



Физический факультет МГУ

им. М.В.Ломоносова

**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
СЕЙСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ
ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В
ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ
GPS-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ.**

В.И. Захаров, В.Е. Куницын

Zvi_555@list.ru

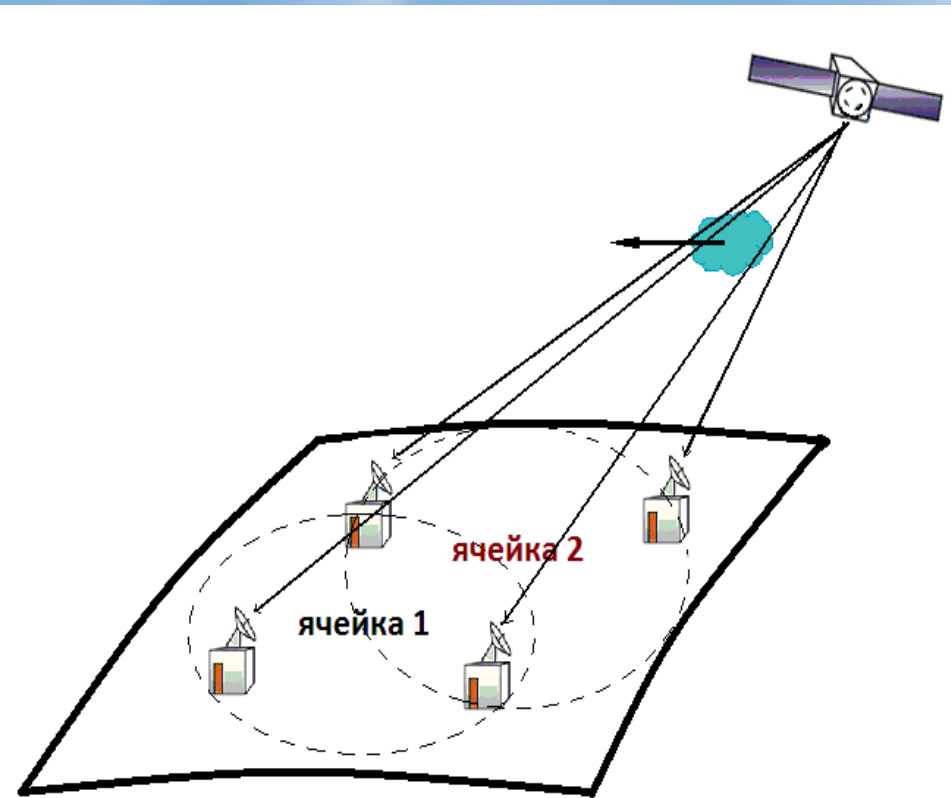
МГУ, Москва 2014

1. Волновой перенос энергии широко распространен во многих природных процессах.
2. Если генерируемые в них волны лежат в полосе собственных частот атмосферы, то они могут распространяться до ионосферных высот.
3. В ионосфере происходит модуляция электронной концентрации плазмы волнами различной природы, что может регистрироваться радиофизическими методами.

Ионосфера Земли является **открытой системой и служит индикатором различных процессов в системе геосфер**

Рассмотрим некоторые **особенности выделения методом GPS-интерферометрии волновых структур в ионосфере над различными регионами в периоды сейсмической активности.**

Исследования верхней атмосферы с использованием GPS-интерферометрии



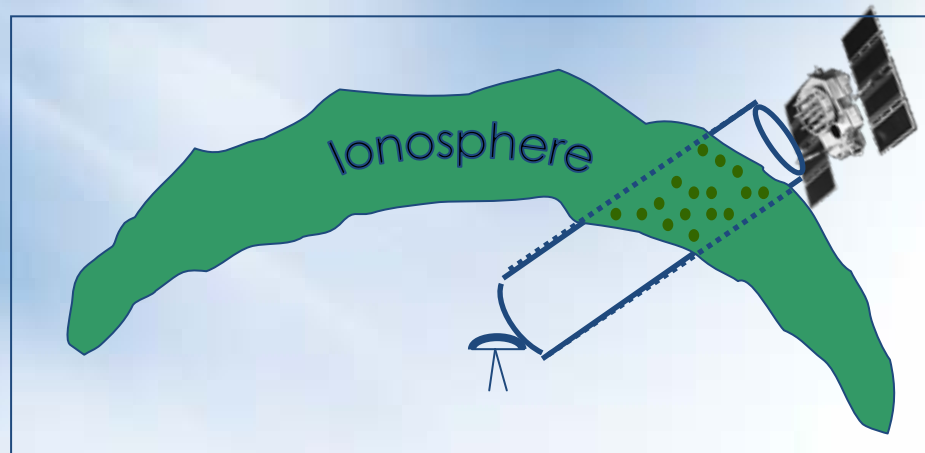
Детектирование ионосферных неоднородностей с помощью системы GPS

*Предыстория вопроса.
Идеи МГГ-МГСС, 1957
по ВЗ ионосферы
синхронизованными
передатчиками*

Идея выделения ионосферы по данным GPS основана на определении характерных вариаций TEC при использовании комбинации регистрируемых фазовых параметров корреляционным методом

Обработка сигнала GPS для каждого приемника

Комбинация регистрируемых параметров L1 и L2



$$L_I \equiv L_1 - L_2 = \alpha \cdot STEC + err_I$$

где STEC - наклонный TEC, определенный с err_I

Наклонный TEC :

[TECU units],

$$I = \frac{1}{\alpha} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + \delta L + const]$$

Фильтрация входных

сигналов :

$$\delta L_I(t) \equiv L_I(t) - 0.5(L_I(t + \tau) + L_I(t - \tau)) \approx -\tau \frac{dL_I}{dt} \Big|_t$$

выбор временного окна и времени наблюдения, учет движения спутников GPS

Создана методика использования только фазы L1

Диапазон частот Брента-Вяйсяля для атмосферы – ионосферы 0.2...2 mHz

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{K_c} = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{g(\gamma_a - \gamma)}{T_c}}}$$

Для каждой измерительной ячейки радиоинтерферометра для всех видимых GPS PRN определяют параметры ПИВ

- скорости волнового фронта
- азимут и угол места источника волнового возбуждения
- координаты местоположения подионосферной точки и направление движения волновой структуры.

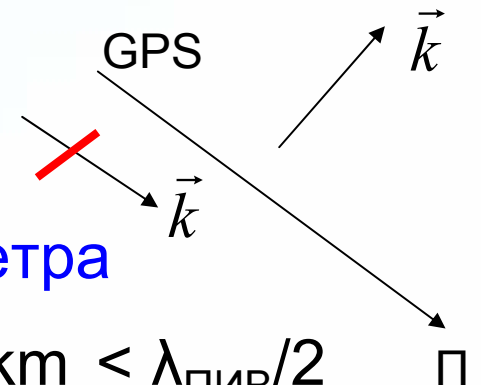
ОСОБЕННОСТИ метода:

1) Разрешающая способность интерферометра

(приближение плоской волны) $R_{ij} \sim 50 \dots 100 \text{ km} < \lambda_{\text{ПИВ}}/2$

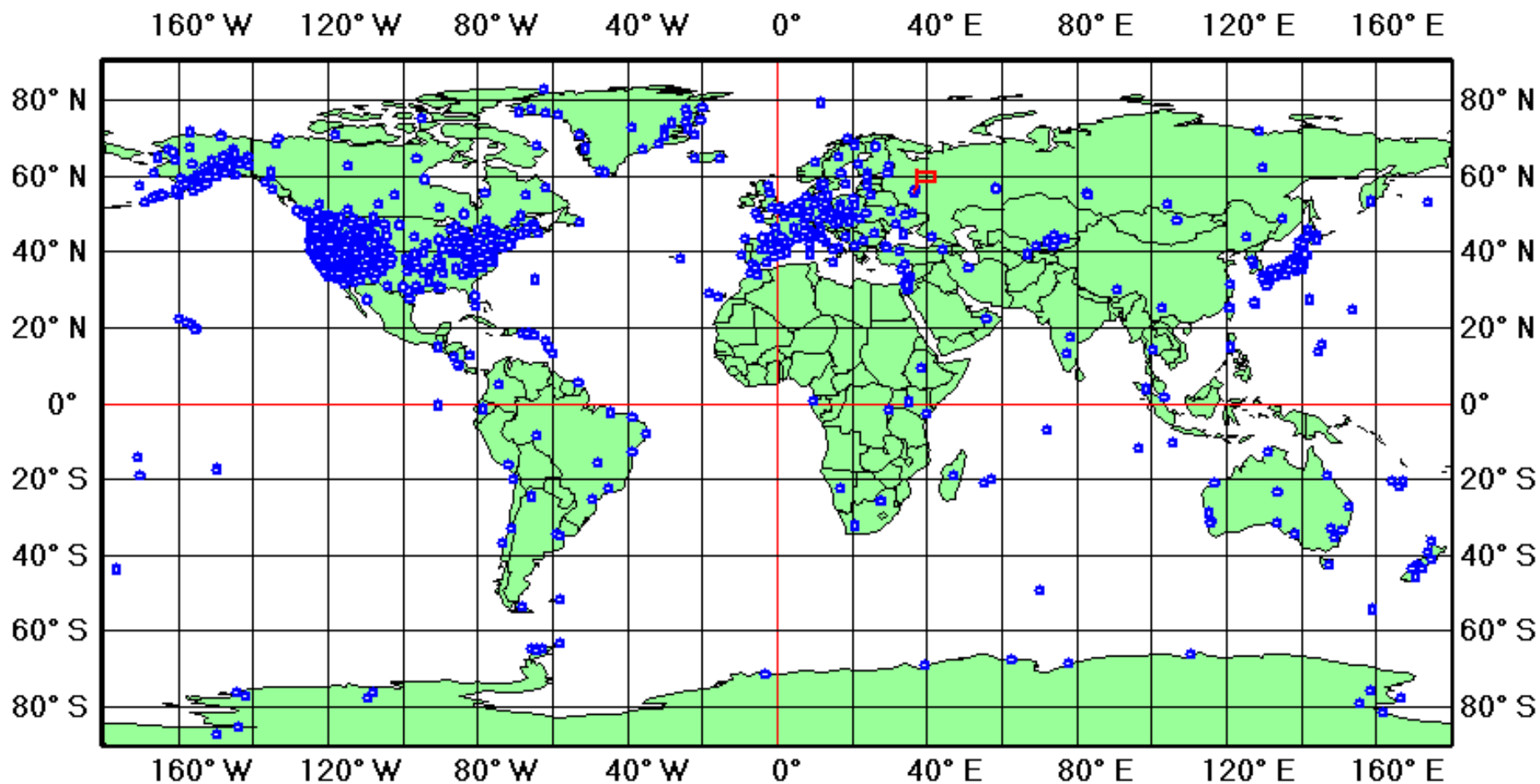
2) Ракурсный характер отклика ионосферы на ПИВ :

