

ИФЗ РАН



## СИСТЕМЫ ГНСС В ЗАДАЧАХ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЦУНАМИ

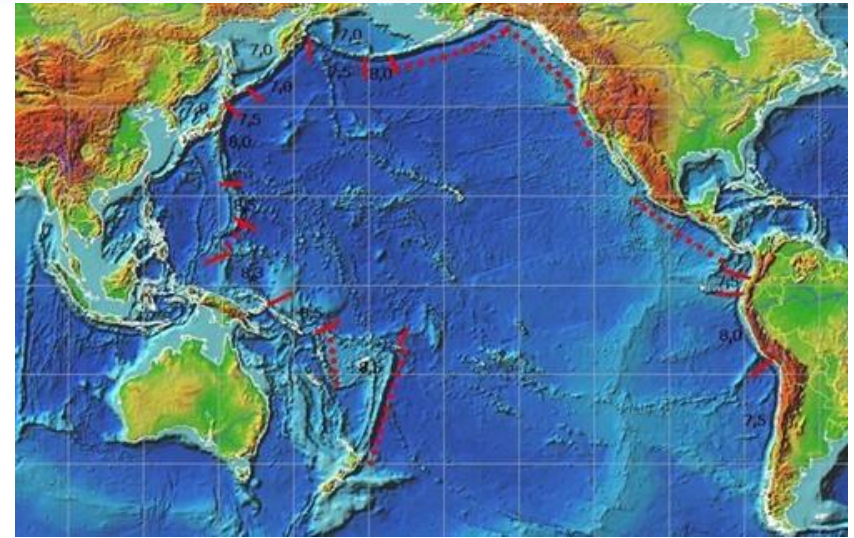
Стеблов Г.М.<sup>1,2</sup>, Сдельникова И.А.<sup>3</sup>

- <sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва
- <sup>2</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный
- <sup>3</sup>ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск

# Системы раннего предупреждения о цунами

- сейсмологические наблюдения
- морские уровнемерные посты
- донные датчики давления

Каждый из видов наблюдений характеризуется своими ограничениями в отношении своевременной и точной количественной оценки угрозы цунами.



Вариации уровня воды и придонного давления - информация о прохождении волны цунами, возможность заблаговременного предупреждения не обеспечивается.

Сейсмологические наблюдения - достаточно точная и оперативная локализация землетрясений, в том числе подводных.

Формирования оповещений о цунами по *магнитудно-региональному критерию*, согласно которому для каждого участка береговой линии устанавливаются пороговые значения магнитуд подводных цунамиопасных землетрясений для объявления тревоги.

Российская система сейсмических наблюдений на Дальнем Востоке неоднократно демонстрировала устойчивость и надежность за годы своего существования.

# Сейсмологическая система раннего предупреждения о цунами

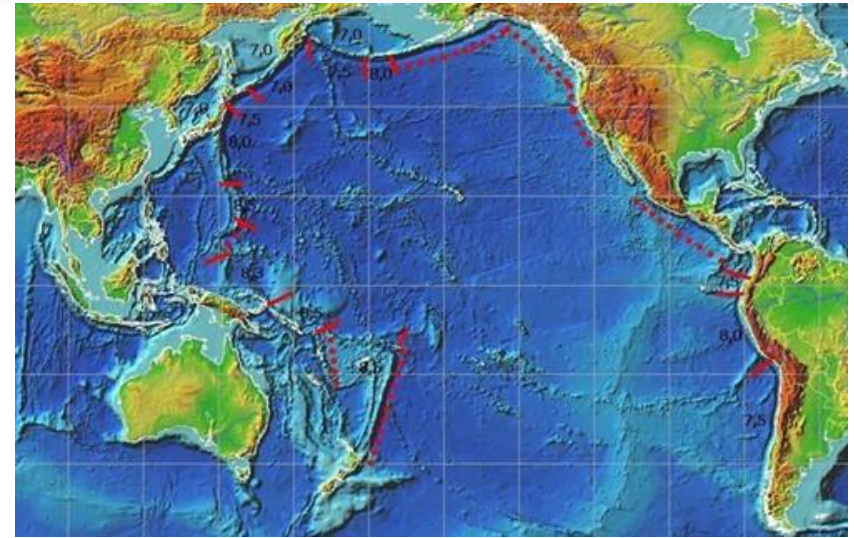
## Проблемы:

- не учитывается глубина события и механизм очага

Пример: Охотоморское землетрясение 24 мая 2013 г., на глубине 611 км - объявлена ложная тревога по формальным признакам магнитудно-регионального критерия, позже отменена.

- недооценка магнитуды события

Пример: Сильнейшее землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г.  
- сигнал тревоги объявлен в течение нескольких минут.  
Существенная недооценка магнитуды события привела к катастрофическим последствиям для обширной береговой инфраструктуры и населения прибрежной зоны из-за характерных аппаратурных проблем, связанных с сейсмическими наблюдениями.



Своевременная оценка моментной магнитуды для мега-землетрясений осложнена продолжительным временем развития сейсморазрыва, превышением предельных порогов регистрирующей аппаратуры (по амплитуде и частоте) и ограниченными возможностями анализа поверхностных волн при магнитудах свыше  $M_w 8$ .

## Направления усовершенствования:

Определение характеристик очага из анализа W-фаз - быстрый расчет характеристик сейсмического очага в целях предупреждения о цунами - надежный и простой способ определения главных характеристик очага в случае сильных землетрясений. Недостаток - временная задержка порядка 20 минут, которая необходима для сбора длиннопериодных телесеизмических данных.

**В то же время, предупреждение о цунами в ближней зоне землетрясения эффективно тогда, когда оно формируется в течение 5-10 минут от начала сейсморазрыва.**

# ГНСС

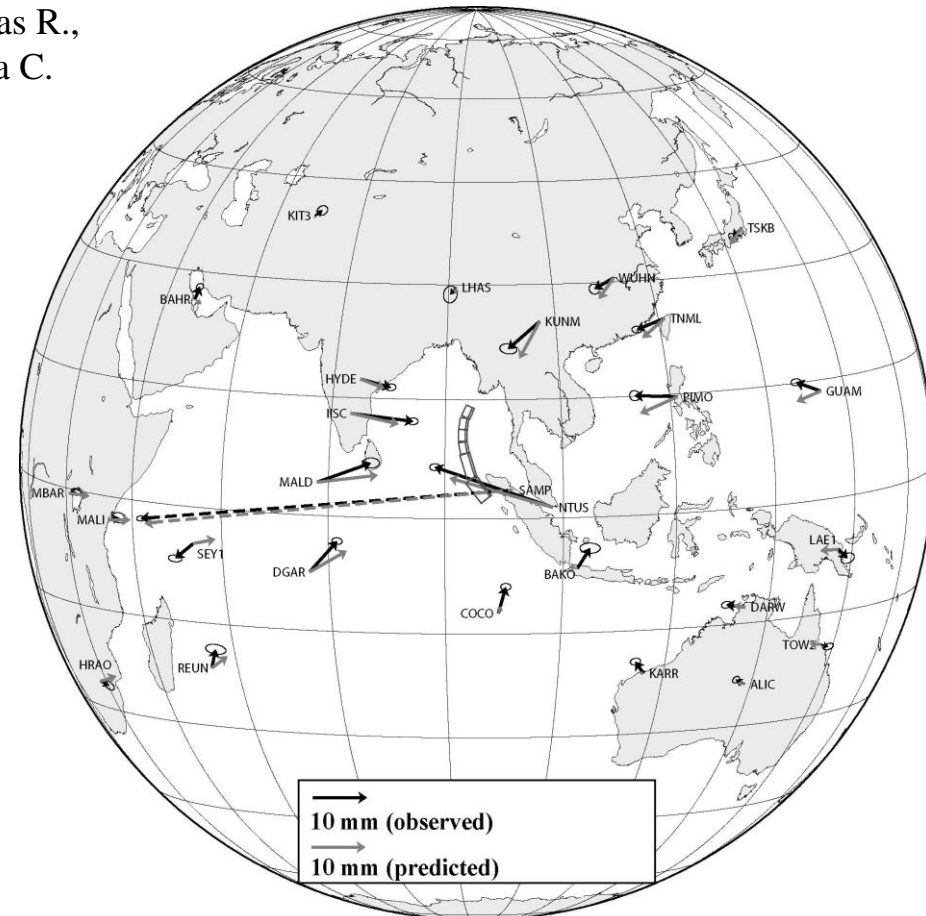
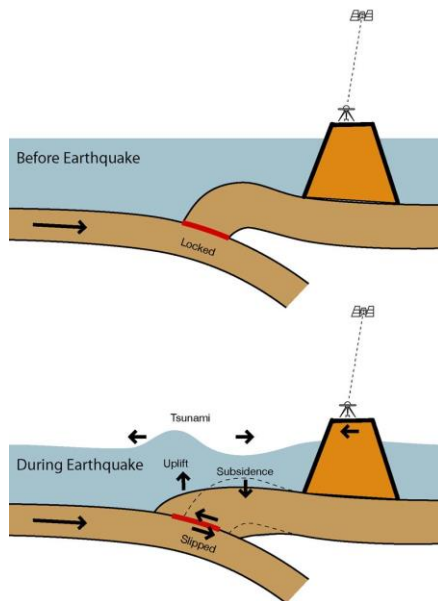
## Глобальные Навигационные Спутниковые Системы

Многочисленные исследования, проведенные после катастрофического землетрясения 26 декабря 2004 г. на Суматре, продемонстрировали способность сетей ГНСС обеспечивать оценки параметров сейсмических источников с приемлемым разрешением, всего за 3-5 минут.

1) Blewitt G., Kreemer C., Hammond W.C., Plag H.-P., Stein S., Okal E. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems // *Geophys. Res. Lett.*, 33, L11309. doi:10.1029/2006GL026145, 2006.

