

АКТУАЛЬНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГНСС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Нечаев Г.В.^{1,2}, Шестаков Н.В.^{1,2}

¹ Дальневосточный Федеральный Университет, г. Владивосток, henley_grange@mail.ru

² Институт Прикладной Математики ДВО РАН, г. Владивосток

Введение

Восточная часть Японского моря характеризуется высокой мелкофокусной сейсмической активностью. Вдоль западного побережья островов Хонсю, Хоккайдо и Сахалин регулярно происходят землетрясения с магнитудой до 7.8, часть из которых инициируют цунами. Только в XX веке произошло четыре таких события. К примеру, цунами 1993 г., произошедшее вблизи о. Хоккайдо привело к гибели более 200 человек в Японии и значительному материальному ущербу в Приморском крае.

В настоящее время в Японии, США и других странах активно разрабатываются комплексные системы предупреждения о цунами, важную роль в которых играют ГНСС-технологии [10, 12]. Детектирование в режиме реального времени косейсмических смещений земной поверхности сетями непрерывно действующих ГНСС-станций, позволяет оперативно моделировать параметры очага землетрясения, вычислять смещения морского дна, определять параметры волны цунами и её потенциальное воздействие на береговую инфраструктуру.

Очаги землетрясений Японского моря характеризуются большими углами падения сейсмофокальной плоскости (40° – 50°), по сравнению с механизмами землетрясений вблизи тихоокеанского побережья Японии [14]. Механизмы очагов япономорских землетрясений носят, преимущественно, взбросовый и, согласно некоторым источникам [13, 14], сбросовый характер. Данные условия приводят к большим смещениям морского дна в эпицентральной области и возникновению цунами при меньшей магнитуде, чем в Тихом океане, где характерный механизм землетрясений – пологий надвиг.

В данной работе, используя известные параметры очагов цунамигенных землетрясений, рассчитаны косейсмические смещения вблизи и на побережье Японского моря. Анализ этой информации позволяет изучить вопрос о возможности и целесообразности использования ГНСС-методов для оперативного моделирования параметров очага цунамигенного землетрясения в акватории Японского моря.

Вычисление косейсмических смещений земной поверхности

Используя параметры очагов землетрясений из научной литературы, рассчитаны косейсмические смещения на земной поверхности в япономорском регионе, а также на пунктах действующих ГНСС-сетей GEONET (Япония), ДВО РАН – ДВФУ (Россия) и Республики Корея. Расчёты производились в программе STATIC1D [15]. Всего было обработано семь землетрясений: землетрясение вблизи п-ова Шакотан (о. Хоккайдо) 1940 г. с $M_w = 7.5$, землетрясение Ога 1964 г. с $M_w = 7.0$, Япономорское 1983 г. с $M_w = 7.7$, Ниигатское 1964 г. с $M_w = 7.5$, Монеронское 1970 г. с $M_w = 7.3$, Приморское 1990 г. с $M_w = 5.9$, землетрясение Нансей 1993 г. с $M_w = 7.8$. При отсутствии необходимых для расчётов параметров очагов землетрясений, использовались пересчетные оценки из известных эмпирических соотношений.

Шакотанское землетрясение 1940 г. Землетрясение произошло возле полуострова Шакотан о. Хоккайдо (Shakotan-oki) 1 августа 1940 г., $M_w = 7.5$. Параметры очага приведены в статье [14]: плоскость сейсморазрыва протяженностью 100 км падает на восток под углом 40° . Механизм очага – взброс [4, 8, 17]. Максимальные рассчитанные смещения составляют около 3 см в горизонтальной и 1.5 см в вертикальной плоскости и приходятся на северную и западную части о. Хоккайдо (рис. 1). В российском сегменте максимальные горизонтальные смещения до 6–7 мм соответствуют восточному побережью Приморского края, вертикальные смещения незначительны (менее 1 мм). На Корейском полуострове смещения менее 1 мм по обоим компонентам.