$$(\vec{k} \vec{r}_{GPS-R}) \neq 0$$



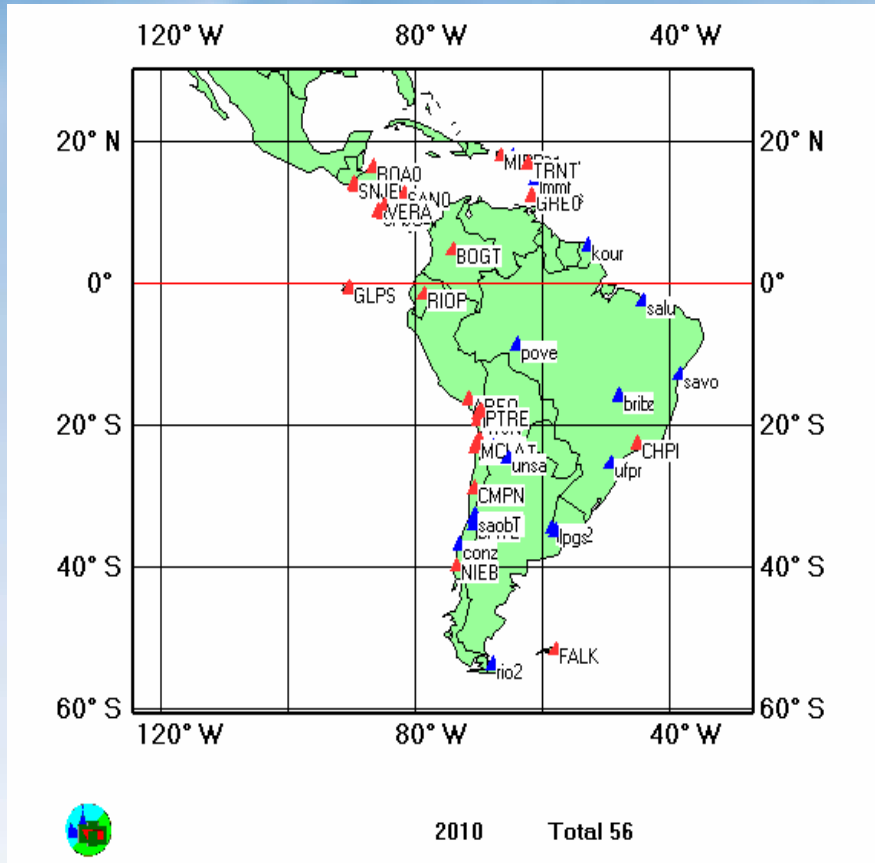
Сеть IGS и региональные подсети

3. Расположение наблюдательных станций и геометрия сети



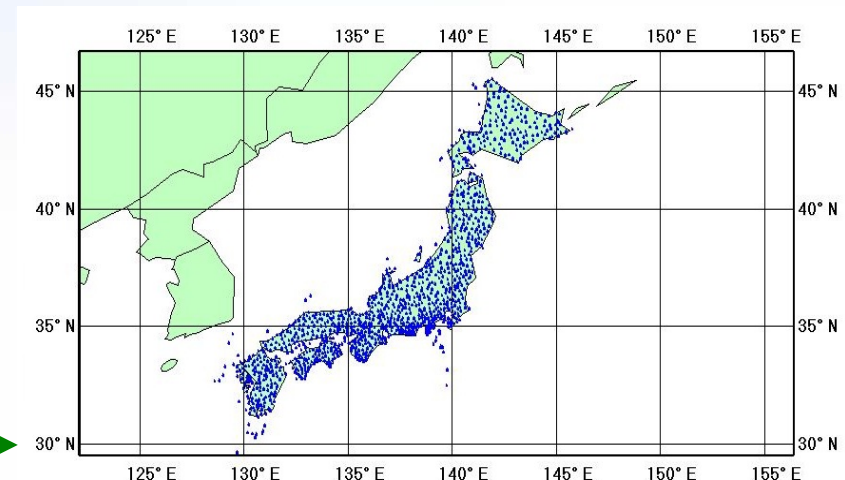
Сеть IGS и региональные подсети

3. Расположение наблюдательных станций и геометрия сети



На рисунке указаны приемники сетей IGS (Δ) - International Geophysical Survey) и UNAVCO (Δ) - University Navstar Consortium

Проблемы ! В Юж.Америке на 17.8 млн км² всего 54 станции, а в Японии мало ракурсов для анализа



На рисунке указаны приемники сети **GEONet**. - EARTH OBSERVATION NETWORK OF JAPAN



Использование кластерного анализа для идентификации возмущений

Кластерный анализ - технология объединения полученных в первичном анализе объектов в группы, характеризующиеся схожими параметрами.

В данной работе при помощи кластерного анализа осуществляется классификация и выделение тождественных неоднородностей, детектируемых различными ячейками GPS приемников.

Анализ проводится по следующим параметрам:

- координатам подыоносферной точки и*
- направлению распространения неоднородной структуры.*

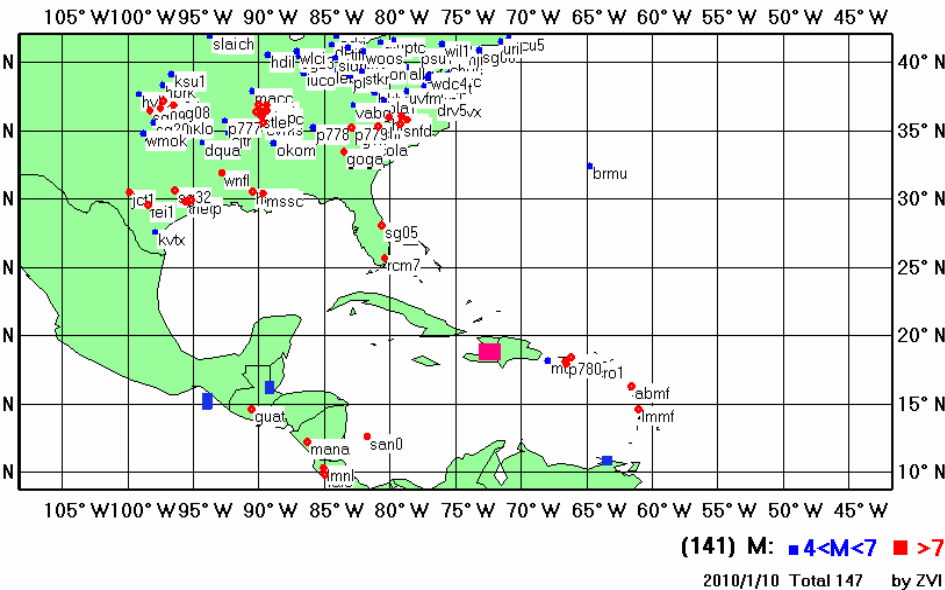
Землетрясение на о.Гаити 12.01.2010 и ионосферные возмущения

12/01/2010 в 21:53 UTC, **магнитуда 7.0** (18.44N 72.54W)

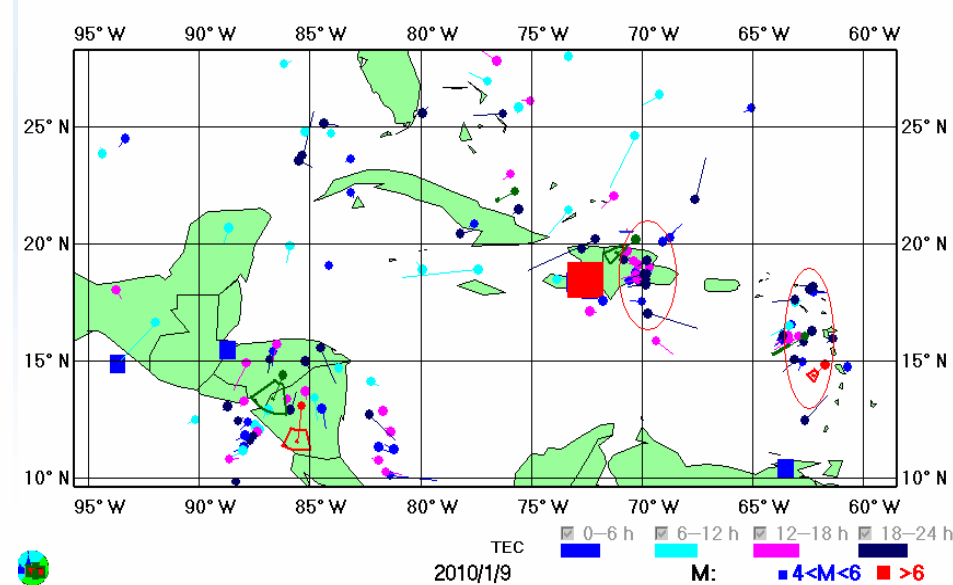
В период с 12/01-15/01 2010г. в регионе зарегистрировано :

свыше 50 землетрясений с $M > 4$, 14 землетрясений с $M > 5$.

В период с 01/01 -10/01 2010г. такой сейсмической активности не отмечено.



Совместное расположение наблюдательных станций сети IGS (кружки синего и красных цветов) и событий в регионе (квадраты)



Неоднородные структуры, выделенные 09/01/2010

По этому событию : обработано свыше ~7500час индивидуальных наблюдений, около 43млн отсчетов фазы

4. Выбор лучшего ракурса **ИЛИ**

Полная обработка всех данных ?

5. Влияние гео-гелиомагнитных условий на ионосферу как **открытую** систему

6. Погрешности методики

Параметр	Обзорн. данные [Афраймович Э.Л.]	Статистическая обработка		Кластерный анализ	
		Невозмущенные условия	Возмущенные условия	Невозмущенные условия	Возмущенные условия
ΔV	6-20%	15-20%	18-25%	8-12%	10-15%
ΔA_{zt}	5-16%	10-15%	12-18%	7-10%	8-14%
$\Delta \alpha$	17-30%	20-25%	30-40%	-	-

Оценки устойчивы и не зависят от способа формирования ячеек из станций.

Кластерный анализ имеет преимущества для небольших выборок.

Ошибки локализации источника зависят от геометрии сети и составляют обычно не хуже 50, для обзорных ситуаций- 100 км

Кластерные структуры и геофизический анализ результатов

Рис.1

Рисунки 1 и 2 - кластерные структуры, выделенные 12/01/2010 и 13/01/2010
Рисунок 3 Геотектонические особенности Карибской плиты.