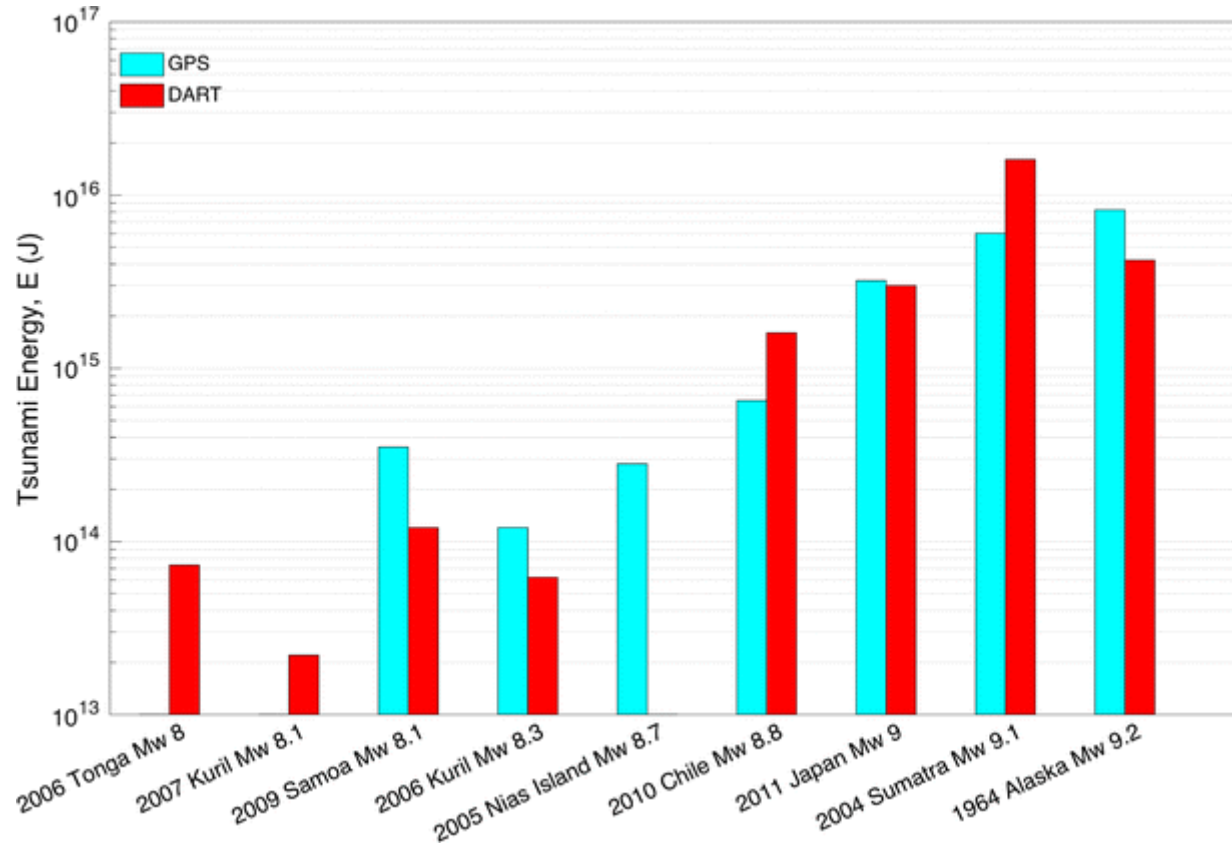
2) Sobolev S.V., Babeyko A.Y., Wang R., Hoechner A., Galas R., Rothacher M., Sein D.V., Schroter J., Lauterjung J., Subarya C. Tsunami early warning using GPS Shield arrays // *JGR*, V. 112, B08415, doi:10.1029/2006JB004640, 2007.

3) Song Y. Tony Detecting tsunami genesis and scales directly from coastal GPS stations // *Geophys. Res. Lett.*, 34, L19602, doi:10.1029/2007GL031681, 2007.



# ГНСС и DART

Недавние исследования продемонстрировали хорошее согласие между оценками на основе ГНСС и DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis).



Titov, V., Y. Tony Song, L. Tang, E. N. Bernard, Y. Bar-Sever, Y. Wei, Consistent Estimates of Tsunami Energy Show Promise for Improved Early Warning, *Pure Appl. Geophys.*, 173, P. 3863–3880, doi:10.1007/s00024-016-1312-1, 2016.

# Энергетические характеристики источника цунами

Для оценки энергетических характеристик источников цунами необходимы как потенциальные, так и кинетические компоненты смещений морского дна: вертикальное поднятие и скорость горизонтального смещения континентального склона. Существующий подход, предложенный Т.Сонгом (2008) для обнаружения смещений морского дна вдоль поперечного к шельфу профиля, основан на эмпирических соотношениях, связывающих искомые смещения дна с наблюдаемыми на береговой полосе смещениями ГНСС:

Потенциальная энергия:  $\Delta PE = \rho g \frac{\Delta \eta^2}{2} \Delta x \Delta y$

Кинетическая энергия:  $\Delta KE = \rho \frac{1}{2} (\Delta u_b^2 + \Delta v_b^2) \Delta x \Delta y \Delta z$

$$\Delta u_b(z) = \begin{cases} \Delta E / \Delta t, & -h \leq z \leq -R_x = h - \min\{h, L|h_x|\}, \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

$$\Delta v_b(z) = \begin{cases} \Delta N / \Delta t, & -h \leq z \leq -R_y = h - \min\{h, L|h_y|\} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

Суммарная энергия:  $E_T = \sum_{i,j} \Delta PE + \sum_{i,j,k} \Delta KE$

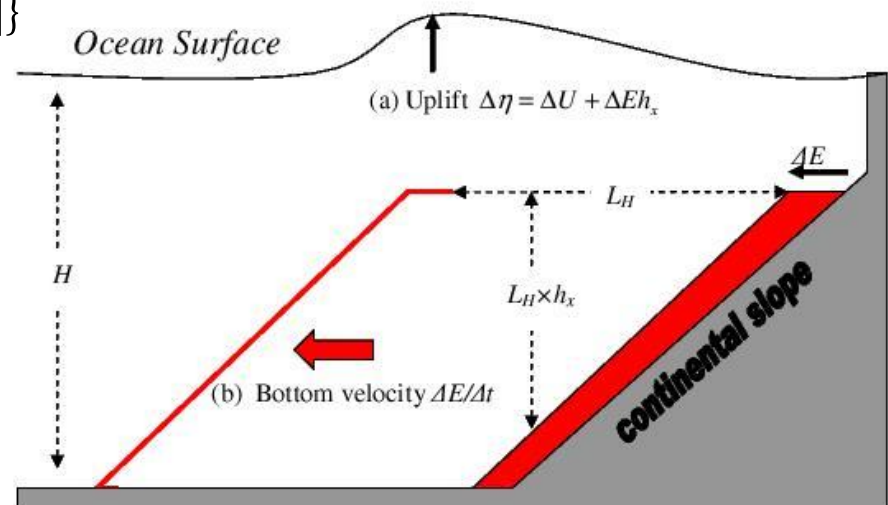
$$\Delta E(r) = \Delta E_j \exp(r_j^2 - r^2) + \Delta e_{j2}$$

$$\Delta N(r) = \Delta N_j \exp(r_j^2 - r^2) + \Delta n_{j2}$$

$$\Delta U(r) = \alpha \sqrt{\Delta E(0)^2 + \Delta N(0)^2} \times \left\{ \exp(-ar^2) - \sqrt{\frac{\pi}{4a}} \exp(-r) \right\}, \quad r = d/W$$

$$\Delta \eta \approx \Delta h = \Delta U + \Delta E h_x + \Delta N e_y$$

V. Titov, Y. Tony Song, L. Tang, E. N. Bernard, Y. BAR-SEVER, Y. Wei. Consistent Estimates of Tsunami Energy Show Promise for Improved Early Warning. *Pure Appl. Geophys.* 173 (2016), 3863–3880, doi: 10.1007/s00024-016-1312-1



# Смещения морского дна по данным ГНСС

Эмпирический подход к выявлению смещений морского дна можно улучшить путем физического моделирования на основе теории дислокации в два этапа:

- 1) восстановление конечной модели очага по наблюдаемым поверхностным смещениям в прибрежной полосе:

$$u(r) = \iint_S G(r, r_s) U(r_s) dS$$

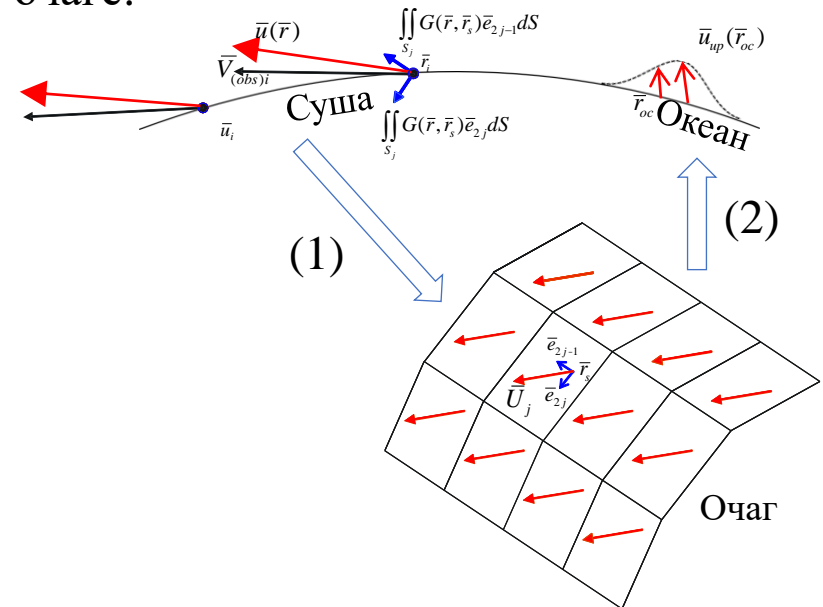
$$U(r_s) = \arg \min_{U(r_s)} \{ \|u_{obs}(r) - \iint_S G(r, r_s) U(r_s) dS\| + \alpha \|U(r_s)\| \}$$

- 2) расчет поднятия морского дна и горизонтального движения континентального склона из модели распределенной подвижки в очаге:

$$u(r_{oc}) = \iint_S G(r_{oc}, r_s) U(r_s) dS$$

Ключевые вопросы:

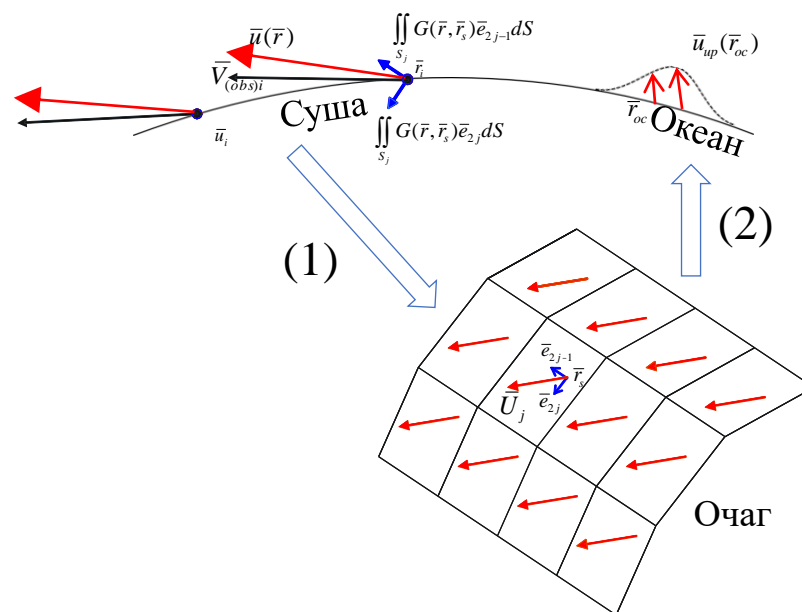
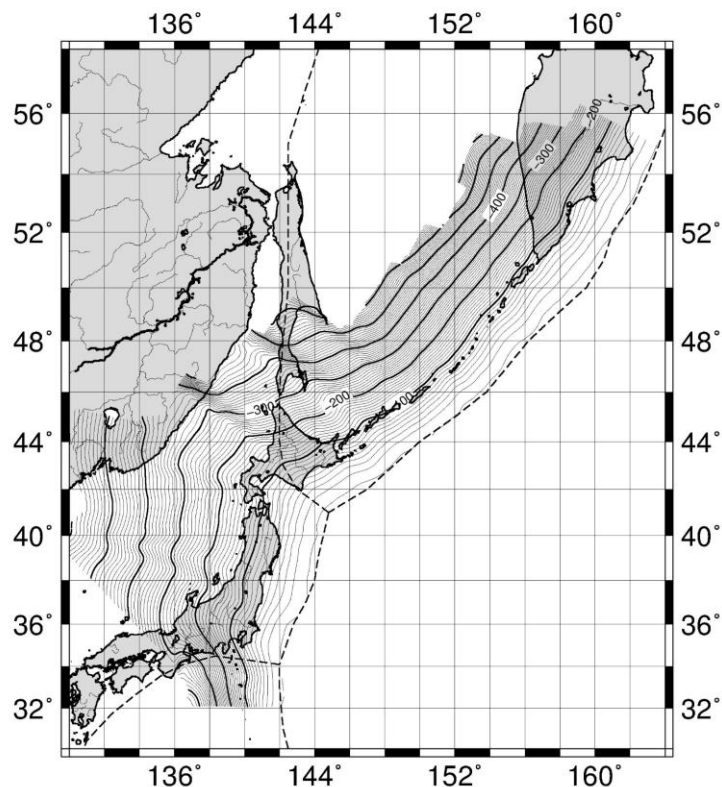
- 1) оперативность
- 2) точность



# Смещения морского дна по данным ГНСС

## Оперативность

Предварительное картирование глубинного строения зоны субдукции позволяет заранее выполнить все ресурсоемкие расчеты функции отклика среды, что обеспечивает оперативную готовность соотношений, связывающие распределение подвижки в очаге с поверхностными смещениями.

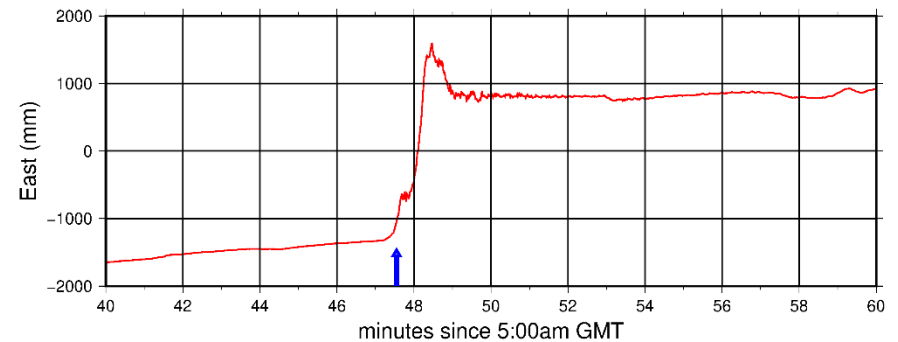
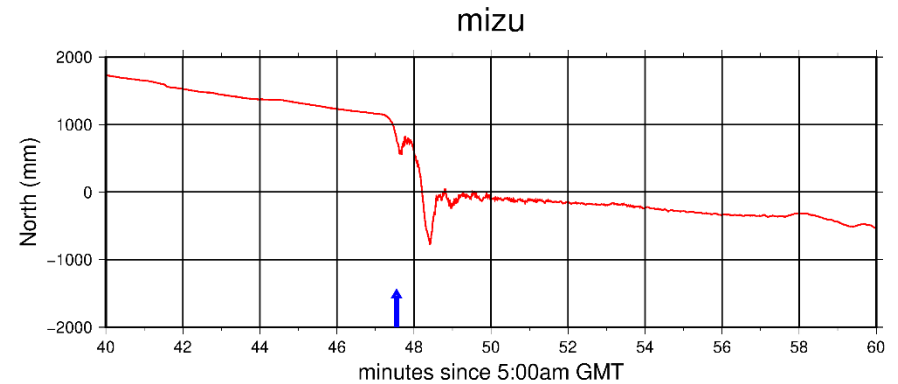
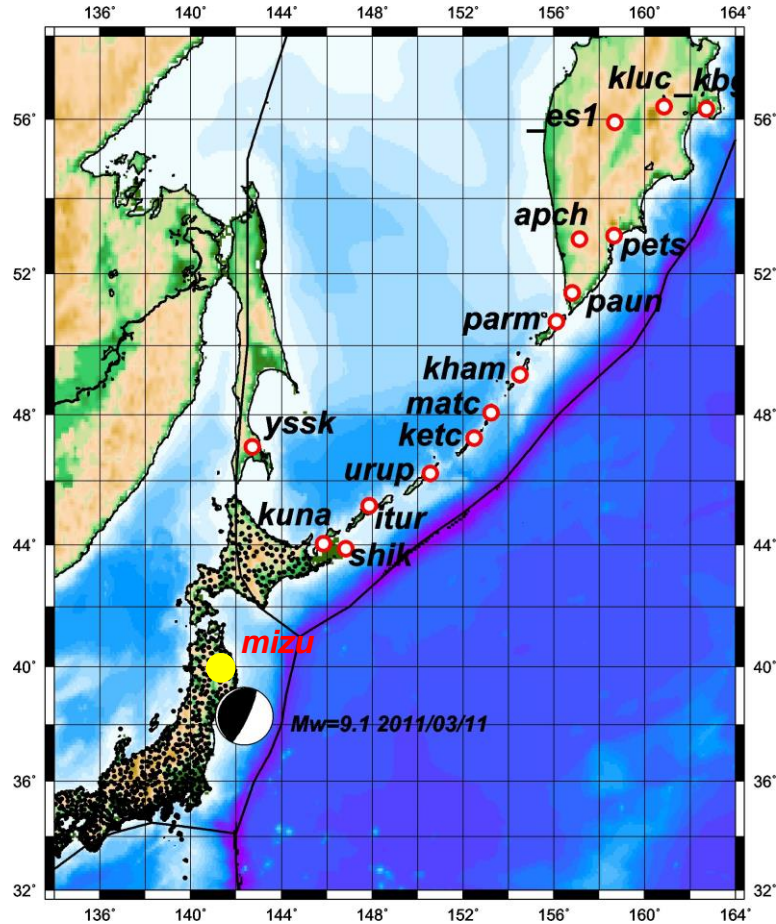




