

УДК 550.34

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ О ЦУНАМИ ДЛЯ РОССИЙСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ GPS/ГЛОНАСС

Пупатенко В.В.¹, Шестаков Н.В.^{2,3}

¹*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, pvv2.dv@gmail.com*

²*Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток*

³*Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток*

Введение

Задача раннего предупреждения о цунами остаётся одной из актуальных и до сих пор не получивших универсального решения. Это в особенности касается ближайших к эпицентру подводного землетрясения регионов, удалённых на расстояние в первые сотни километров, где предупреждение о цунами должно быть выдано очень быстро, уже через 5-15 минут после землетрясения. Из широкого перечня классических методов прогноза цунами в этом случае применимым остаётся только магнитудный критерий. В нём используется известная связь вероятности возникновения опасного по силе цунами от магнитуды. Тревога объявляется для всех землетрясений, магнитуда которых превышает заданный для региона порог. Хотя магнитудный критерий практически исключает вероятность пропуска цунами, он, во-первых, не позволяет обоснованно дифференцировать степень угрозы, а во-вторых, приводит к недопустимо высокому количеству ложных тревог. Теоретические оценки доли верных прогнозов – лишь 19-23% [1, 4], что подтверждается, например, статистикой Службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России [1, 2].

Недостатки и ограничения традиционных методов предупреждения о цунами стимулировали разработку новых альтернативных методов. Одними из наиболее перспективных являются методы, основанные на использовании данных Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС, сегодня это системы GPS, ГЛОНАСС, BeiDou). Наиболее распространённый способ использования ГНСС-данных для раннего предупреждения о цунами основан на оперативном моделировании (определении параметров модели) очага землетрясения по наблюдениям, полученным на прибрежных стационарных ГНСС-пунктах [8]. Возможность и перспективность этого подхода была показана ещё в 2006 г. [3]. Десять лет спустя появились первые результаты тестирования созданных ГНСС-подсистем служб предупреждения о цунами на базе существующих геодинамических сетей [6]. Нацелены эти системы, в первую очередь, на сильнейшие ($M > 8.5$) землетрясения в зонах субдукции.

В работе изучается перспективность использования ГНСС-измерений для предупреждения о цунами на российском побережье Японского моря. На основе численных экспериментов выявлены закономерности влияния различных факторов на точность определения параметров очага землетрясения с магнитудой менее 8. Обосновывается возможность определения положения поверхности разрыва вместо использования априорных данных, которые в случае внутриплитовых землетрясений могут оказаться неверными.

Методика исследования

Принципиальная схема использования ГНСС-данных в системах раннего предупреждения о цунами заключается в следующем [5]. После получения информации о землетрясении (чаще всего по сейсмическим данным) и первых оценок координат эпицентра, глубины и магнитуды, на ближайших к эпицентру ГНСС-станциях рассчитываются косейсмические смещения. Их инверсией определяются некоторые из основных параметров очага землетрясения: размер и положение поверхности смещения; направление (угол rake), средняя амплитуда и распределение смещений по поверхности, а также производные параметры: сейсмический момент M_0 и моментная магнитуда M_w . Положение плоскости сейсморазрыва задаётся азимутом простирания (strike), углом падения (dip) и средней глубиной. Далее рассчитываются постоянные смещения дна. Наряду с барометрическими данными, они являются основной исходной информацией для моделирования распространения волн цунами, определения их высоты и времени прихода на заданные участки побережья.

Численные эксперименты состояли из следующей последовательности действий:

1. Задавалось положение эпицентра землетрясения и ГНСС-станций (рис. 1);

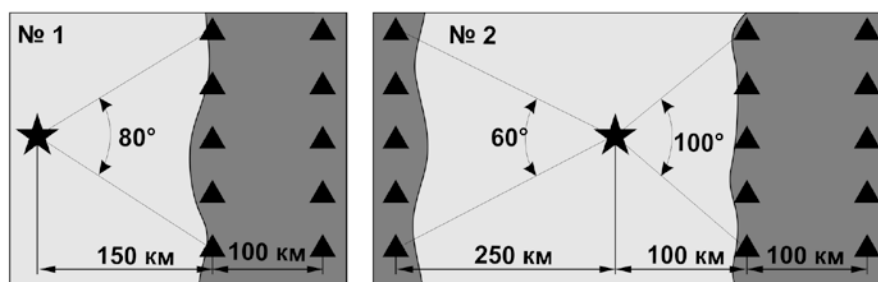


Рис. 1. Схемы расположения эпицентра землетрясения (звездочка) и пунктов наблюдений (треугольники)