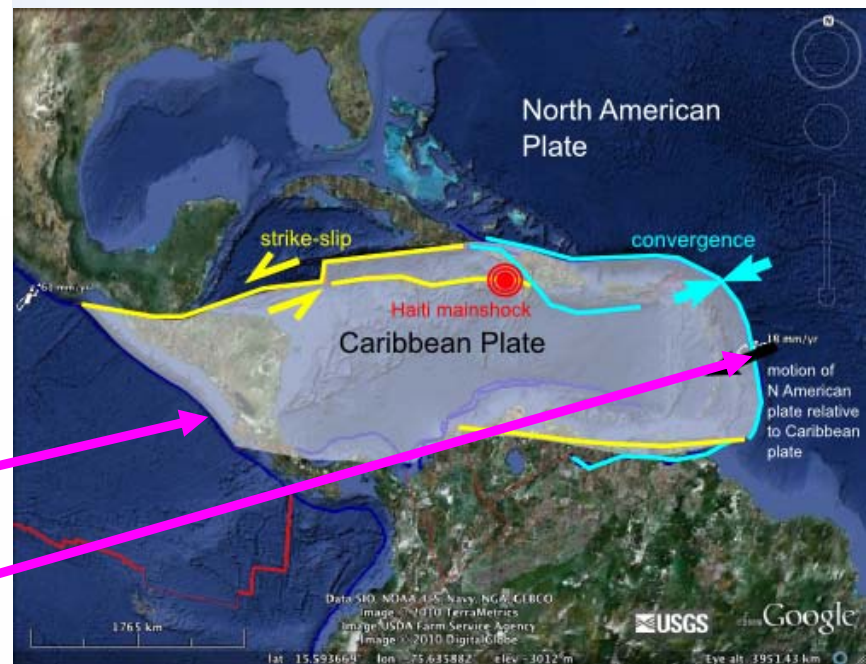
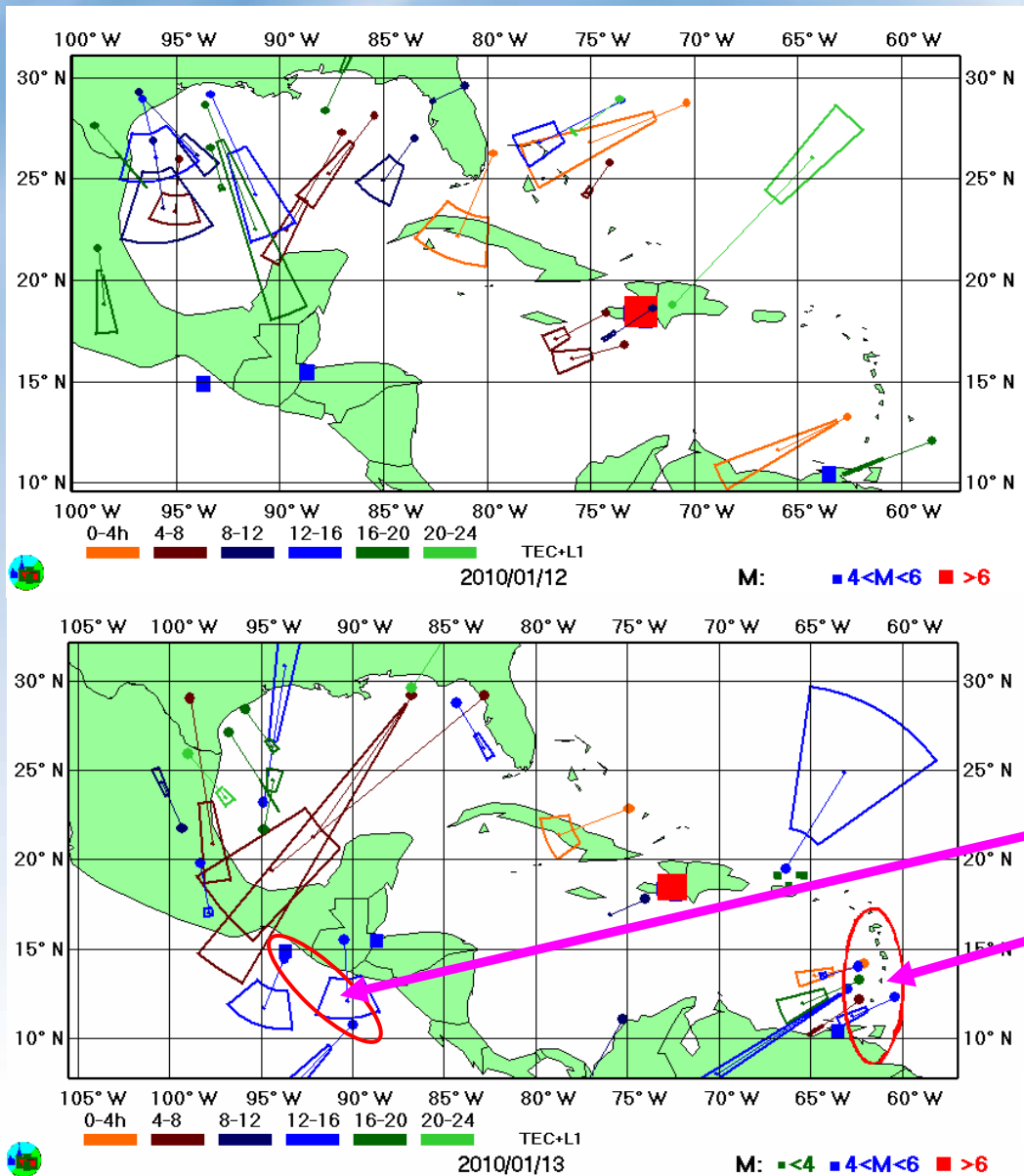
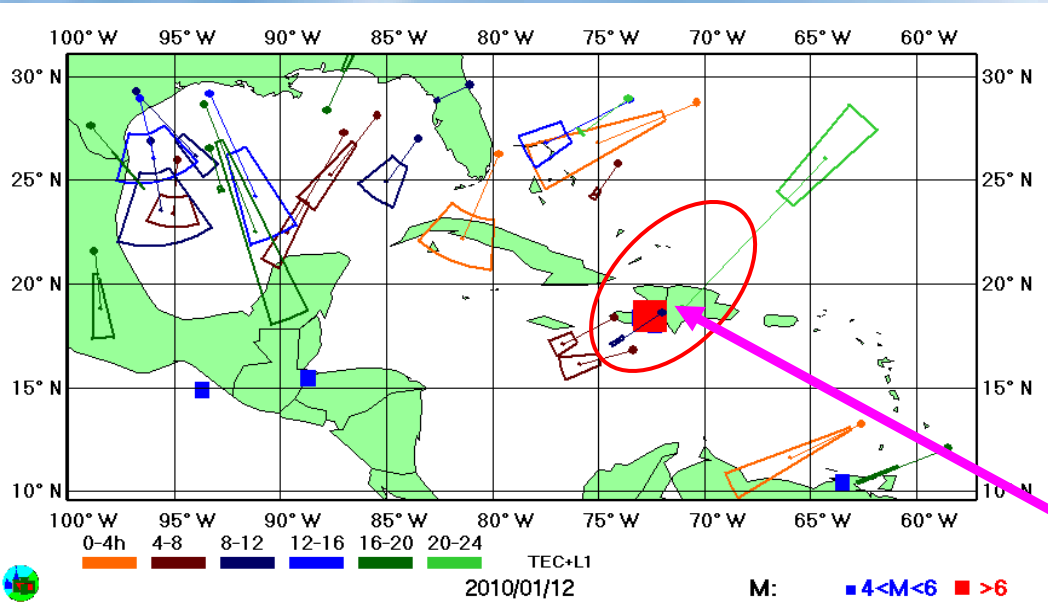


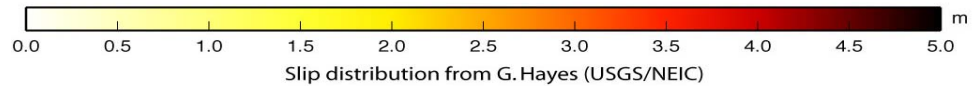
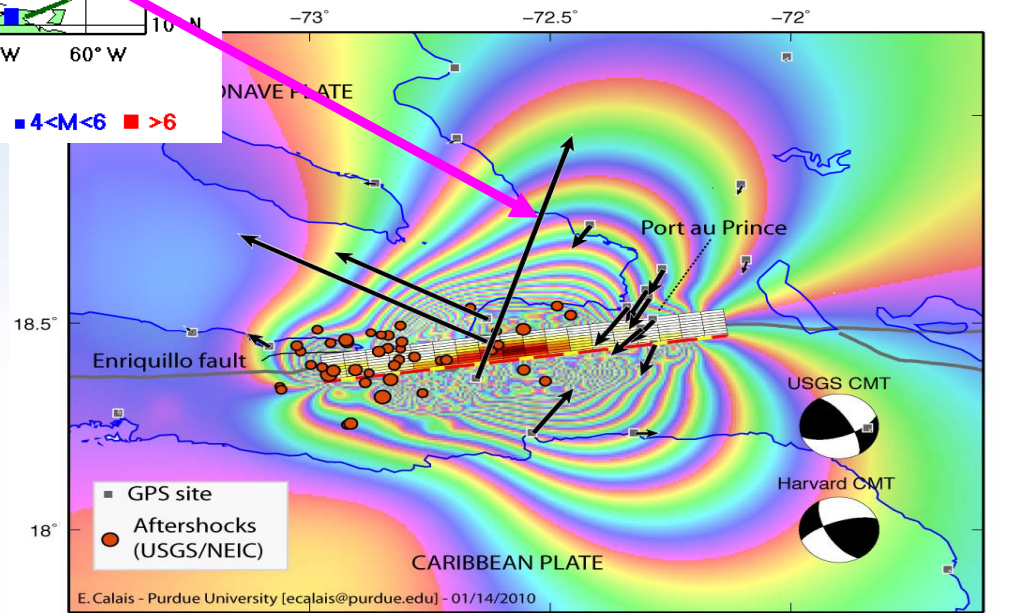
Рис.2 Данные только за 13.01.2010 !