# ГНСС

## Оперативность

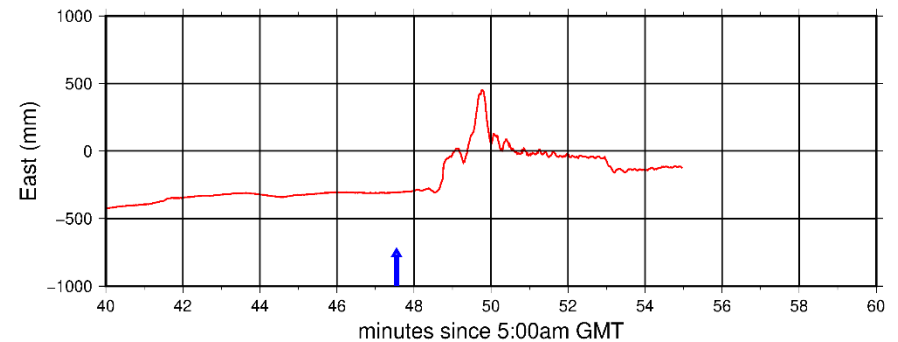
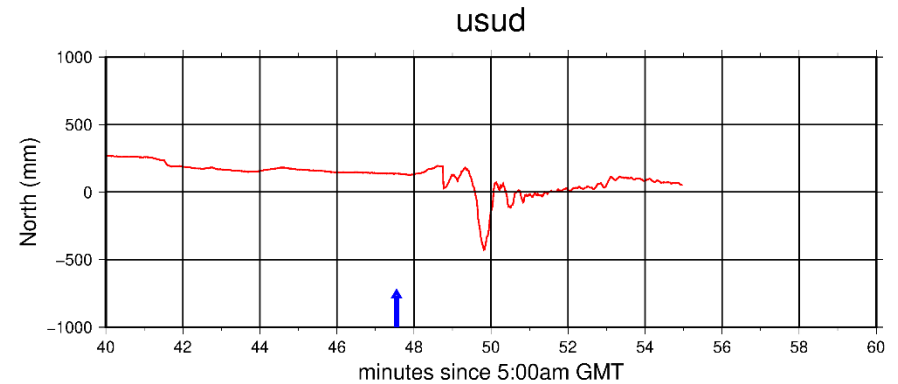
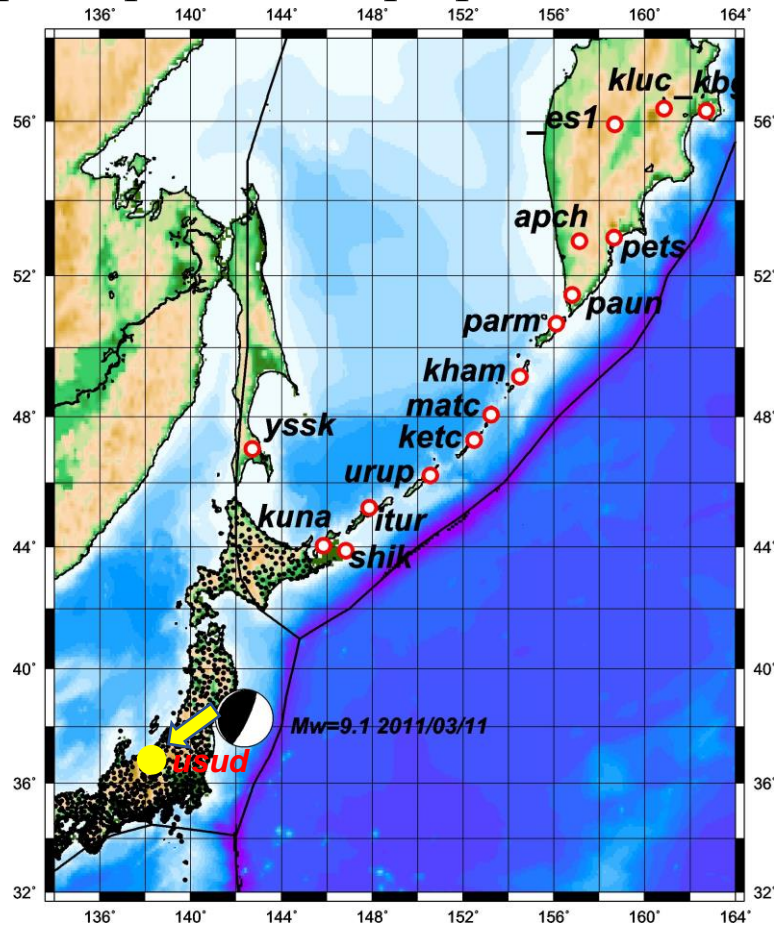
Оценки косейсмических смещений доступны в режиме реального времени в течение минут по данным станций ГНСС, расположенным в непосредственной близости от сейсморазрыва (на расстоянии, сопоставимом с размером сейсморазрыва).



# ГНСС

## Оперативность

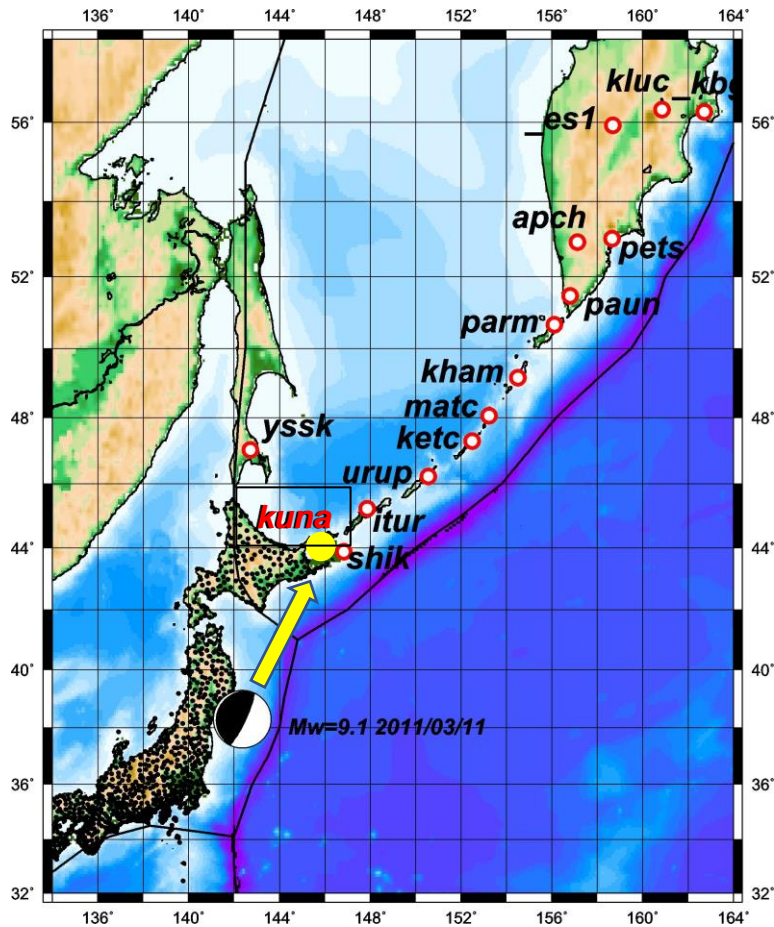
Оценки косейсмических смещений доступны в режиме реального времени в течение минут по данным станций ГНСС, расположенным в непосредственной близости от сейсморазрыва (на расстоянии, сопоставимом с размером сейсморазрыва).



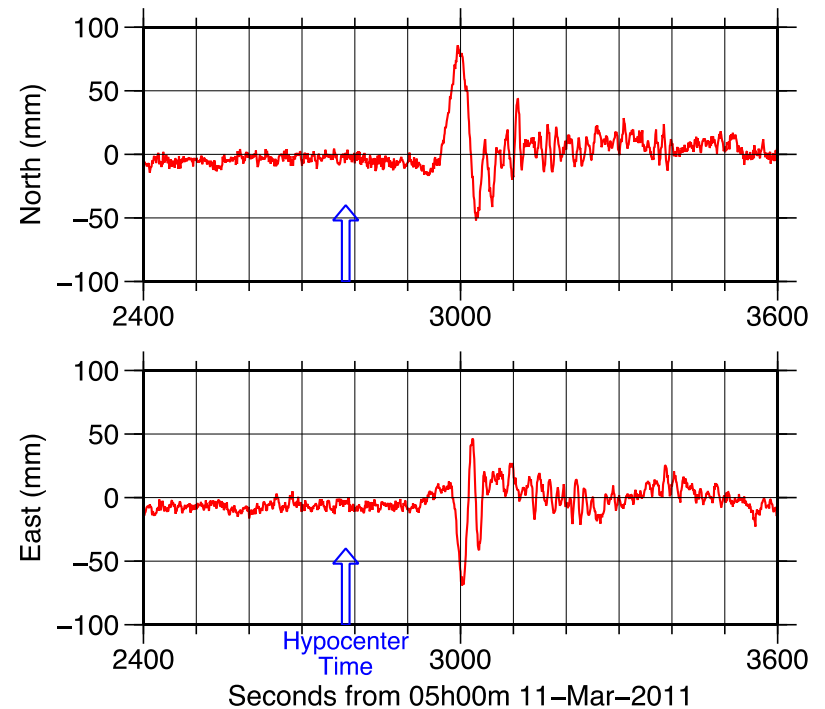
# ГНСС

## Оперативность

Для сильнейших событий косейсмические колебания также заметны на больших эпицентральных расстояниях в течение минут.



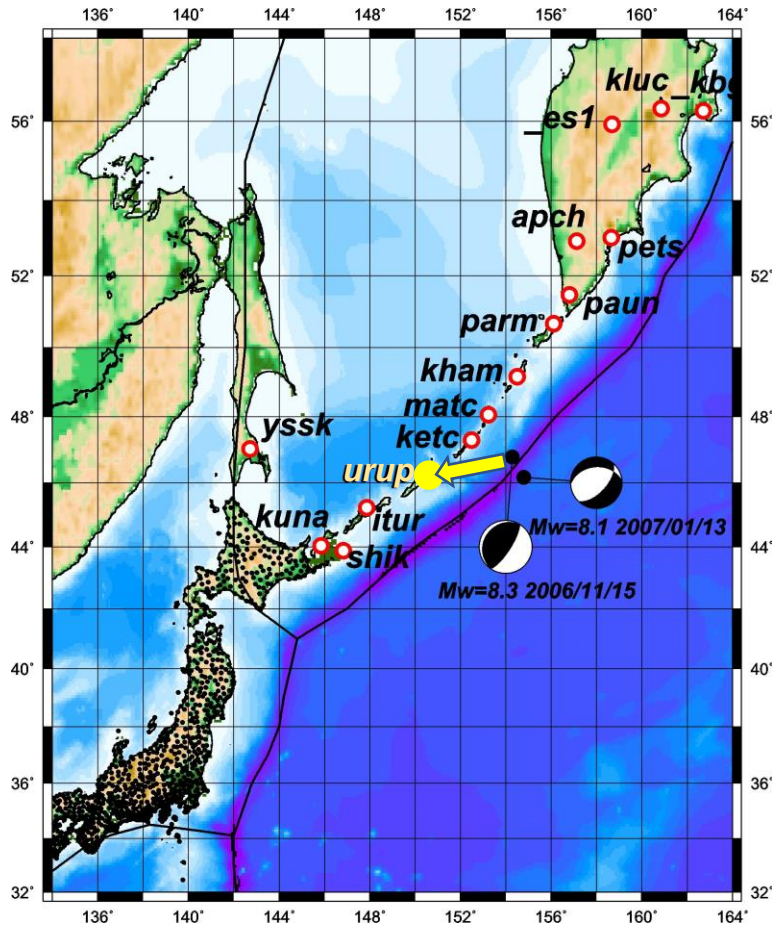
Tohoku 11 March 2011 Mw9.0 Earthquake  
Surface waves recorded by 1 Hz GPS  
Kunashir Island – Kuril GPS Array



