

Сектор геодинамического мониторинга

Спутниковый геодезический мониторинг деформационных процессов в зонах субдукции

И.А. Сдельникова, Г.М. Стеблов

Петропавловск-Камчатский, 2019

Глобальные Навигационные Спутниковые Системы



Станции международной ГНСС службы (IGS) • Станции сети IGS непрерывно работающие

• Станции сети IGS временно недоступные



ГНСС – Глобальные Навигационные Спутниковые Системы



Развернутые во многих сейсмически опасных регионах достаточны густые сети спутниковых геодезических измерений позволяют исследовать пространственные вариации деформационных процессов с высокой разрешающей способностью, а наличие многолетних измерений позволяет проследить вариации таких процессов по времени.

Сильнейшие субдукционные землетрясений



Blewitt, G., C. Kreemer, W. C. Hammond, H.-P. Plag, S. Stein, and E. Okal, GPS for real time earthquake source determination and tsunami warning systems, J Geod 83:335–343, DOI 10.1007/s00190-008-0262-5, 2009.





Song, Y. T., I. Fukumori, C. K. Shum, and Y. Yi, 2012: Merging sunamis of the 2011 Tohoku-Oki earthquake detected over the open ocean, GRL,doi:10.1029/2011GL050767

Наиболее активные геодинамические процессы на Земле. приводящие к сильнейшим землетрясениям, происходят в зонах Большая субдукции. часть 30H субдукции расположена В акваториях мирового океана, и, как следствие, происходящие землетрясения носят цунамигенный характер. Часто наибольший ущерб наносит не само землетрясение, а возникающие в его результате волны цунами.

Тектонические процессы в зонах субдукции Японская и Курило-Камчатская зоны субдукции M8.3 KURIL ISLANDS 2006-11-15 11:14:14 Lat= 46.57 Lon= 153.29 z=12.2km 148° 140 144° 152° 156 160 136 OXOTCKOE MOPE п-ов Камча **OXOTCKOE MOPE** 56 т-ов Камчатк о. Сахалин apch pe Сахалин paul 52° NAM parm IRIS kham. M8.1 EAST OF KURIL ISLANDS 2007-01-13 04:23:23 Lat= 46.24 Lon= 154.52 z=22.5km matc 48 Mw=8.1 2007/01/13 Mw=8.3 2006/11/15 EUR PAC 40 IRIS $M_{W}=9.1 \ 2011/03/1$ ОСтанции Курило-ГИХИЙ ОКЕАН M8.9 NEAR EAST COAST OF HONSHU, JAPAN 2011-03-11 05:46:23 Lat= 38.32 Lon= 142.37 z=24.4km Камчатской сети ТИХИЙ ОКЕАН Станции Японской сети 144° 148° 152* 140° 144° 148° 152° 156° 160° 164 Симуширские землетрясения Японская и Курило-Камчатская зоны 15.11.2006 г. Мw=8.3 и субдукции относятся числу К 13.01.2007 г. Мw=8.1 наиболее сейсмически активных IRIS регионов Земного шара.

Великое Японское землетрясение 11.03.2011 г. Мw=9.1

Многолетние наблюдательные сети спутниковых геодезических измерений Курило-Камчатского и Японского регионов позволили исследовать пространственно-временные вариации деформационных процессов и сейсмические деформации сильнейших цунамигенных землетрясений данных регионов.

Тектонические процессы в зонах субдукции



континентальной окраине и, в частности, на ее поверхности обусловлено пододвиганием океанической плиты под континентальную и механическим сцеплением этих плит.

Lay T., Kanamori H. Earthquake doublets in the Solomon Islands // Phys. Earth Planet. Inter. - 1980. - V. 21. -N. 4. -P.283–304.

Моделирование деформаций в зонах субдукции

Коэффициент межплитового сцепления





Lay T., Kanamori H. Earthquake doublets in the Solomon Islands // Phys. Earth Planet. Inter. - 1980. - V. 21. -N. 4. - P.283–304.

V_{lock} – скорость нижнего края нависающей плиты
V_{subd} – скорость пододвигания погружающейся плиты
Коэффициент межплитового сцепления показывает
интенсивность накопления упругих напряжений и
характеризует дефицит выделения скалярного
сейсмического момента.

Исходя из такой модели, пространственно-временные вариации коэффициента межплитового сцепления определяют деформированное состояние в зонах субдукции.

Спутниковые геодезические наблюдения

Станции региональных сетей











Региональные сети станций ГНСС:

- Камчатская региональная сеть КФ ФИЦ ЕГС РАН
- Курильская сеть ИМГиГ ДВО РАН
- Японская сеть GEONET

Спутниковые геодезические наблюдения

Временные ряды



В спутниковых геодезических измерениях проявляются как быстрые, так и медленные смещения земной поверхности. Спутниковые геодезические измерения дают возможность детального изучения деформационных процессов в сейсмически активных регионах на разных стадиях сейсмического цикла, в том числе в ходе подготовки сильнейших катастрофических землетрясений.

Моделирование глубинных деформаций



Hayes G.P., Wald D.J., Johnson R.L. Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries // J. Geophys. Res. – 2012. – V. 117. – N. B01302. – P.1–15.