Рис.3

Кластерные структуры и геофизический анализ результатов

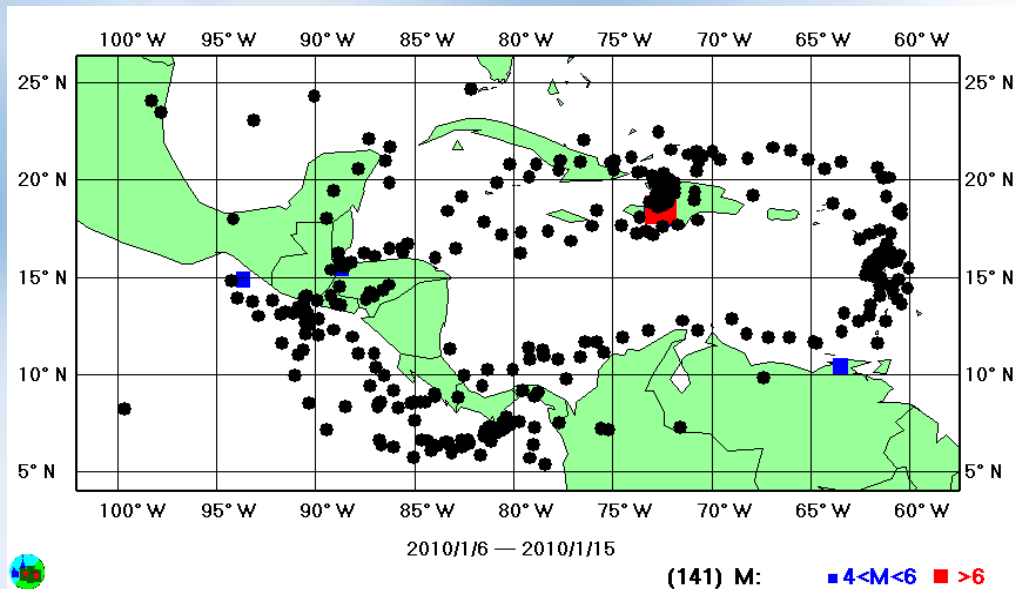
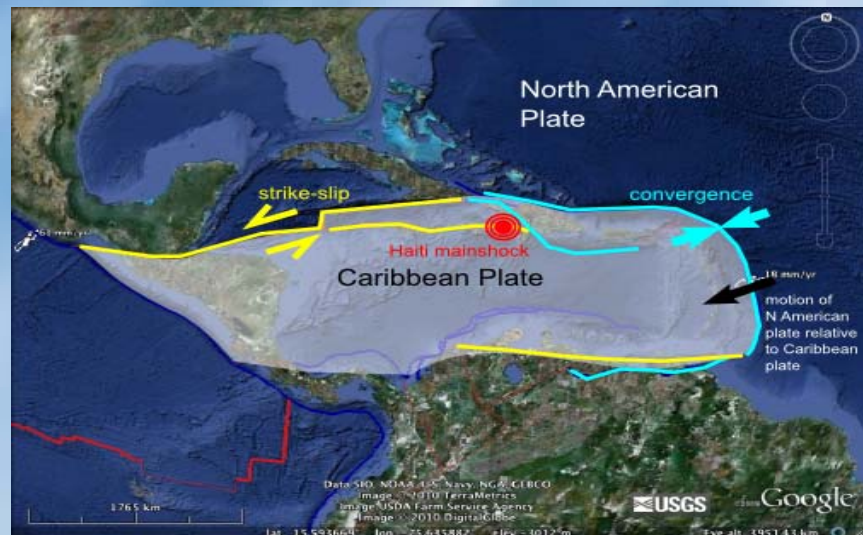


SIMULATED COSEISMIC GROUND DEFORMATION
HAITI - Mw=7.1 - January 12, 2010



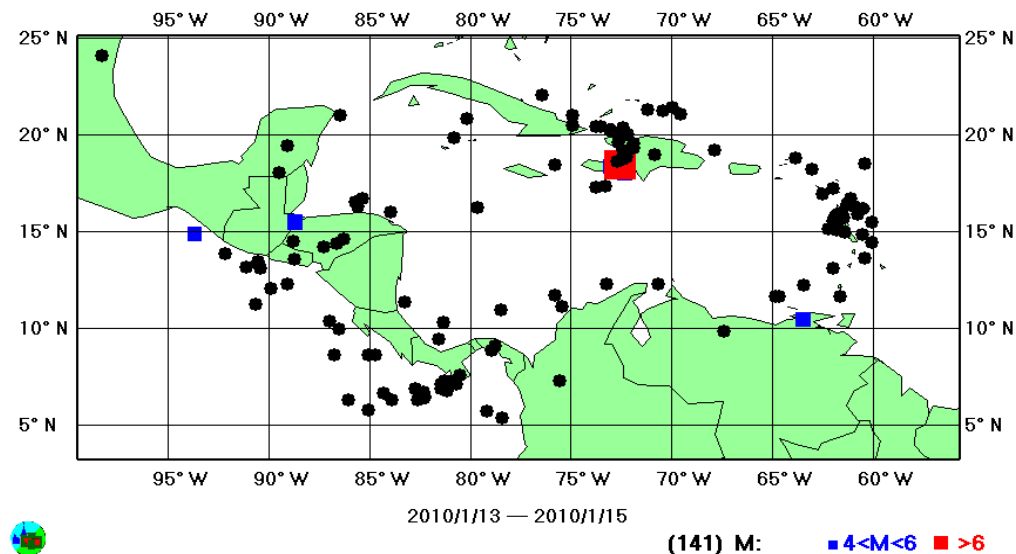
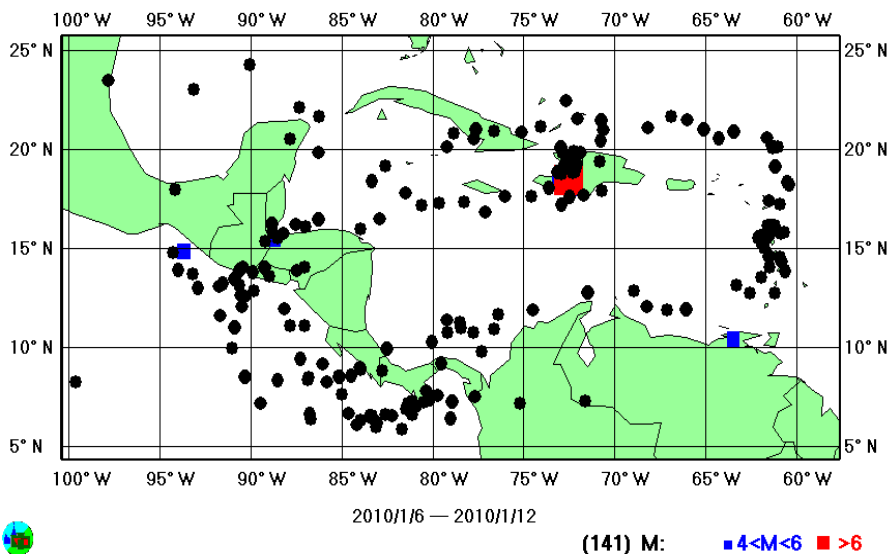
Интерпретация

Весь период мониторинга – 10 дней



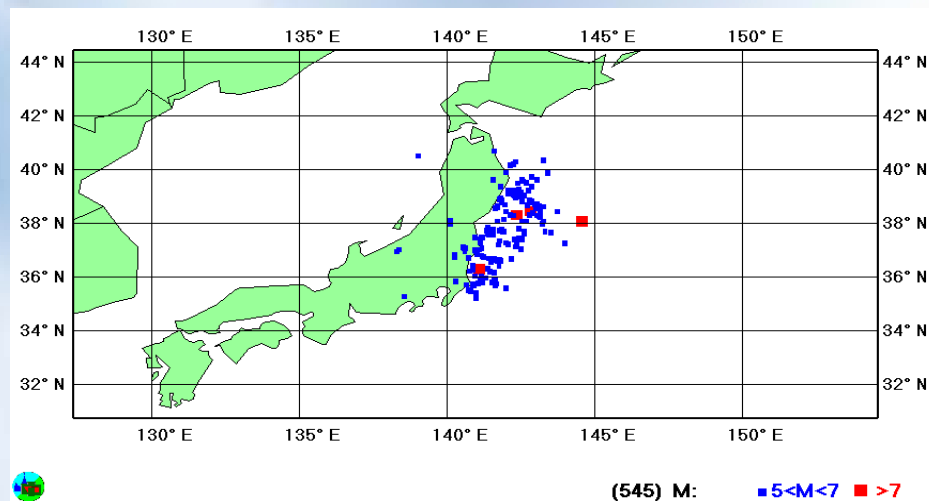
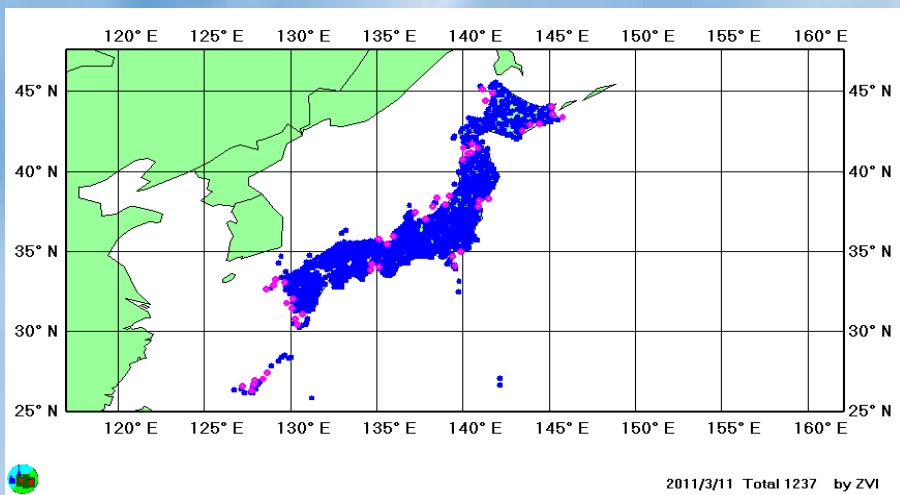
6 дней – до события

3 дня – после землетрясения



Сейсмически активные районы - источники акустических колебаний не только во время, но также до и после активной фазы землетрясения !

Япония, Тохоку, 01.03 – 31.03 2011г



Измерительная сеть региона и использованные станции

Местонахождение основных землетрясений

Землетрясение M=9 произошло в Японском жёлобе — глубоководной океанической впадине, где сталкиваются Тихоокеанская и Охотская литосферные плиты, 11/03/2011 в 05:46 UT восточнее о. Хонсю (эпицентр 38.32N, 142,37 E).