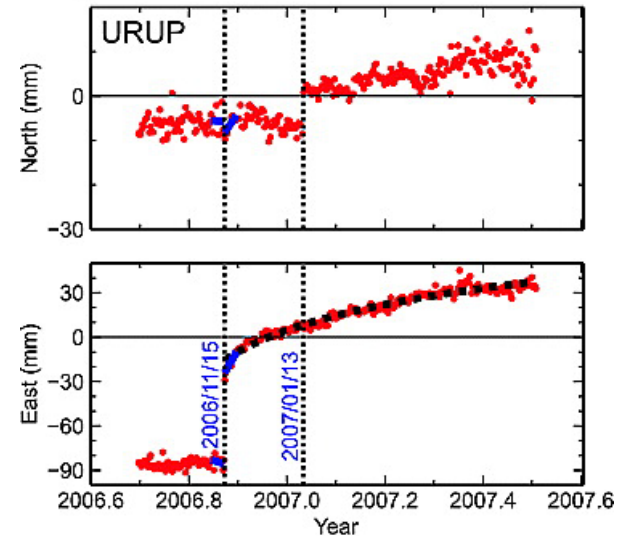
# ГНСС

## Точность

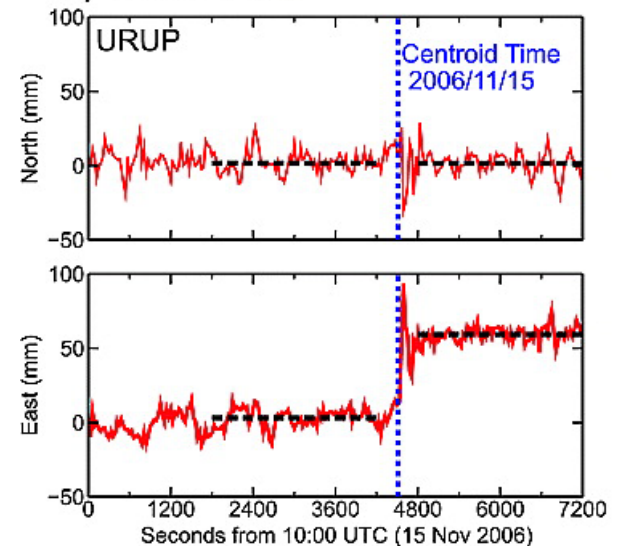
Оценки косейсмических смещений в режиме реального времени сопоставимы по точности с результатами последующей прецизионной фильтрации с многосуточным осреднением.



a) 24-hour Solution

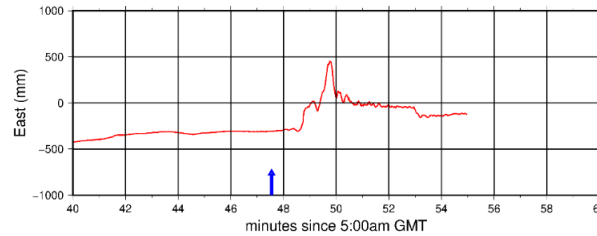
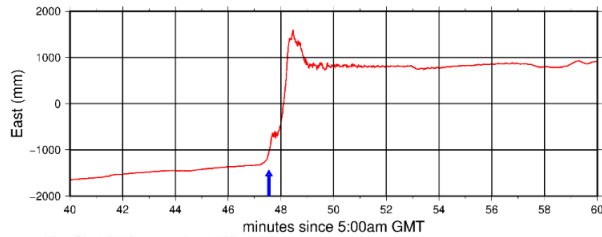
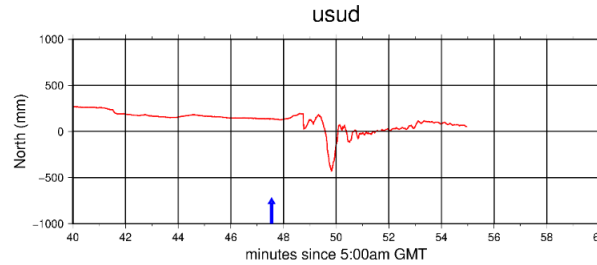
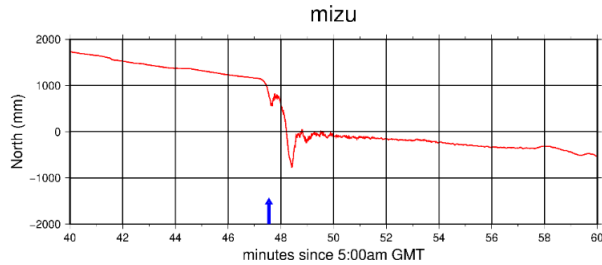


b) 30-s Solution

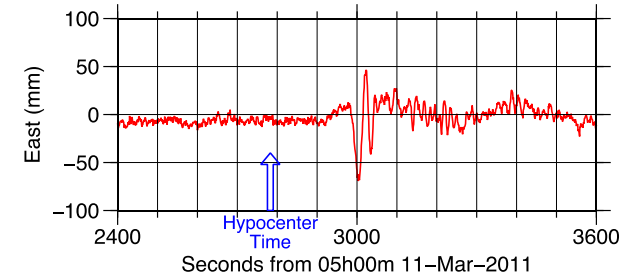
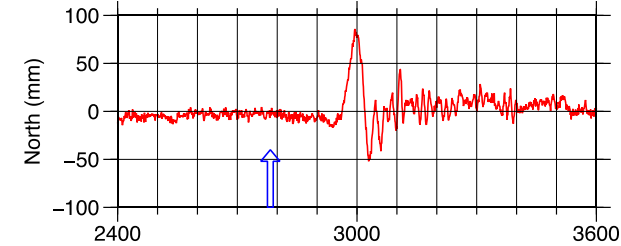


# ГНСС

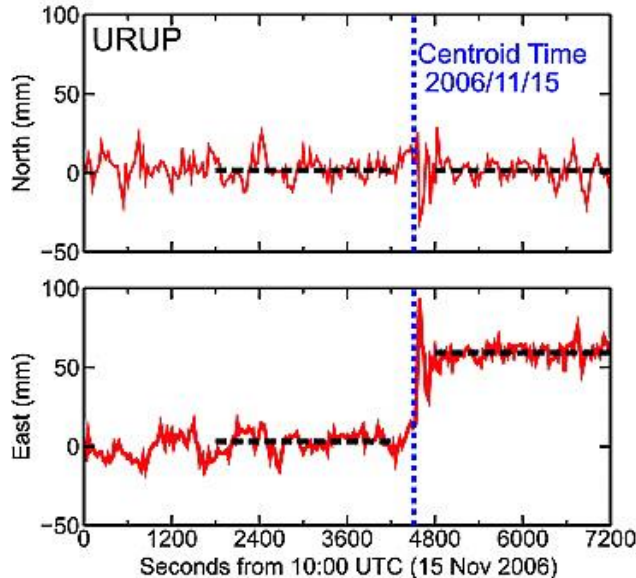
## Оперативность и точность



Tohoku 11 March 2011 Mw9.0 Earthquake  
Surface waves recorded by 1 Hz GPS  
Kunashir Island – Kuril GPS Array



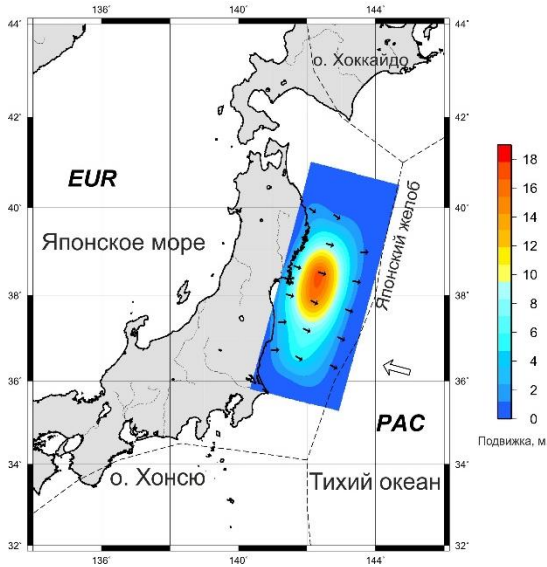
### b) 30-s Solution



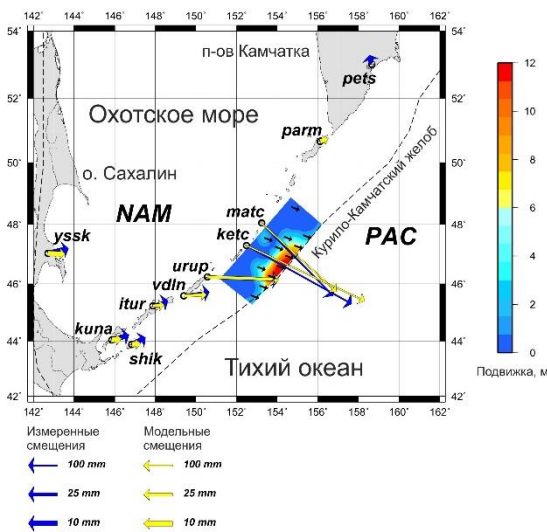
По мере убывания эпицентрального расстояния заметно возрастает поступательная составляющая в сейсмических смещениях на фоне колебательного процесса. Остаточное смещение – наиболее проблемная составляющая для оценки по сейсмическим записям в силу ограниченной чувствительности инерциальных датчиков в низкочастотной области.