Землетрясение Ога 1964 г. Землетрясение Ога (Oga-oki) $M_w = 7.0$ произошло 7 мая 1964 г. вблизи северо-западной оконечности о. Хонсю, механизм – взброс [4, 8]. Параметры плоскости разрыва представлены в статье [3]. Максимальные рассчитанные смещения достигают 5.5 см по горизонтали и 1.5 см по вертикали на северо-западном побережье о. Хонсю. На материковой части региона смещения не значительны.

Ниигатское землетрясение 1964 г. Землетрясение произошло к западу от г. Ниигата 16 июня 1964 г., $M_w = 7.5$. Согласно работам [4, 13] плоскость сейсмодислокаций размерами 80×30 км падает на восток под углом 34° . Механизм очага – взброс. Смещения охватывают всю северную половину о. Хонсю и достигают 45 см по горизонтали и 38 см по вертикали на его западном побережье. На Корейском п-ове и российском сегменте региона смещения незначительны по обоим компонентам.

Монеронское землетрясение 1971 г. Землетрясение с магнитудой $M_w = 7.3$ [4] произошло 6 сентября 1971 г. к северо-востоку от о. Монерон, вблизи о. Сахалин. Согласно [1] плоскость сейсморазрыва падает на восток под углом 75° , механизм очага – взброс с незначительной сдвиговой компонентой. Размеры плоскости – 70×25 км – приведены в статье [14]. В Японском сегменте, на севере о. Хоккайдо максимальные расчётные смещения не превосходят 6 мм как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. На о. Монерон горизонтальные сдвиги достигают 20 см, вертикальные – 8 см. Также, вся юго-западная оконечность о. Сахалин подвержена смещениям до нескольких сантиметров по горизонтали и вертикали. Горизонтальные смещения на юго-восточном побережье Хабаровского края не превышают 5 мм, вертикальные – незначительны (рис. 2). На Корейском полуострове смещения практически отсутствуют.

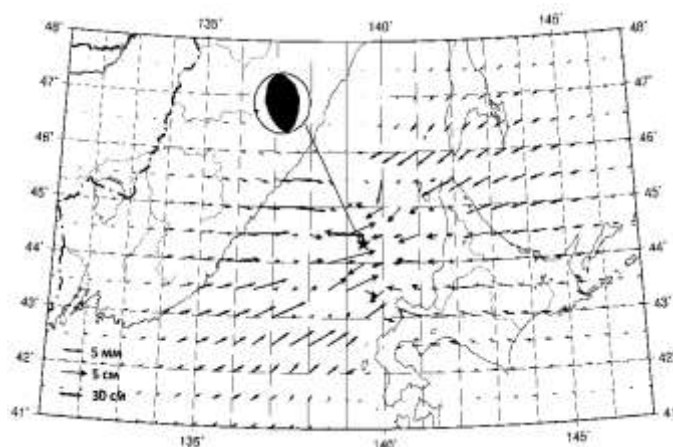


Рис. 1. Горизонтальные косейсмические смещения земной поверхности, рассчитанные для япономорского региона по параметрам Шакотанского землетрясения 1940 г.

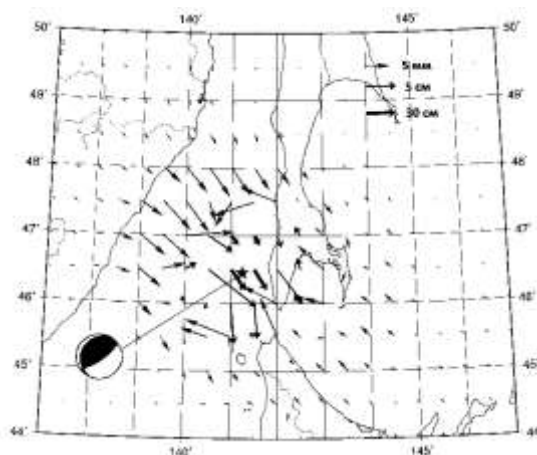


Рис. 2. Горизонтальные косейсмические смещения земной поверхности, рассчитанные по параметрам Монеронского землетрясения 1971 г.