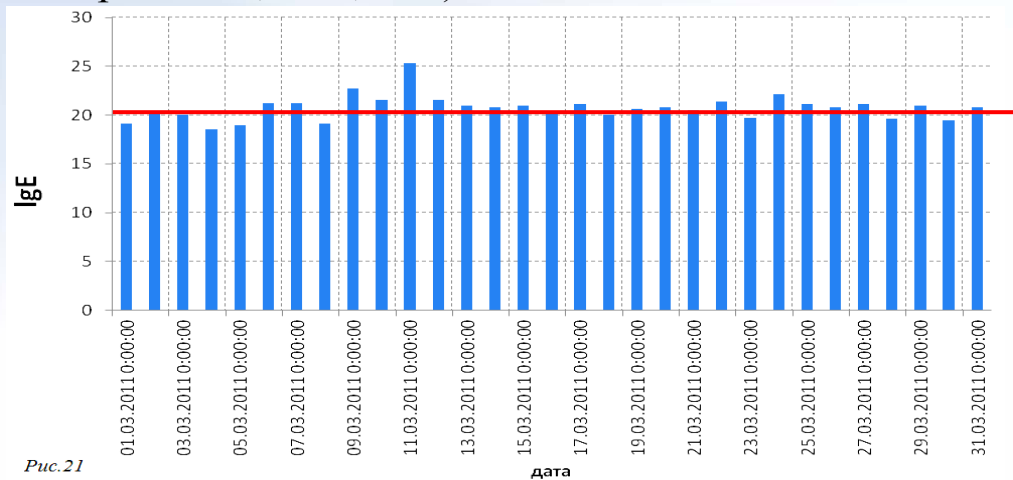
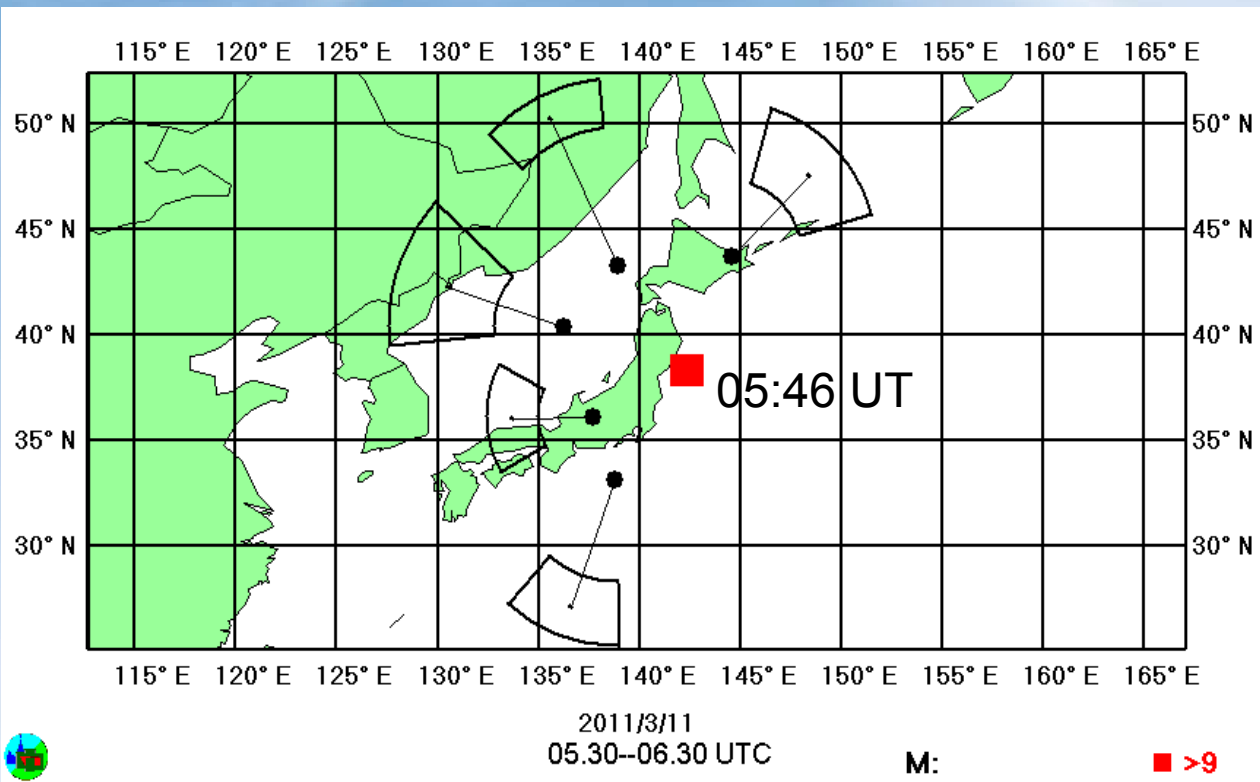


Рис.21

Начиная с 7 марта, в регионе происходит накопление энергии, косвенно выражающееся в росте мощности землетрясений.

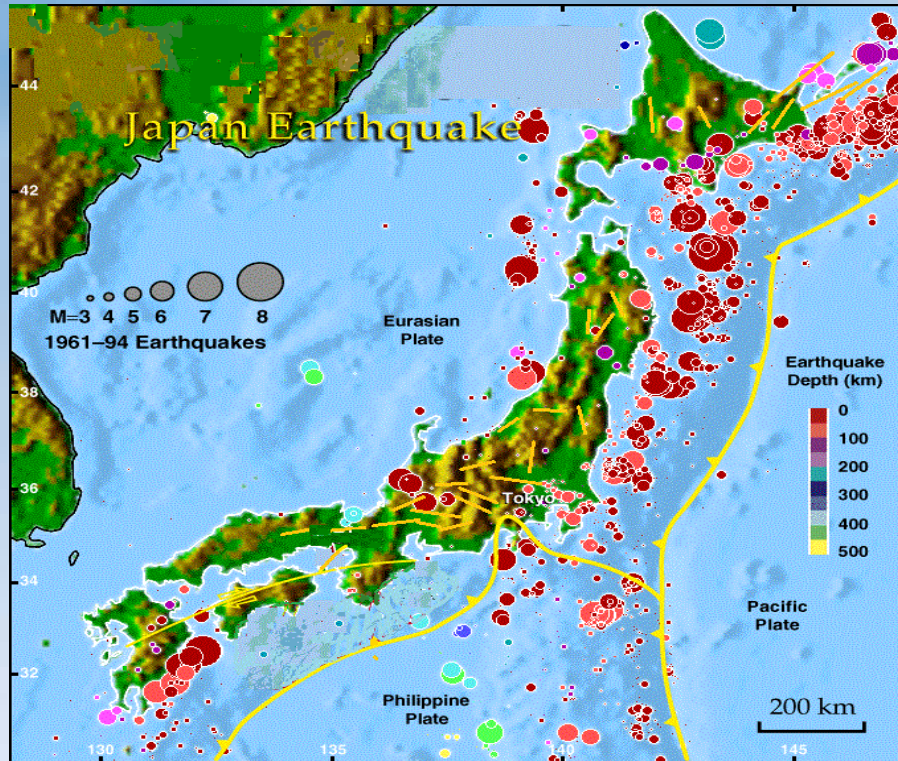
Расходящаяся сферическая волна как реакция на землетрясение



*Подыоносферные точки
структур, выделенных
11/03 с 05:30 до 06:30*

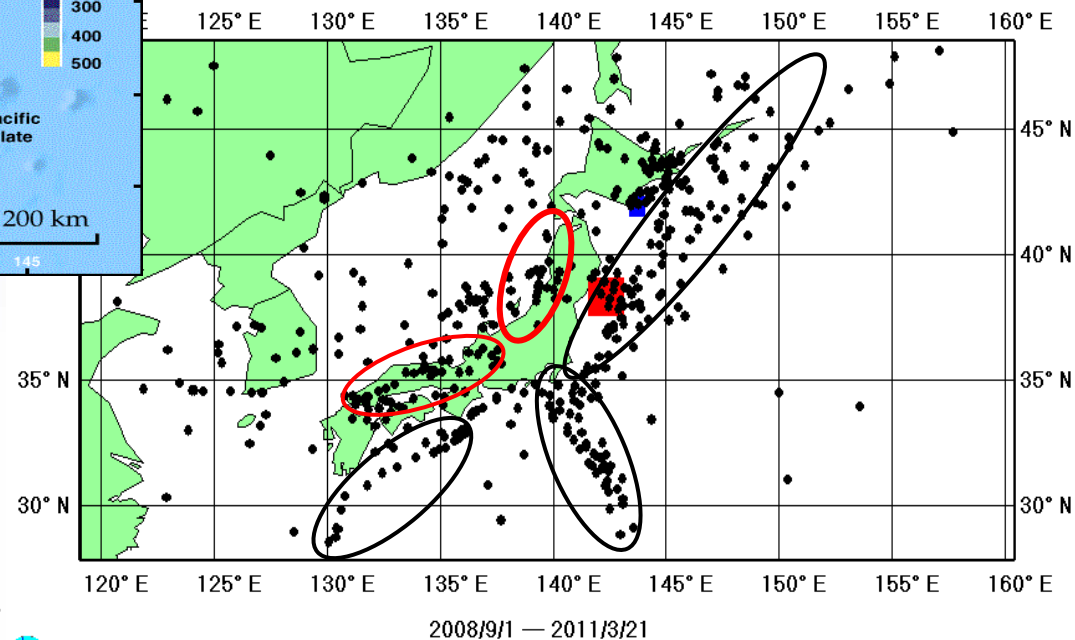
В день землетрясения анализ позволил выделить несколько структур, описывающих фронт расходящейся от источника землетрясения сферической волны. Подыоносферные точки указанных структур укладываются в круг радиуса 5° вокруг источника событий (землетрясения) и показывают также акустический характер возмущения в ионосфере.

Интерпретация результатов и афтершоковая активность

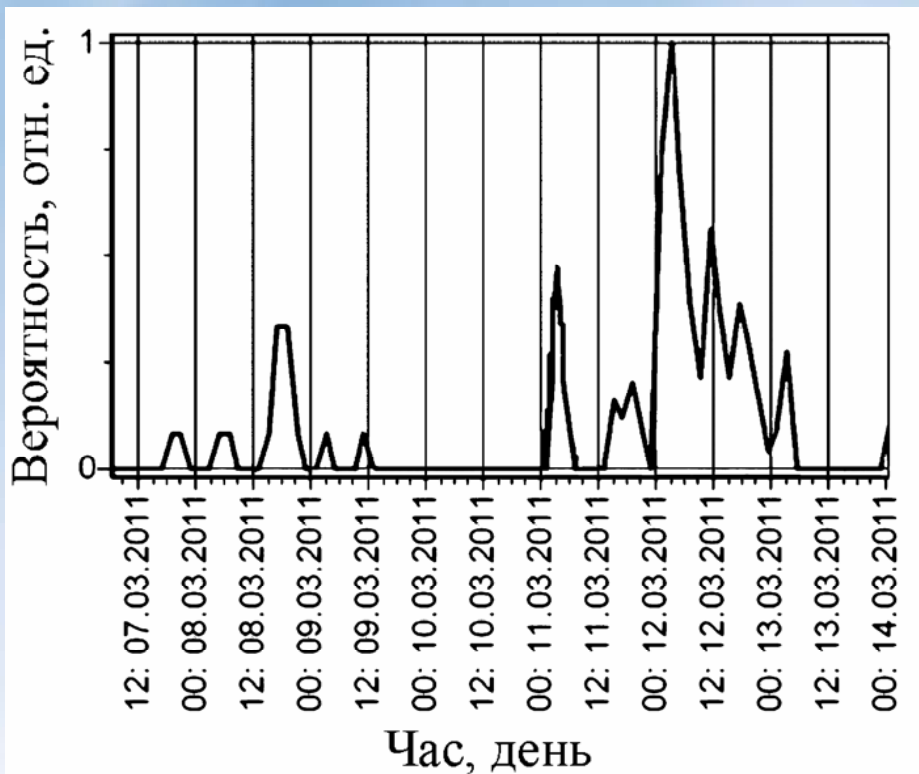


- Япония находится на стыке 4 тектонических плит.
- Около 100 активных разломов.