# Модели очага по данным ГНСС

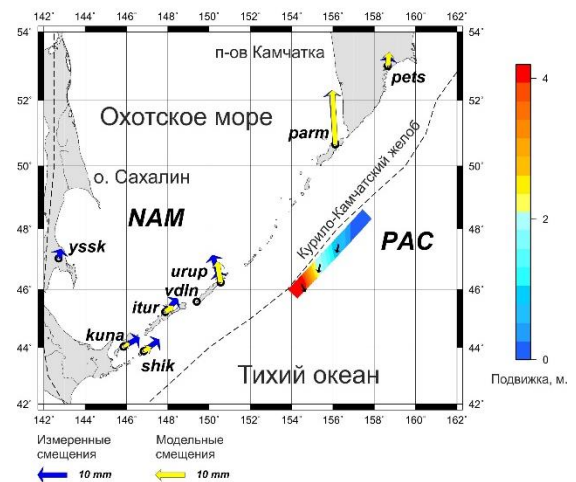
11.03.2011



15.11.2006



13.01.2007

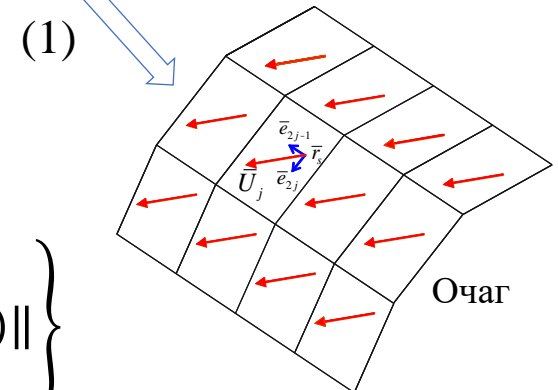
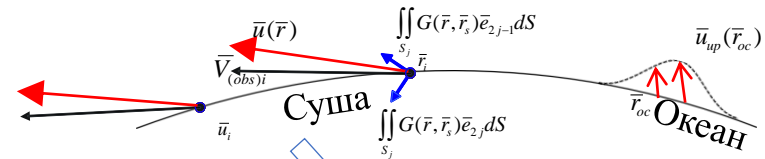


Моделирования на основе теории дислокации:

- восстановление конечной модели очага по наблюдаемым поверхностным смещениям в прибрежной полосе:

$$u(\mathbf{r}) = \iint_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) U(\mathbf{r}_s) dS$$

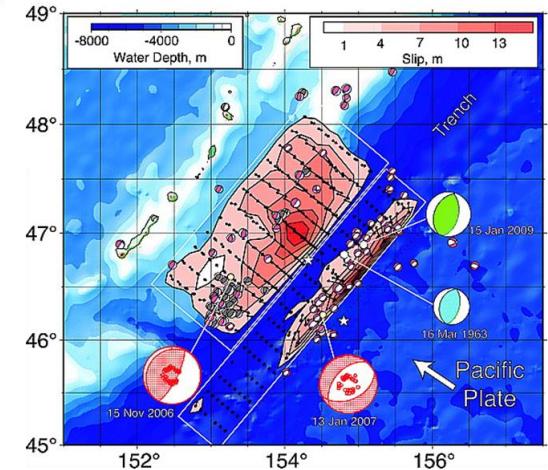
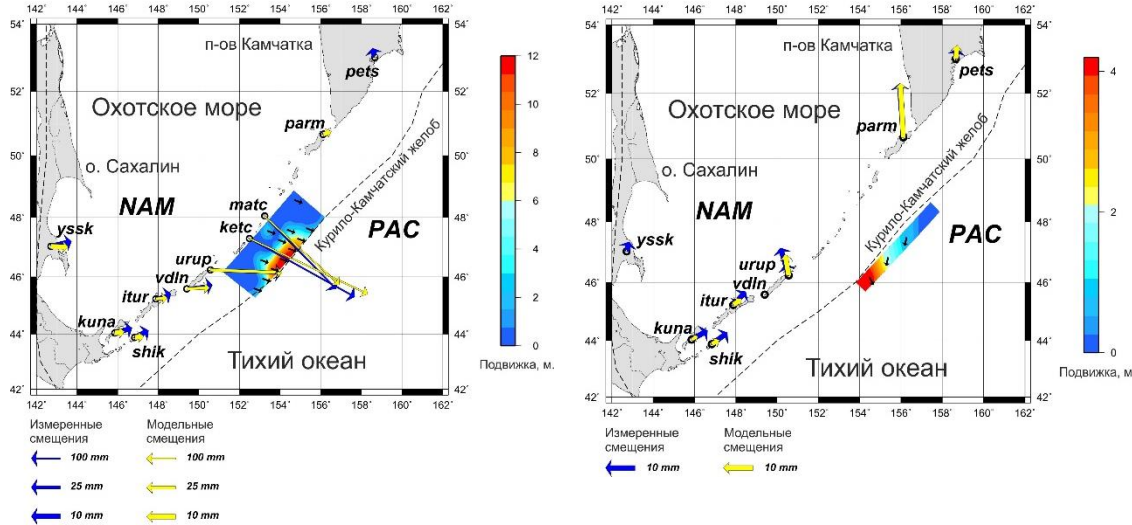
$$U(\mathbf{r}_s) = \arg \min_{U(\mathbf{r}_s)} \left\{ \left\| u_{obs}(\mathbf{r}) - \iint_S G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_s) U(\mathbf{r}_s) dS \right\| + \alpha \|U(\mathbf{r}_s)\| \right\}$$



# Модели очага по данным ГНСС

## Точность

### Землетрясения 15.11.2006 и 13.01.2007



Lay T., Kanamori H., Ammon C.J., Hutko A.R., Furlong K., Rivera L. The 2006–2007 Kuril Islands great earthquake sequence // J. Geophys. Res. – 2009. – V. 114. – N. B11308. – P.1–5.

Модели очага, рассчитанные на основе поверхностных смещений с использованием данных ГНСС, как правило, хорошо согласуются с уточненными телесейсмическими оценками конечной модели очага с распределенной подвижкой, получаемой в течение нескольких дней после события, и могут значительно отличаться от стандартной точечной модели очага (GCMT) в случае сильных землетрясений.

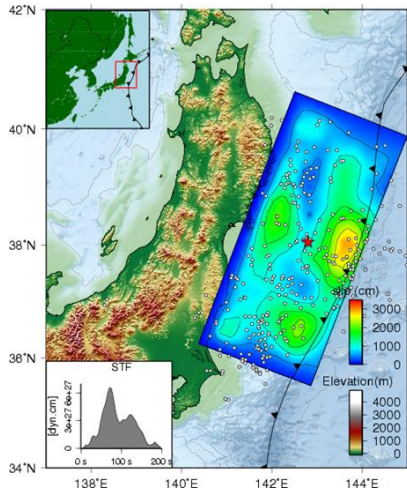
Scalar moment release and magnitude: various estimates.		
Solution	Event	
	2006/11/15	2007/01/13
Distributed slip, this study	$M_0=5.93 \times 10^{28}$ , $M_w = 8.5$	$M_0=3.05 \times 10^{28}$ , $M_w=8.3$
Uniform slip, this study	$M_0=1.57 \times 10^{28}$ , $M_w = 8.1$	$M_0=0.85 \times 10^{28}$ , $M_w=7.9$
CMT	$M_0=3.51 \times 10^{28}$ , $M_w = 8.3$	$M_0=1.78 \times 10^{28}$ , $M_w = 8.1$
P-waves, body-waves [Lay et al, 2009]	$M_0=5.0 \times 10^{28}$	$M_0=2.6 \times 10^{28}$