Геометрия сейсмогенной зоны Японо-Курило-Камчатского региона по данным USGS



Обратная задача:

по поверхностным смещениям **U**_{surf} найти распределение смещений **V**_{lock} вдоль межплитовой контактной зоны.



F.F. Pollitz. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical earth // Geophys J. Int. , 1996, Vol. 125, N.1, pp. 1-14

Моделирование деформационных процессов в районе

Курило-Камчатской зоны субдукции



Пространственно-временные вариации деформационных

процессов в районе Курило-Камчатской зоны субдукции



Моделирование деформационных процессов в районе

Японской зоны субдукции







Механизм очага и афтершоки Великого Японского землетрясения 11.03.2011г.

• Станции Японской сети











Пространственно-временное распределение

межплитового сцепления Японской зоны субдукции













Пространственно-временное распределение

межплитового сцепления Японской зоны субдукции













Пространственно-временное распределение

межплитового сцепления Японской зоны субдукции



Очаг готовящегося землетрясения располагается в Тихом океане вблизи восточного побережья острова Хонсю в мелкофокусной части сейсмогенной зоны.

Моделирование сейсмических деформаций

(model)i

Суша

ГНСС

V_(seism)

ГНСС

Для своевременного оповещения 0 приближающемся цунами И оценки его необходимо опасности оперативное характеристик возникающих определение волн цунами вследствие зарегистрированного подводного землетрясения.

Разработанный в настоящее время математический аппарат, современные каналы связи и вычислительная техника позволяют оценивать сейсмические смещения в эпицентре подводных землетрясений практически в режиме реального времени, сразу по мере прихода волны сейсмических смещений на ГНСС станции.





В генерацию цунами серьезный вклад вносят как вертикальные, так и горизонтальные деформации морского дна в эпицентре. Цунами 11 марта 2011 года, Япония

 $V_{up}(\mathbf{r}_{oc})$

Океан



⁷⁵⁰'E 150^{°W} 160^{°W} 160^{°W}

Временные ряды положений станций ГНСС







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







Место, регистрации цунами	Максимальная высота (от пика до подошвы,) см
Малокурильск	155
Гавайские острова	152
Токачико (Япония)	120
Кресент-Сити (Калифорния)	177
Орегон	112

Н.П. Лаверов и др. Курильские цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г.: два транстихоокеанских события // ДАН, 2009, Т.426, № 3, с. 386-392



Землетрясение и цунами 13 января 2007 года



	144°	148°	152°	156°	160°		
54	4				a de la dela dela dela dela dela dela de	54°	2 .0
00000000				pe	ts /		- 1.6
52°						52°	- 1.2
				parm	Į,		- 0.8
50°				· 5/	1	50°	- 0.4
				8			- 0.0
48°			, i	1		48°	-0.4
	VSSK	uru	D',	1			0.8
46°	/ ¥	itur				46°	1.2
	kuna	~ at the					1.6
44°	NUTA	shik /	-			44°	-2.0
	1 Show	SIIK					
42°	144°	140°	150°	156°	160°	⊢ 42°	
	144	140	192	190	100		
Вертикальные смещения							

Место, регистрации цунами	Максимальная высота (от пика до подошвы,) см
Малокурильск	72
о.Чичидзима (Япония)	83
о.Шемя (Алеутские о-ва)	68.5
Кресент-Сити (Калифорния)	51
о.Пасхи (Чили)	40

Н.П. Лаверов и др. Курильские цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г.: два транстихоокеанских события // ДАН, 2009, Т.426, № 3, с. 386-392



Землетрясения и цунами 11 марта 2011



Место, регистрации цунами	Максимальная высота , см
Япония	2000-4000
Малокурильск	300
Гавайские острова	400
Кресент-Сити (Калифорния)	200



Землетрясение и цунами 11 марта 2011 года



Разработанный в настоящее время математический аппарат, современные каналы связи и вычислительная техника позволяют оценивать сейсмические смещения в эпицентре подводных землетрясений практически в режиме реального времени, сразу по мере прихода волны сейсмических смещений на ГНСС станции.

Хорошо заметный сигнал приходит со скоростью поверхностной волны, которая на порядок выше скорости волны цунами. Это обуславливает возможность практического применения технологии ГНСС для раннего оповещения о цунами.

Землетрясение и цунами 11 марта 2011 года



Заключение

Спутниковый геодезический мониторинг смещений земной поверхности обеспечивает комплексный подход к изучению деформационных процессов в сейсмически активных регионах.

Априорные исследования:

межсейсмических Изучение медленных деформаций вариаций И ИХ позволяет выделять области максимального накопления напряжений, быстрая разгрузка которых может привести возникновению сильнейших К землетрясений. Локализация возможных очаговых 30H позволяет выявить цунамигенный характер ожидаемого события (подводное, мелкофокусное, взбросовая составляющая).

Оперативный прогноз опасности цунами:

Возможность получения спутниковых геодезических данных в режиме, близком к реальному времени, позволяет применять их для оперативного определения динамических характеристик (начальных условий) волны цунами вследствие сильнейших субдукционных землетрясений.





ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

ЕДИНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЛУЖБА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

И.А. Сдельникова, Г.М. Стеблов

Петропавловск-Камчатский, 2019