Источники ИН в регионе группируются вдоль границ геотектонических плит и активных разломов.



Интерпретация результатов и афтершоковая активность



Волновая активность
(вероятность появления
крупномасштабных
волновых структур) над
Японией в период
12.07.2011-14.03.2011

Сейсмическая и геофизическая активность в Южной Америке 18.02 – 21.03 2010г

В регионе зарегистрировано 1358 землетрясений с $M > 4$, из них три самых значительных произошли в **Чили 27/02/2010 в 06:34 UTC,**

$M=8.8$

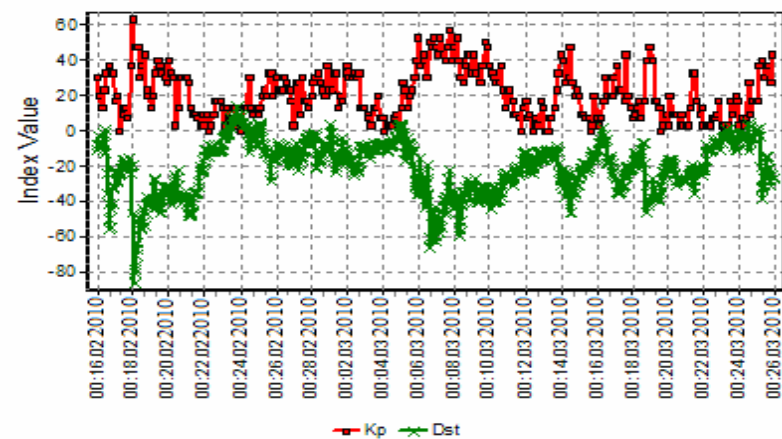
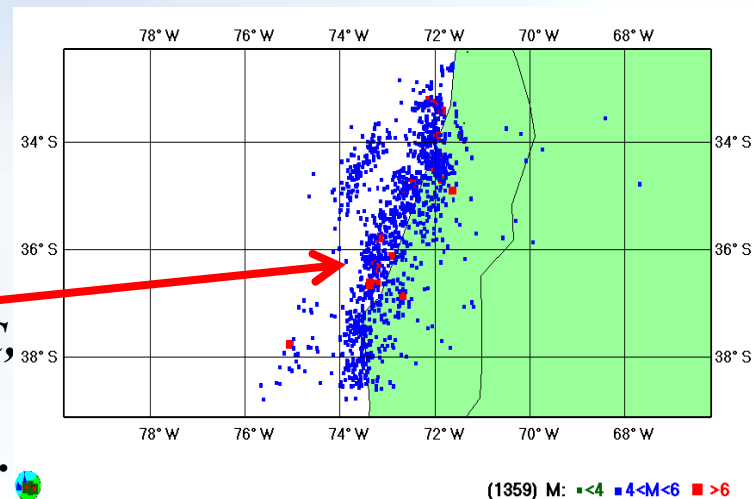
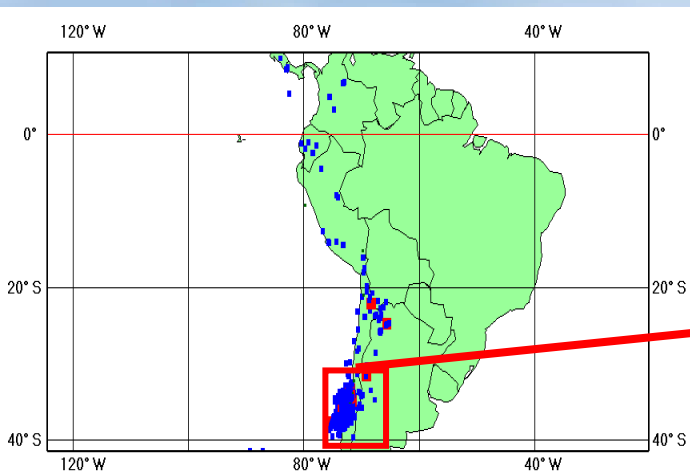
**(Offshore Maule),
05/03/2010 в 11:47,**

$M=6.6,$

**(Offshore Bio-Bio) и
11/03/2010 в 14:39 UTC,**

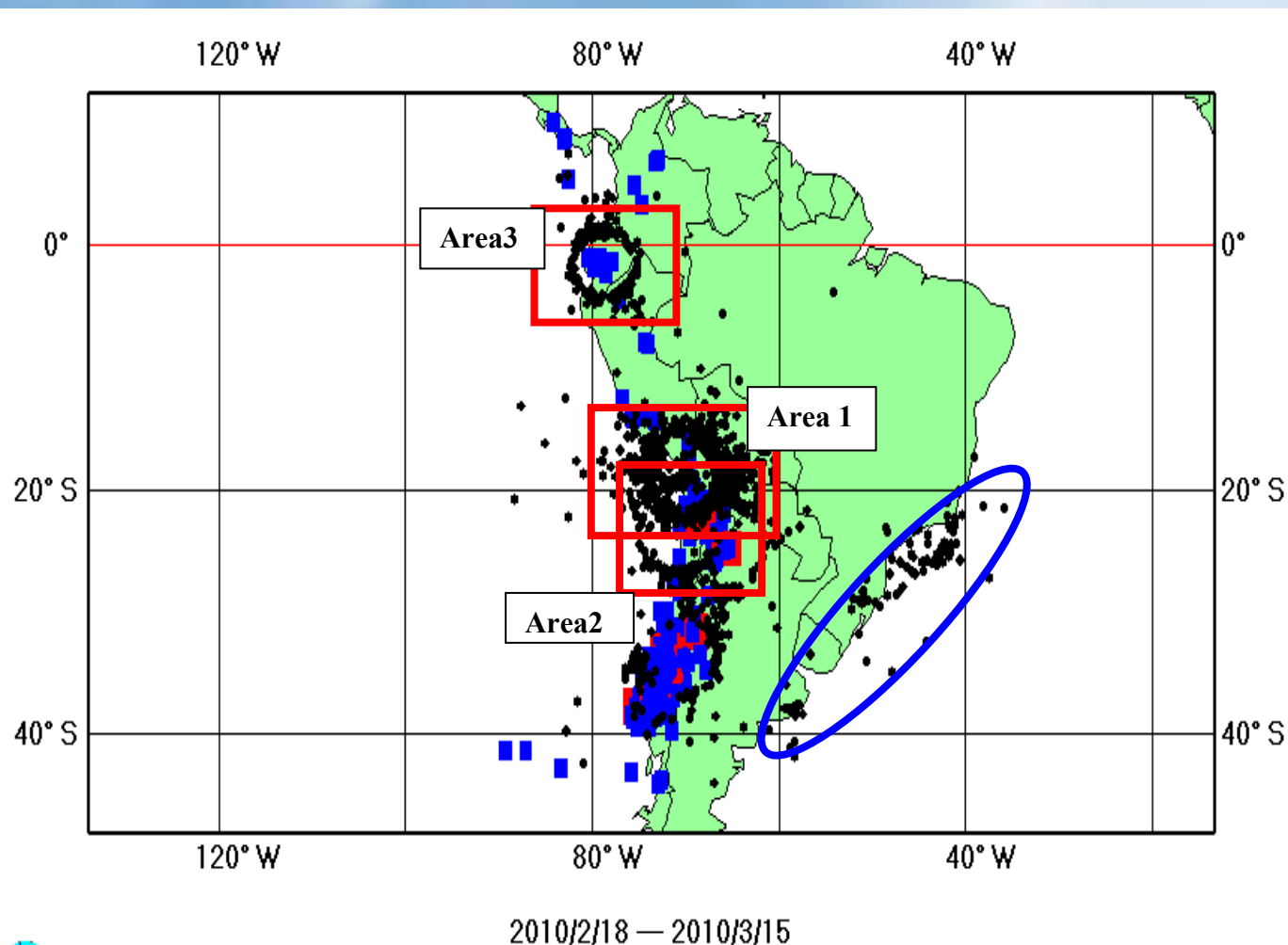
$M=6.9$

(Libertador o. Higgins).



Сейсмособытия развивались на фоне умеренно или слабо возмущенной геомагнитной обстановки и потому резкие изменения свойств ионосферных неоднородностей, зарегистрированные в изучаемый период времени, не могут быть объяснены, вариациями только гелио- и геомагнитных условий.