Япономорское землетрясение 1983 г. Землетрясение 26 мая 1983 г., $M_w = 7.8$ [15, 17] произошло вблизи северо-западной оконечности о. Хонсю. Согласно работе [15] область сейсморазрыва может быть удовлетворительно описана смещением по двум плоскостям, падающим на восток под углом 30° . Механизм – чистый взброс [15]. Максимальные рассчитанные смещения достигают 44 см в горизонтальной плоскости и 15 см по вертикальной компоненте на северо-западе о. Хонсю. На российском сегменте исследуемой территории горизонтальные смещения не превосходят 4 мм на юго-восточном побережье Приморского края. На Корейском полуострове горизонтальные смещения не превышают 2 мм (рис. 3).

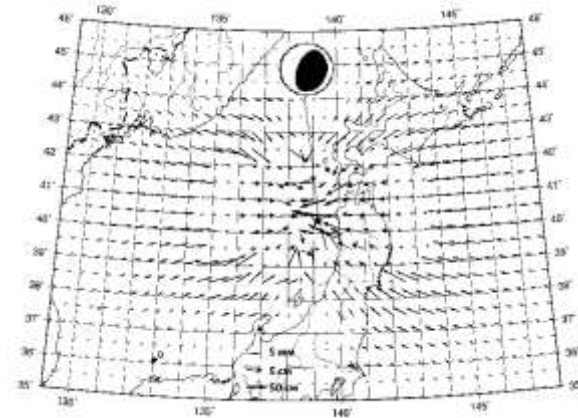


Рис. 3. Горизонтальные косейсмические смещения земной поверхности, рассчитанные по параметрам Япономорского землетрясения 1983 г.

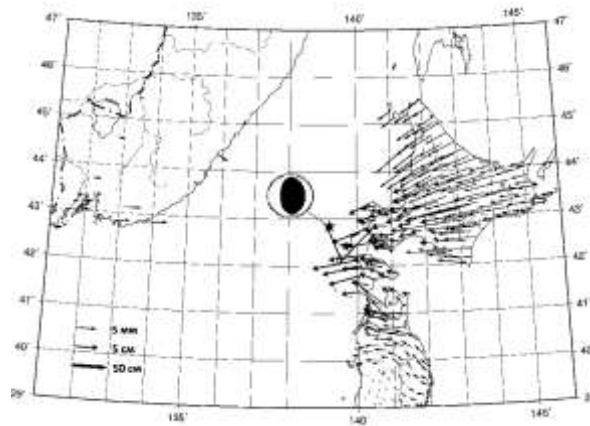


Рис. 4. Горизонтальные косейсмические смещения земной поверхности, рассчитанные для япономорского региона по параметрам землетрясения Нансей 1993 г.

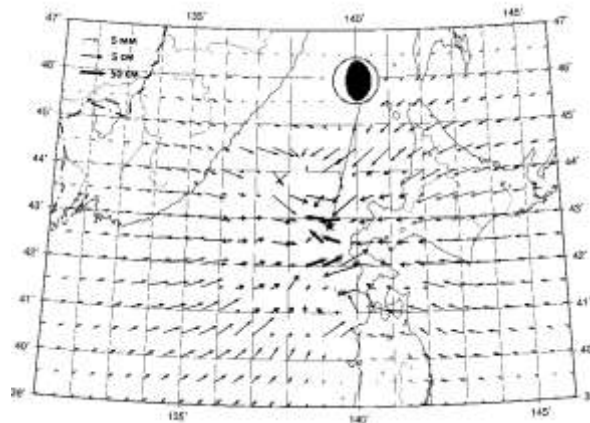


Рис. 5. Горизонтальные косейсмические смещения земной поверхности, рассчитанные для ГНСС-сетей GEONET и ДВО РАН–ДВФУ по параметрам землетрясения Нансей 1993 г.