# Модели очага по данным ГНСС

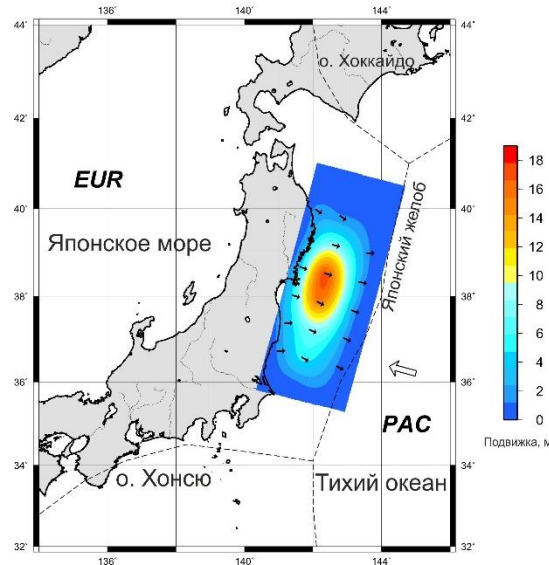
## Точность

### Землетрясение 11 марта 2011

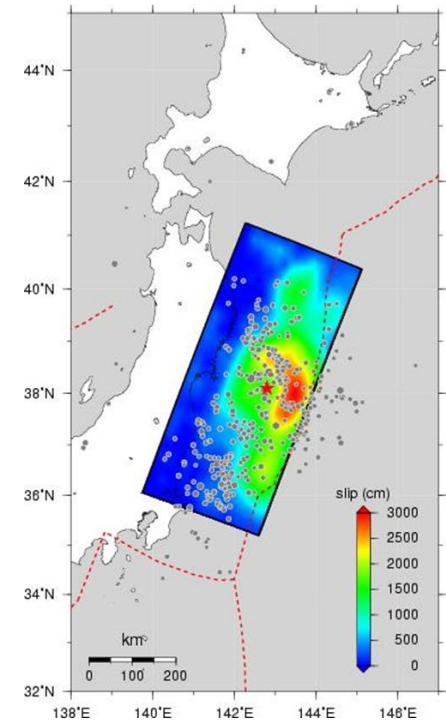
Телесейсмическое решение



Геодезическое решение



Комбинированное решение

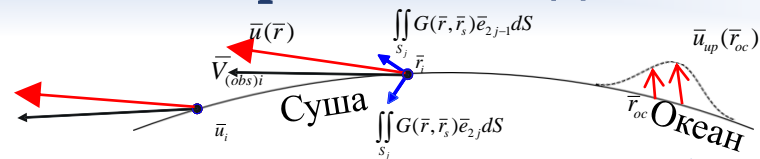
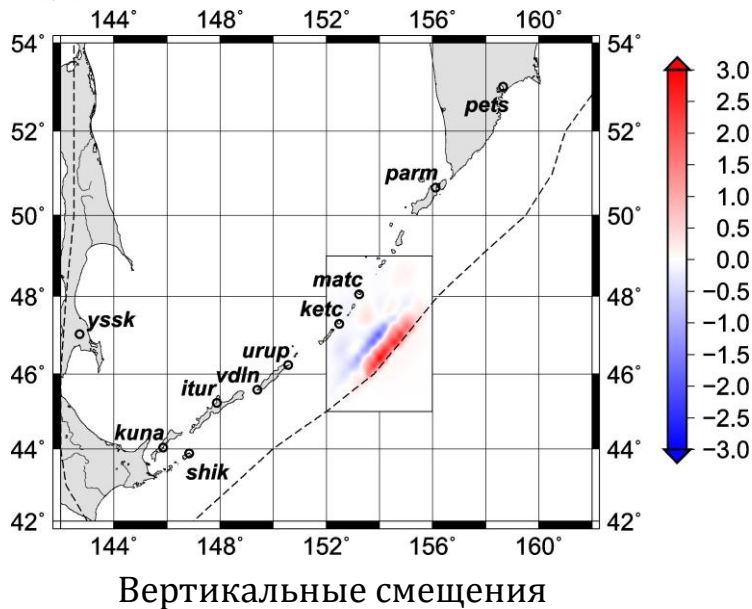
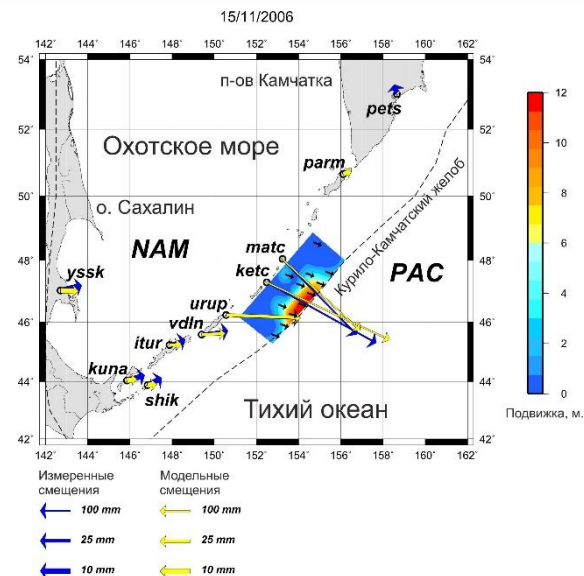


Модели очага, рассчитанные на основе поверхностных смещений с использованием данных ГНСС, как правило, хорошо согласуются с уточненными телесейсмическими оценками конечной модели очага с распределенной подвижкой, получаемой в течение нескольких дней после события, и могут значительно отличаться от стандартной точечной модели очага (GCMT) в случае сильных землетрясений.

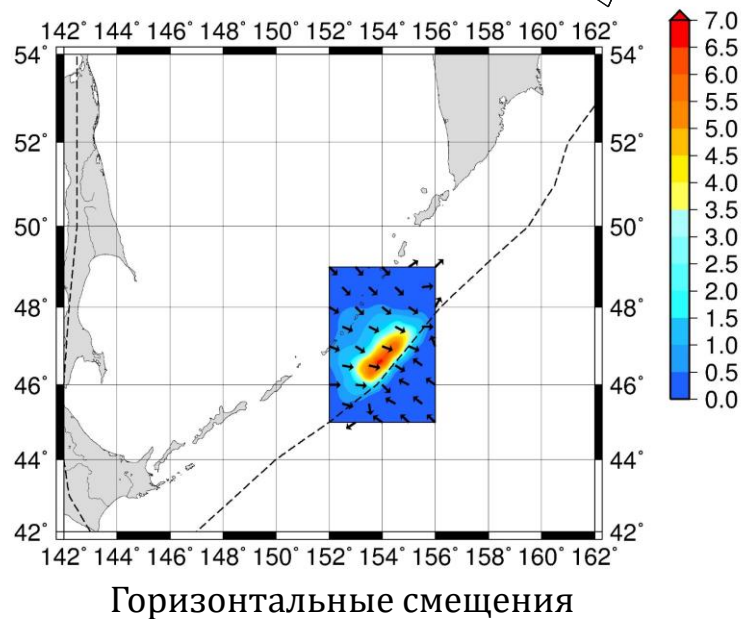
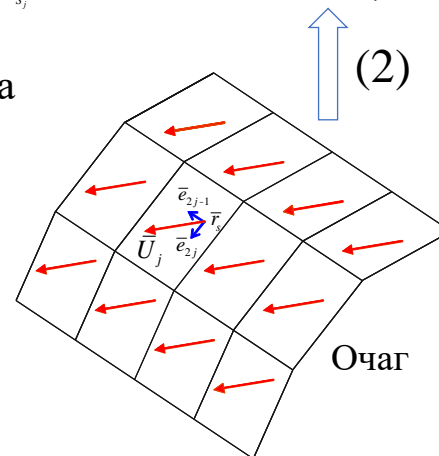


# Смещения морского дна по данным ГНСС

## Землетрясение и цунами 15 ноября 2006 года

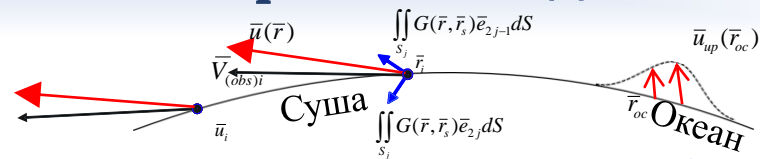
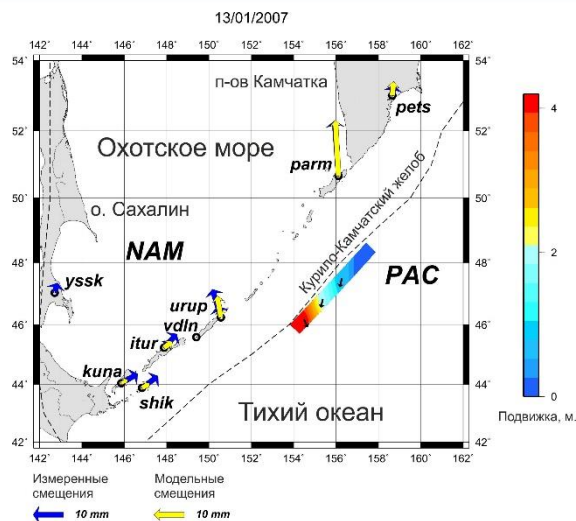


2) расчет поднятия морского дна и горизонтального движения континентального склона из модели распределенной подвижки в очаге:

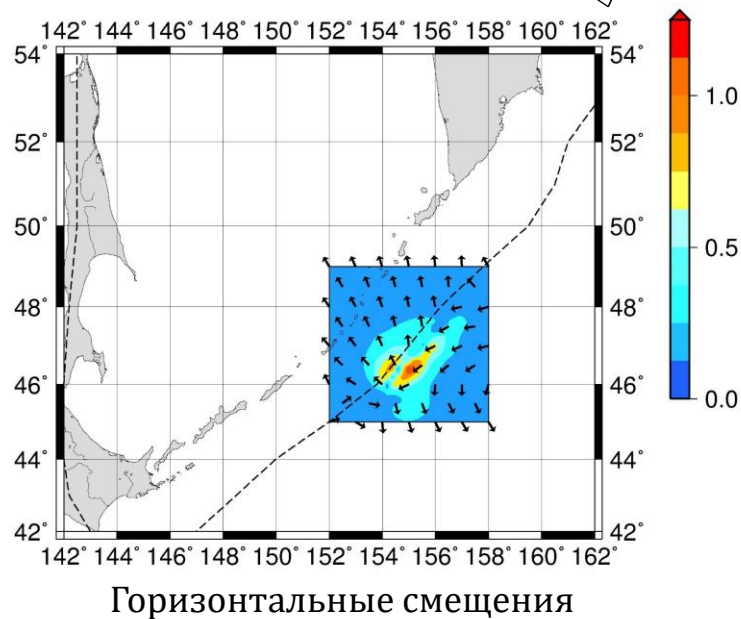
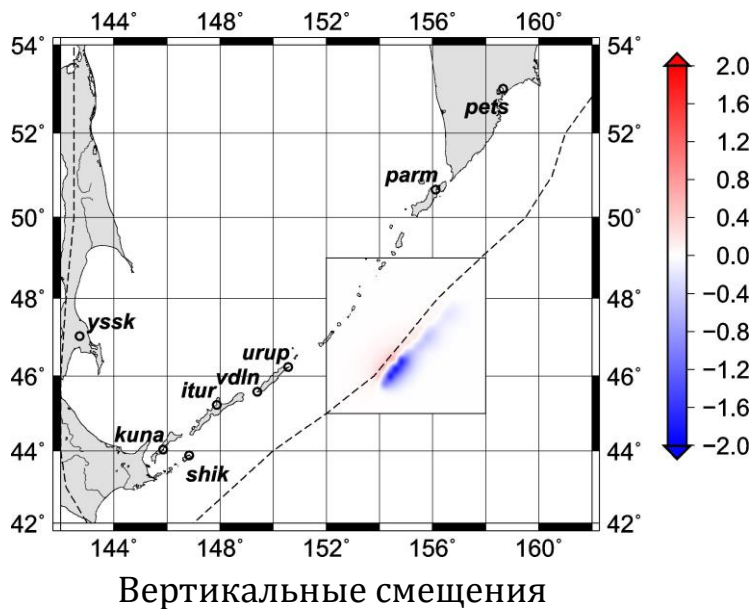
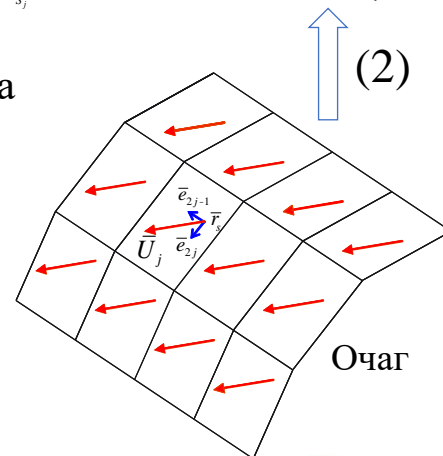