2. Фиксировались «действительные» значения параметров очага;
3. Генерировались синтетические «наблюдённые» косейсмические смещения, с учётом ошибок их определения (по модели Окады [7]);
4. Решалась обратная задача по определению параметров модели очага землетрясения. Оптимальная модель очага землетрясения определялась нахождением их сочетания с наименьшей невязкой модельных и синтетических косейсмических смещений.
5. Полученные на предыдущем шаге оценки параметров сравнивались с их «действительными» значениями, проводился статистический анализ невязок значений параметров.

На рис. 2 показан пример результатов одного расчёта с определением ориентации плоскости сейсморазрыва при 20 станциях, расположенных по схеме №2. Для статистического анализа на основе результатов 40000 таких расчётов были получены две выборки невязок определения параметров модели очага, отдельно для каждой схемы, приведённой на рис. 1.

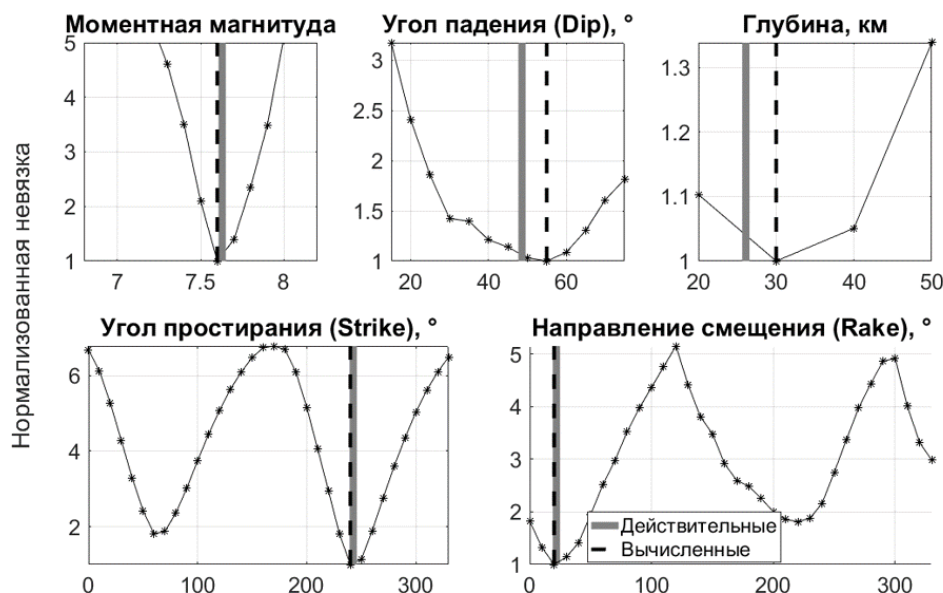


Рис. 2. Пример определения параметров модели очага землетрясения. На каждом графике приведены зависимости нормализованной суммарной средневзвешенной невязки «наблюдённых» и синтетических косейсмических смещений от значения параметра. Вертикальными серыми линиями отмечено действительное значение параметра, пунктирными – значение с минимальной невязкой

Результаты и выводы

Анализ гистограмм невязок определения параметров показал, что существенное количество невязок в углах strike и rake имеют значения около ± 180 . Такие невязки интерпретировались как «выбросы» и исключались из анализа. В то же время, необходимо отметить, что ошибка на $180 \pm 20^\circ$ в углах rake и/или strike может не приводить к принципиальным искажениям рассчитываемого поля вертикальных смещений – источника цунами, поскольку суммарное поднятие и опускание океанического дна практически не меняется.

На рис. 3 приведены полученные зависимости среднеквадратических ошибок определения магнитуды, угла простираания, угла падения и направления смещения, а также количества «выбросов» от магнитуды землетрясения.

