ Geng J .Six-degree-of-freedom seismogeodesy by combining high-rate GNSS, accelerometers and gyroscopes // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019 . <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/JianghuiGeng.pdf>
- ▶ Graizer V., Kalkan E .DEFORMATIONS AND ROTATIONAL MOTIONS EXTRACTED FROM DOWNHOLE ARRAY RECORDINGS // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019 . <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/VladimirGraizer.pdf>
- ▶ Jaroszewicz L.R., Kurzych A., Krajewski Z., Dudek M., Kowalski J .K., Teisseyre K.P .The Fiber-Optic Rotational Seismograph—Laboratory Tests and Field Application // Sensors .2019; 19(12): 2699 . doi: 10.3390/s19122699
- ▶ Li Z., van der Baan M .Tutorial on rotational seismology and its applications in exploration geophysics // GEOPHYSICS, 2017, Volume 82, Number 5, Page W17. DOI: 10.1190/geo2016-0497.1
- ▶ Lin C.-J., Hosseini K., Donner S., Vernon F., Wassermann J .M., Igel H .Determine phase velocity and wave field azimuth of surface wave from joint analysis of seismograph and ground rotation // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019. <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/Chin-JenLin.pdf>
- ▶ Nakata N .Characterization of earthquake ground motion and ambient-noise correlation using a rotational seismometer and an array-based rotational motion // Geophysical Research Abstracts Vol .21, EGU2019-17804-1, 2019 EGU General Assembly 2019. <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/NoriNakata.pdf>
- ▶ Ponceau D., Guattari F., Larsonnier F., Olivier S., Morlens A.-S., Sebe O., Laudat T .Toward a study of the effect of rotational motions on linear seismic measurements // Geophysical Research Abstracts Vol .21, EGU2019-17804-1, 2019 EGU General Assembly 2019.
- ▶ Rusch R., Sèbe O., Gaffet S., Décitre J.-B., Schindelé F .Uncertainty quantification in rotational seismology .// Geophysical Research Abstracts Vol .21, EGU2019-17804-1, 2019 EGU General Assembly 2019. <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/RoxanneRusch.pdf>
- ▶ Schmelzbach C., Sollberger D., Van Renterghem C., Häusler M., Edme P., Robertsson J .Rotational motion and spatial wavefield gradient data in seismic exploration – a review // Geophysical Research Abstracts Vol .21, EGU2019-17804-1, 2019 EGU General Assembly 2019. <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/CedricSchmelzbach.pdf>
- ▶ Takeo M .Volcanic eruption and ground rotational motion // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019. <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/MinoruTakeo.pdf>
- ▶ Van Renterghem C., Schmelzbach C., Sollberger D., Häusler M., Robertsson J.O.A .Source-side spatial wavefield gradients in land seismic exploration // GEOPHYSICS, 2019, Volume 84, Number 5, Page P73. DOI: 10.1190/geo2018-0634.1
- ▶ Wassermann J., Bernauer F., Braun T., Igel H., Shiro B., Ripepe M., Guattari F .6C Recordings at Active Volcanoes // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019 . <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/JoachimWassermann.pdf>
- ▶ Yuan S., Igel H., Wassermann J., Bernauer F., Gebauer A., Schreiber U .Six degrees of freedom analysis of point ground motions: application to G-ring and ROMY data // IWGoRS 5th International Working Group on Rotational Seismology .Тайвань .2019. <https://rotation.earth.sinica.edu.tw/uploads/ShihaoYuan.pdf>
- ▶ Тимофеев В.Ю., Тимофеев А.В., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В .Кварцевые наклонометры и опыт их использования в геофизических исследованиях // Сейсмические приборы .2019 .Т .55, № 3 .С.24–47. <https://doi.org/10.21455/si2019.3-2>
- ▶ Moradloo, A.J., Najji, A .Effects of rotational components of earthquake on seismic response of arch concrete dams .Earthq .Eng .Eng .Vib .19, 349–362 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11803-020-0566-x>
- ▶ Liu, K.; Zhang, F.; Li, Z.; Feng, X.; Li, K.; Du, Y.; Schreiber, K.U.; Lu, Z.; Zhang, J. Noise Analysis of a Passive Resonant Laser Gyroscope // Sensors 2020, V. 20(18), 5369. 16p. <https://doi.org/10.3390/s20185369>