# Смещения морского дна по данным ГНСС

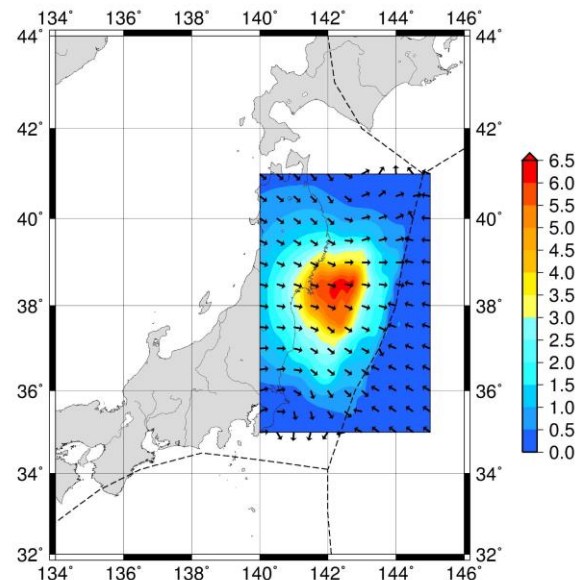
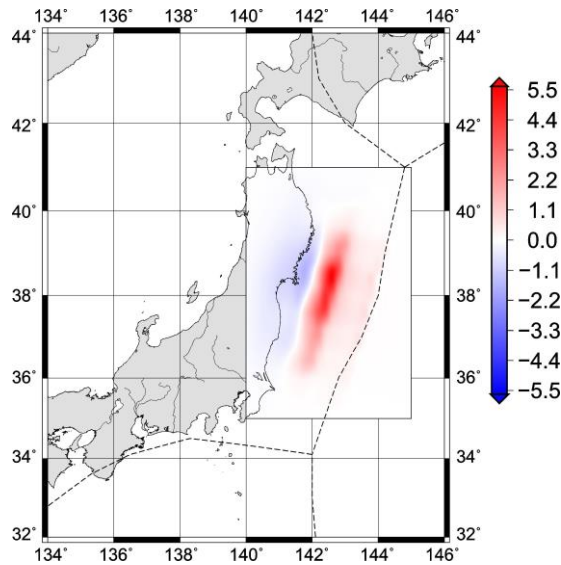
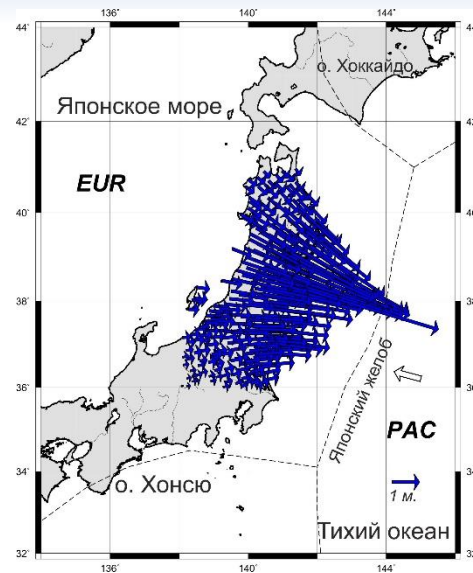
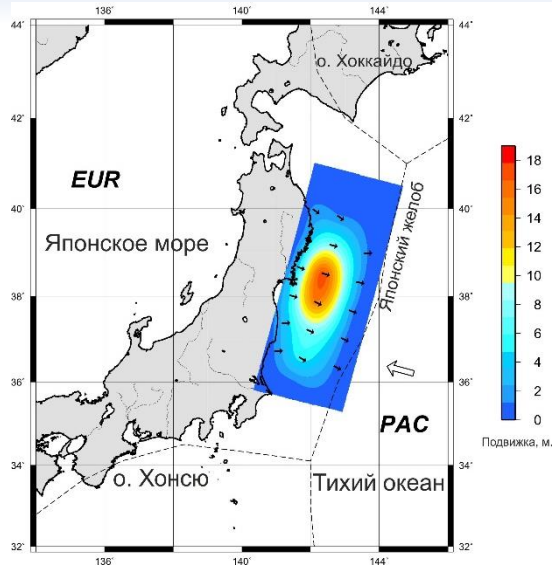
## Землетрясение и цунами 13 января 2007 года



2) расчет поднятия морского дна и горизонтального движения континентального склона из модели распределенной подвижки в очаге:



# Смещения морского дна по данным ГНСС Землетрясения и цунами 11 марта 2011 года

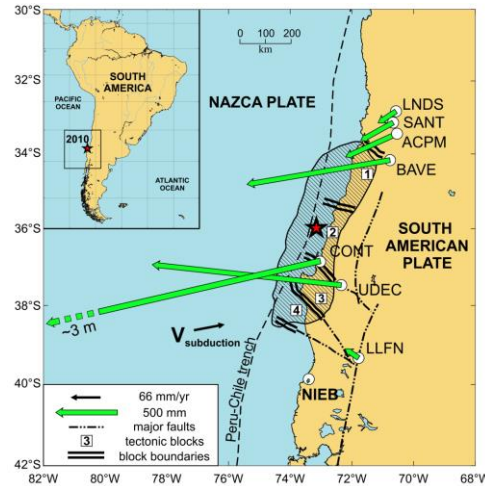
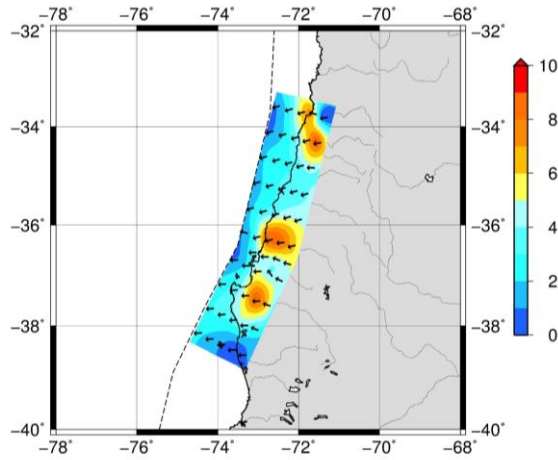


Вертикальные смещения

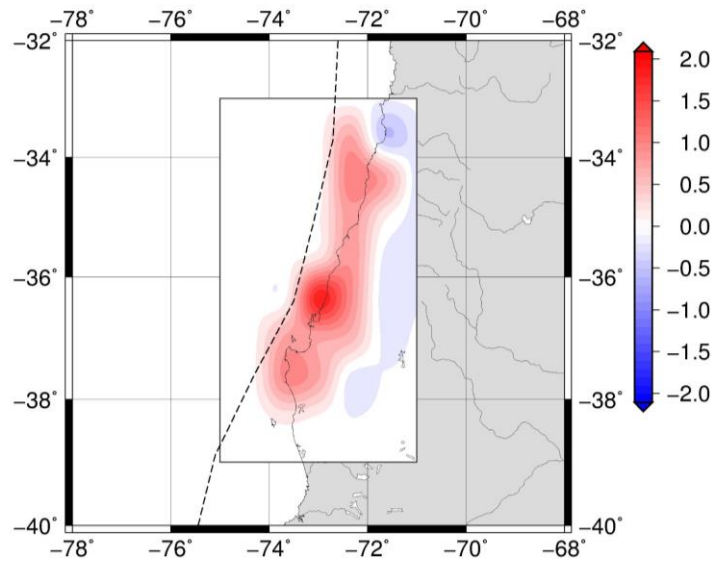
Горизонтальные смещения

# Смещения морского дна по данным ГНСС

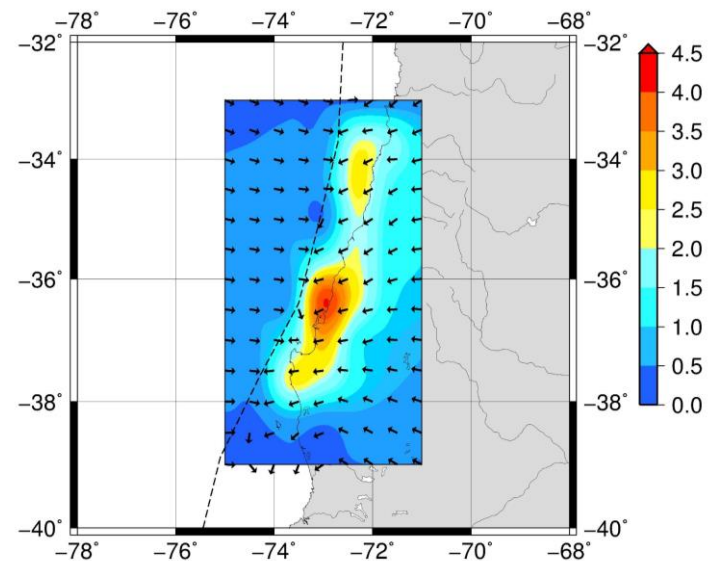
## Землетрясение и цунами 27 февраля 2010 года



Lobkovsky L.I., Vladimirova I.S., Gabsatarov, Y.V.  
 Baranov B.V., Garagash I.A., Steblou G.M.  
 Seismotectonic deformations related to the 2010  
 Maule earthquake at different stages of the seismic  
 cycle on the basis of satellite geodetic data //  
 Doklady Earth Sciences. 2017. V. 477. N. 2. 1498–  
 1503. DOI: 10.1134/S1028334X17120261



Вертикальные смещения



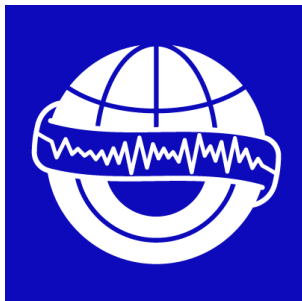
Горизонтальные смещения

# Заключение

Интеграция дополнений на базе ГНСС в глобальную систему раннего предупреждения о цунами сможет обеспечить точное, своевременное, экономически эффективное и устойчивое формирование предупреждений о цунами в случае мега-землетрясений по всему земному шару.

Практические меры, необходимые для повышения эффективности:

- сокращение времени регистрации сигнала за счет установки станций ГНСС в ближней зоне возможных очагов;
- организация передачи данных в центры обработки в режиме реального времени;
- усовершенствование расчетов функций отклика и их предварительное формирование для известных цунамиопасных участков береговых линий.



**ИФЗ РАН**



**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**