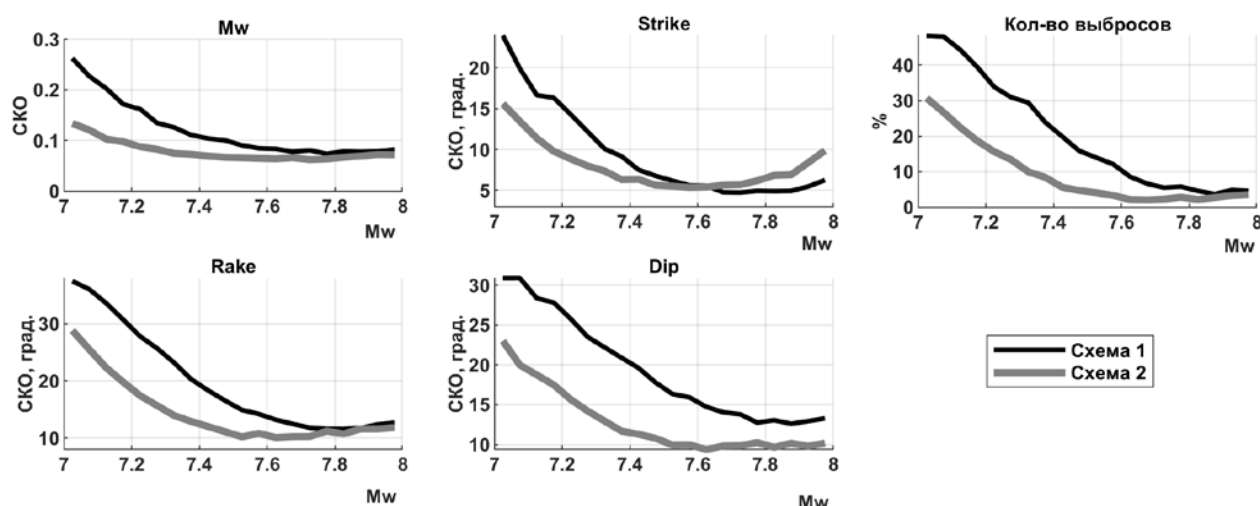


Рис. 3. Зависимости среднеквадратических ошибок определения магнитуды, угла простираения, угла падения и направления смещения, а также количества «выбросов» от магнитуды землетрясения

Схемы взаимного положения эпицентра землетрясения и ГНСС-станций подбирались таким образом, чтобы они были применимы к большей части потенциальных очагов цунами в Японском море. Вторая схема применима к землетрясениям, которые происходят к западу от о. Хоккайдо и севернее, вплоть до Татарского пролива, первая схема – для землетрясений к западу от о. Хонсю. В обоих случаях, уже существующих ГНСС-станций на территории Японии достаточно. В Приморском крае ГНСС-станций меньше, и как показывают полученные результаты, они крайне важны для повышения точности и надёжности работы возможной системы предупреждения о цунами.

Полученные результаты показывают, что при решении обратной задачи можно обойтись без априорных значений углов strike и dip. К существенному ухудшению получаемого решения это приводит только при невозможности использования станций, расположенных по разные стороны от эпицентра, как в схеме №1. Увеличение ошибок при росте магнитуды сверх 7.6-7.8, очевидно, связано с использованием точечной модели очага. Эту проблему можно решить, ограничив минимально допустимое расстояние от эпицентра до ГНСС-станций, в зависимости от магнитуды.

В целом, при использовании станций, расположенных с двух сторон от эпицентра землетрясения (схема №2), можно получить релевантную независимую оценку магнитуды, начиная с $M = 7$, а при $M \geq 7.4$ в этом случае можно с приемлемой точностью построить модель очага землетрясения.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00178.

Список литературы

1. Поплавский А.А., Храмушин В.Н. Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. М.: Наука, 2007. 272 с.
2. Шикотанское землетрясение и цунами 4(5) октября 1994 года. Хроника событий, анализ последствий и современное состояние проблемы: сборник статей / под ред. Тихонова И.Н., Шевченко Г.В. Южно-Сахалинск: ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН, 2015. 128 с.
3. Blewitt G. et al. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. P. L11309.
4. Gusiakov V.K. Tsunamis on the Russian Pacific coast: history and current situation // Russian Geology and Geophysics. 2016. V. 57. No. 9. P. 1259–1268.
5. Hoechner A. et al. Instant tsunami early warning based on real-time GPS – Tohoku 2011 case study // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2013. V. 13. No. 5. P. 1285–1292.
6. Kawamoto S. et al. First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto earthquakes // Earth, Planets and Space. 2016. Vol. 68. No. 190. P. 1–12.
7. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. 1985. V. 75. No. 4. P. 1135–1154.
8. Tsuchida H., Ohta Y. Review on Near-Field Tsunami Forecasting from Offshore Tsunami Data and Onshore GNSS Data for Tsunami Early Warning // Journal of Disaster Research. 2014. V. 9. No. 3. P. 339–357.