Локализация ионосферных структур в период 19.02 -19.03 2010г

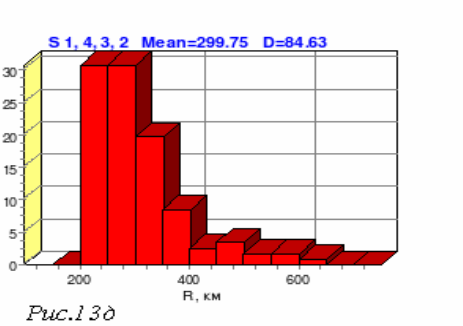
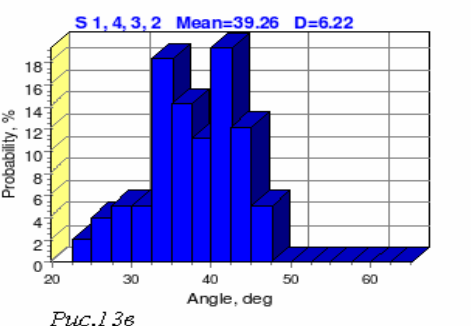
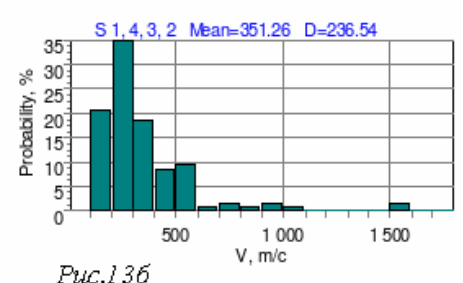
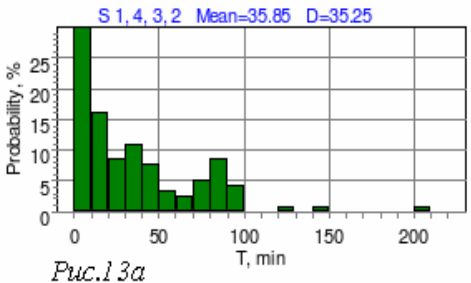
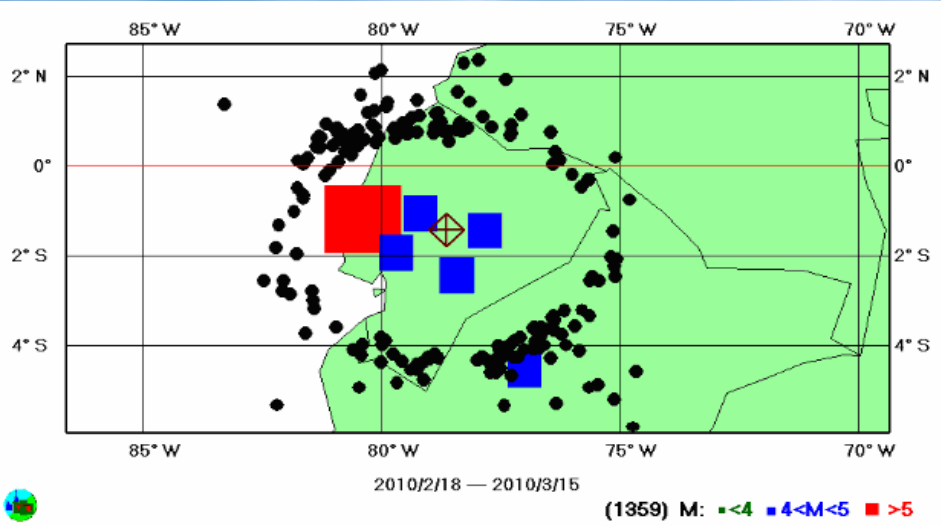


В ряде случаев - отмеченных на красными областями - полученные результаты имеют весьма простую интерпретацию и, вероятно, связаны именно с литосферно-ионосферными волновыми взаимодействиями.



Пространственные области возмущений, выделенные с 18/02/2010 по 15/03/2010

Рассмотрим одну область подробнее



Область 3

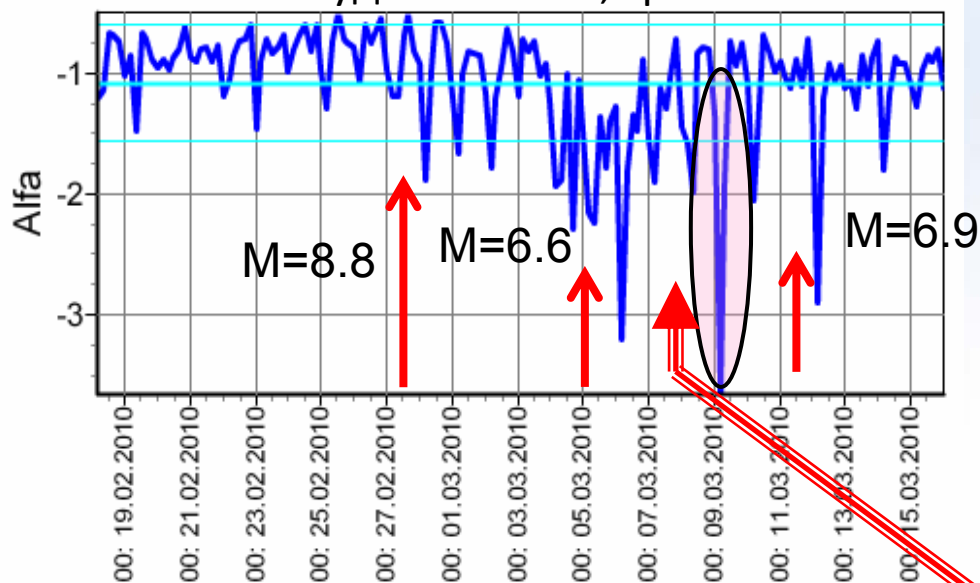
Полученные результаты показывают, что литосферная активность является источником волноподобных возмущений с характерными **акустико-гравитационными параметрами**. Для удобства сравнения все полученные данные сведены в таблицу.

Parameter	Area 1	Area 2	Area 3
Период, мин	50, 80, 120, 150	50, 110, 130, 150	15, 40, 80
$V \pm \sigma V$, м/сек	362 ± 314	347 ± 281	350 ± 230
$R \pm \sigma R$, km	394 ± 116	330 ± 71	300 ± 85
$\alpha \pm \sigma \alpha$, град	34.0 ± 8.0	37.9 ± 6.1	39.3 ± 6.2

Изменение спектра неоднородностей и афтершоковая активность

При анализе данных для Южной Америки было обработаны данные за период 18 февраля – 21 марта 2010 г., всего свыше 43 тыс. час индивидуальных наблюдений или более 10,3 млн измерений фазы на обеих рабочих частотах).

Напомним: в указанный период было зарегистрировано 1358 землетрясений с магнитудой более 4, три значительных произошли в Чили



На рисунке видно запаздывание возникновения «реакции ионосферы» на конкретные землетрясения от 8 до 12 часов, шаг дискретизации построения оценок параметра α составляет 4 часа.

8.03.2010 в регионе произошло 46 землетрясений с магнитудой от 4 до 6

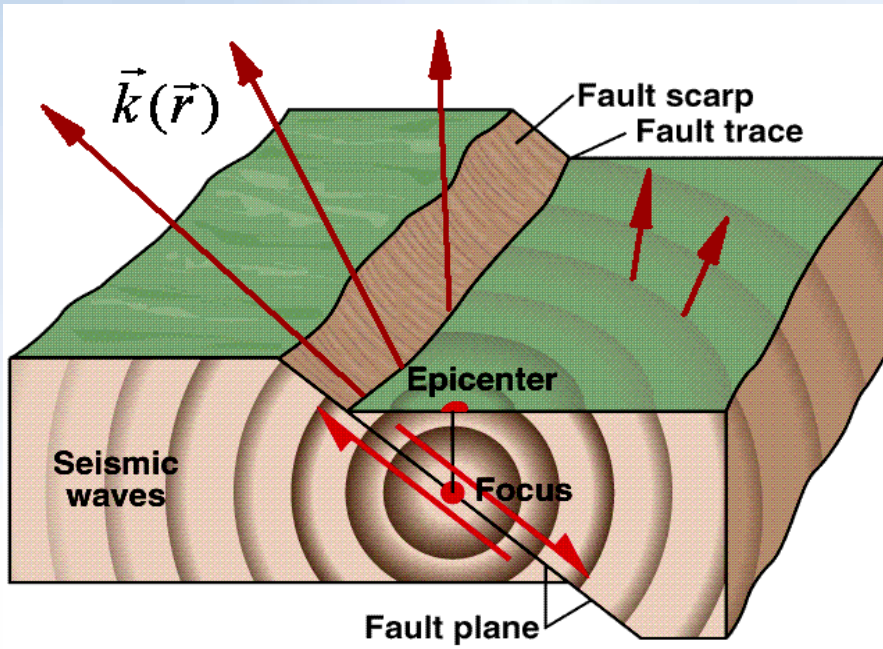
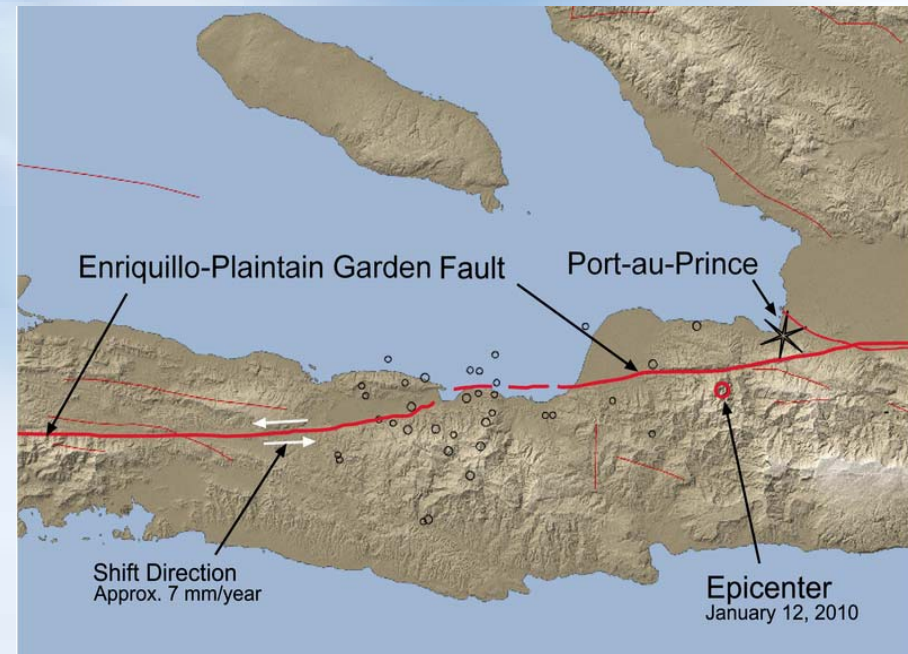
Временная зависимость параметра спада α волнового спектра

Каков источник волн?