Приморское землетрясение 1990 г. Землетрясение 13 ноября 1990 г. $M_w = 5.9$ произошло в 50 км от северо-восточного побережья Приморского края [11]. Направление простираения сейсморазрыва и механизм очага взяты из работы [11]. Наблюдался взброс с незначительной сдвиговой компонентой. Размеры плоскости сейсморазрыва и смещения в очаге были определены по эмпирическим соотношениям из [6, 7].

Длина плоскости сейсморазрыва L и смещение в очаге D определялось по формулам (1)–(4). В соответствии с [7]:

$$D = 4.0 \times 10^{-5} L, \quad (1)$$

где

$$L = \sqrt{2S}, \quad (2)$$

$$S = (M_0 / 1.33 \times 10^{15})^{2/3}. \quad (3)$$

Согласно [6]:

$$M_w = (\log M_0 / 1.5) - 6.07. \quad (4)$$

Альтернативное решение механизма очага приводится в работе [2]. Приводимые в ней магнитуда $MLH = 6.8$ и длина сейсморазрыва – 24.5 км – значительно превышают параметры из статьи [11] и GСMT. Расчёты показали отсутствие значительных смещений в регионе.

Землетрясение Нансей 1993 г. Землетрясение Нансей (Nansei-oki), $M_w = 7.8$, произошедшее 12 июля 1993 г. вблизи юго-западной оконечности о. Хоккайдо породило цунами, дошедшее до берегов Приморья и Кореи. Для расчётов поля косейсмических смещений земной поверхности использовались параметры, приведённые в статье [17]. Из представленных в работе решений была выбрана пяти-плоскостная модель очага землетрясения. Механизм, согласно решению СМТ – чистый взброс. Рассчитанные смещения достигают максимальных значений на о. Окусири и юго-западе о. Хоккайдо достигая 20 см в горизонтальной плоскости и 22 см по вертикали. В Приморском крае максимальные смещения приходятся на его восточное побережье и доходят до 6 мм в горизонтальной плоскости (рис. 4, рис. 5), но менее 1 мм по вертикали. Для корейских станций смещения практически отсутствуют.

Обсуждение

Сильные мелкофокусные землетрясения с магнитудами $M_w = 7-7.8$, происходящие на восточной окраине Японского моря порождают косейсмические смещения земной поверхности, охватывающие практически весь япономорский регион, с максимальными величинами, локализующимися в западной и северо-западной областях о. Хонсю и о. Хоккайдо и достигающими около полуметра в горизонтальной и примерно 40 см в вертикальной плоскостях. Плотная покрывающая Японские острова ГНСС-сеть GEONET вполне способна оперативно выявлять большую часть таких смещений.

В российском сегменте территорий, прилегающих к акватории Японского моря, наибольшие величины смещений наблюдаются на восточном побережье Приморья и не превосходят 7 мм по горизонтали и 2 мм по вертикали. При современном уровне развития измерительной инфраструктуры на юге Дальнего Востока РФ и методики обработки данных ГНСС-наблюдений такие величины косейсмических смещений не могут быть оперативно и надёжно выявлены и использованы для моделирования очага землетрясения. Однако на о. Сахалин сдвиги могут достигать 7–10 см как по горизонтали, так и по вертикали.

Максимальные горизонтальные смещения на Корейском полуострове для всех рассмотренных сейсмических событий не превосходят 2 мм, что также недостаточно для их быстрого выявления, следовательно, сеть полуострова не может принести полезной информации для оперативного определения параметров очага землетрясения и последующего моделирования цунами. Однако, в перспективе, при улучшении точности определения координат ГНСС-методами в режиме реального времени, данные о косейсмических смещениях на территории Приморья и острова Сахалин могут быть использованы в совокупности с данными ГНСС-сети GEONET для оперативного моделирования очага землетрясения и раннего предупреждения о цунами.

Заключение

В работе рассчитаны косейсмические смещения земной поверхности в япономорском регионе, генерируемые наиболее сильными историческими цунамигенными землетрясениями, произошедшими в Японском море. Выявлено, что ГНСС-сеть GEONET, покрывающая Японские острова, уже может использоваться для оперативного прогноза угрозы цунами в результате мощного подводного землетрясения у западного побережья Японии. Смещения в российском сегменте могут достигать сантиметровой величины, однако редкое расположение станций сети ДВО РАН–ДВФУ и недостаточная точность определения координат ГНСС-пунктов в реальном времени пока не позволяют оперативно использовать их для решения задач раннего предупреждения о цунами. Тем не менее, для отдельных событий, возникающих в северной части Японского моря, а также в непосредственной близости от побережья Приморского и Хабаровского края и о. Сахалин, уже функционирующие российские ГНСС-сети могут быть использованы уже сейчас. Актуальным

представляется исследование вопроса об их сгущении в районах локализации максимальных косейсмических смещений от известных исторических и потенциальных сильных коровых землетрясений.

Настоящая работа частично поддержана грантом РФФИ № 17-55-53110 ГФЕН_а.

Список литературы

1. Коновалов А.В., Нагорных Т.В., Сафонов Д.А. Современные исследования механизмов очагов землетрясений о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2014. 252 с.
2. Поплавская Л.Н., Нагорных Т.В. Динамические параметры очага, сейсмогенные подвижки и макросейсмический эффект Приморского землетрясения 13 ноября 1990 г. // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том 6. Южно-Сахалинск: Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 1997. С. 39–44.
3. Abe K. Fault model of the 1964 Off Oga Earthquake as a tsunami source // Bulletin of The Nippon Dental University General Education. V. 41. 2012. P. 19–24.
4. Abe K. Quantification of major earthquake tsunamis of the Japan Sea // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1985. V. 38. P. 214–223.
5. Abe K. Re-examination of the fault model for the Niigata earthquake of 1964 // Journal of Physics of the Earth. 1975. V. 23. P. 349–366.
6. Blewitt G. et al. GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems // Journal of Geodesy. 2008. P. 335–343.
7. Bormann P. New manual of seismological observatory practice. Potsdam: GeoForschungsZentrum Potsdam, 2002. 1252 p.
8. Fukao Y., Furumoto M. Mechanism of large earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea // Tectonophysics. 1975. V. 25. P. 247–266.
9. Geological hazards in the project area // Sakhalin Energy Investment Company. Chapter 8. P. 1–69.
10. Melgar D. et al. Local tsunami warnings: perspectives from recent large events // Geophysical Research Letters. 2016. P. 1–23.
11. Nakanishi I., Motoya Y. The November 13, 1990 earthquake off the coast of the Primorskij region, the eastern Russia // Geophysical Research Letters. 1999. V. 19. № 6. P. 549–552.
12. Ohta Y. et al. Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0) // Journal of Geophysical Research. 2012. V. 117. P. 1–16.
13. Satake K., Abe K. A fault model for the Niigata, Japan, earthquake of June 16, 1964 // Journal of Physics of the Earth. 1983. V. 31. P. 217–223.
14. Satake K. Re-examination of the 1940 Shakotan-oki earthquake and the fault parameters of the earthquakes along the eastern margin of the Japan Sea // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1986. V. 43. P. 137–147.
15. Satake K. The mechanism of the 1983 Japan Sea earthquake as inferred from long-period surface waves and tsunamis // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1985. V. 37. P. 249–260.
16. STATIC1D – [электронный ресурс] – Режим доступа: <https://earthquake.usgs.gov/research/software/#STATIC1D>
17. Tanioka Y. et al. Total analysis of the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake using seismic wave, tsunami, and geodetic data // Geophysical Research Letters. 1995. V. 22. № 1. P. 9–12.