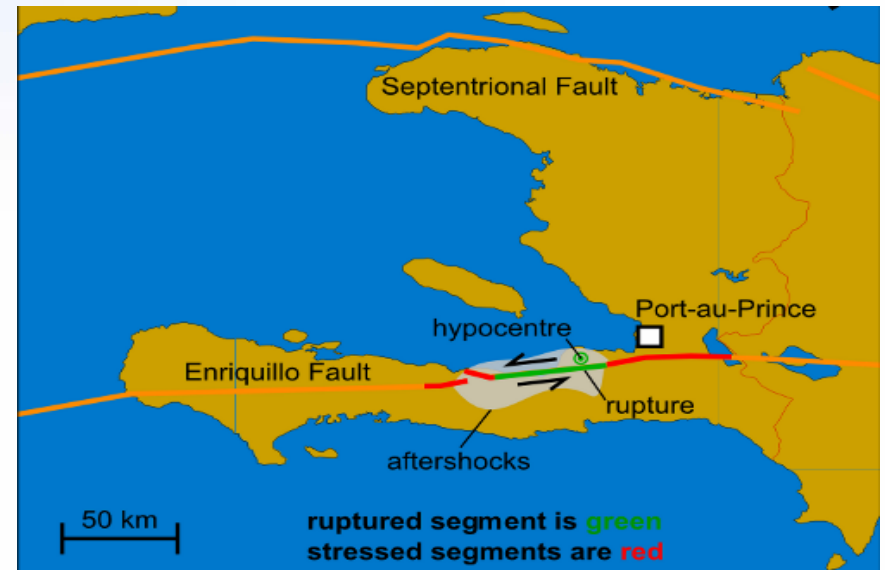
Модель очага – все еще ... теория упругой отдачи Г.Ф.Рейда, 1911г
Очаг землетрясения – **разрыв** в среде

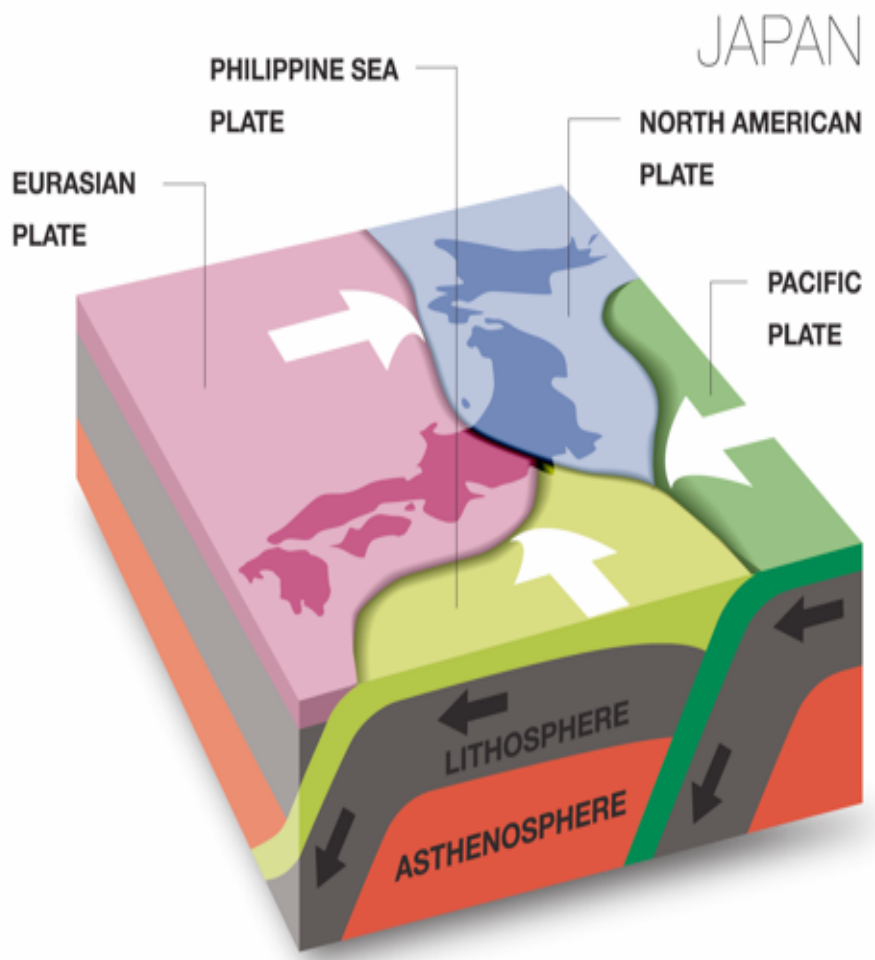
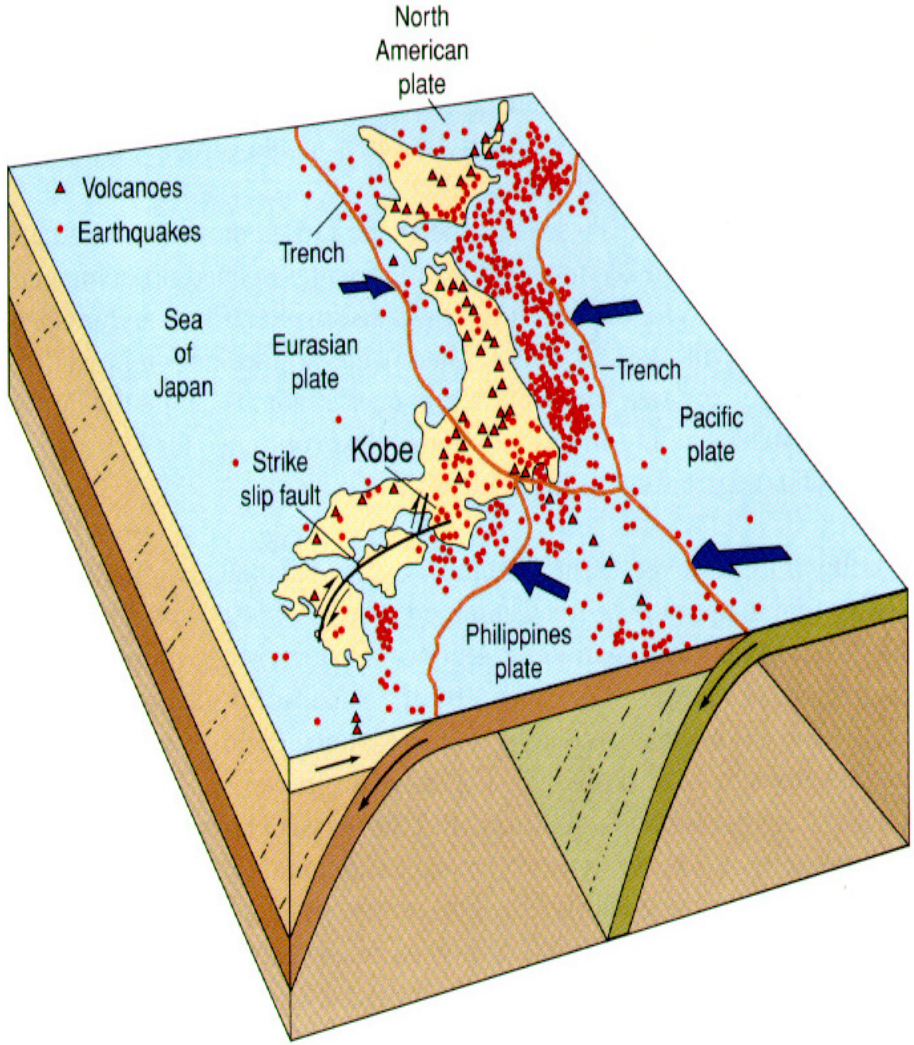
1. Сейсмические волны от очага
2. «Волны испаривания» или поверхностные волны Рэллея

Землетрясения – не глубокие
(Гаити 13, Чили 22, Япония 29 км)



Афтершоки







Обсуждение

На примере регионального анализа ряда крупных тектонических событий 2006-2012 г.г. :

- В ходе работы получено, что **методы GPS-интерферометрии**, вместе с дополнительной обработкой, позволяют выделять волноподобные структуры отклика в ионосфере на сейсмическую активность в регионе в целом.

2. Показано, что **сами сейсмически активные районы являются источниками акустических колебаний не только во время, но также до и после активной фазы землетрясения**. Источником волновых структур, проявляющихся в ионосфере, является не только будущий эпицентр, но прежде вся область подготовки землетрясения (границы тектонических плит и активные разломы).

3. В ряде случаев **интерпретировать получаемые данные весьма сложно** – не удастся отделить «литосферные» возмущения от естественной гео-гелио магнитной волновой активности ионосферы, орографических эффектов и т.п.

4. Все сказанное требует разработки методов учета процессов волновой передачи энергии из различных геосферных источников для модернизации модельных представлений о взаимодействиях в системе геосфер.

Main publications - 1

1. Захаров В.И., Куницын В.Е., Зиенко А.С. Методика обработки сигналов навигационной системы GPS для детектирования волновых возмущений в ионосфере. // XXI Всероссийская научная конференция “Распространение радиоволн”, 25-27 мая 2005 г., т.1, стр. 243-247
2. Захаров В.И., Куницын В.Е., Зиенко А.С. Методика обработки сигналов навигационной системы GPS для детектирования волновых возмущений в ионосфере. // Сб. трудов XXI Всероссийской науч. конф. “Распространение радиоволн”, Йошкар-Ола, 25-27 мая 2005 г., т.1, стр. 243-247.
3. Захаров В.И., Зиенко А.С. Метод статистического анализа вейвлет-спектров ионосферных сигналов системы GPS. // Вестник МГУ, сер.3 - Физика, Астрономия. 2007. N2. С. 44-49.
4. Захаров В.И., Зиенко А.С. Структуры ионосферных сигналов, выделенных методами GPS- радиointерферометрии. // Труды школы-семинара “Волны-2008”. 21-26 мая 2008г. Ч. 5. М., МГУ. С. 87-92
5. Захаров В.И., Зиенко А.С., Куницын В.Е. Распространение радио сигналов GPS при различной солнечной активности. // Эл.магн. волны и электронные системы. 2008. N 8. с. 51-57.
6. Zakharov V.I., Zienko A.S., Kunitsyn V.E. Changes of the wave structures spectrums in the ionosphere during geomagnetic storms. // Abstracts of International Conference “Plasma-wave processes in the Earth’s and planetary magnetospheres, ionospheres and atmospheres” N.Novgorod, Russia, 13-17 april. 2009. p. 49.

See last page...

Main publications – 2

7. В.И. Захаров, В.Е. Куницын Возможности регионального мониторинга атмосферных проявлений тропических циклонов по данным наземных GPS-сетей. //XII Всероссийская школа-семинар "Волновые явления в неоднородных средах". 2010. Секция 9. с.27-31.
8. Zakharov V.I. The using Of Wavelets and Clusterization for Navigation satellites Signals Pprocessing In the Top atmosphere research. // PSFVIP-8 Proceedings: The 8th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing, Moscow, Russia, August 21st-25th, 2011. Editor: Pr. I.A. Znamenskaya. ISBN 978-5-8279-0092-4. Pap. PSFVIP8-095 5 p.
9. Захаров В.И., Куницын В.Е., Титова М.А. Возможности и некоторые результаты регионального мониторинга ионосферы методом GPS- интерферометрии. // XXIII Всероссийская Научная Конференция РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН 22-25 мая 2011 г., Йошкар-Ола.
10. Zakharov V. I. and Kunitsyn V. E. Regional Features of Atmospheric Manifestations of Tropical Cyclones according to GroundBased GPS Network Data // Geomagnetism and Aeronomy, 2012, Vol. 52, No. 4, pp. 533–545 DOI: 10.1134/S0016793212040160
11. Захаров В. И., Будников П. А. The Application of Cluster Analysis to the Processing of GPS-Interferometry Data // Moscow University Physics Bulletin, 2012, Vol. 67, No. 1, pp. 25–32. DOI: 10.3103/S0027134912010262