

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ОТЛОЖЕНИЙ ЦУНАМИ НА  
КАМЧАТСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ БЕРИНГОВА МОРЯ**

*Петухин А.Г.<sup>1</sup>, Пинегина Е.К.<sup>2</sup>, Ландер А.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>*Geo-Research Institute, Osaka, Japan, anatolyp@geor.or.jp*

<sup>2</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

<sup>3</sup>*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

**Введение**

Берингоморское побережье Камчатки совпадает с границей между Охотским и Берингоморским блоками или (микро) плитами, являющимися частью Северо-американской плиты на российском Дальнем Востоке. Вопрос о конфигурации плит в регионе, являющимся северным окончанием Курило-Камчатской зоны субдукции, остается открытым [2]. Моделирование источников отложений цунами может внести важный вклад в региональные тектонические построения. Исследования цунамигенных отложений в тысячелетнем масштабе времени также важны для расширения исторических каталогов землетрясений и вероятностного анализа опасности сильнейших землетрясений и цунами (например [6]). Сочетание этих научных и практических интересов явилось стимулом к данному исследованию.

Для прогнозирования будущих цунами, а также движений грунта при сильных событиях, важно знать потенциальные источники будущих землетрясений. Один из способов решения этой проблемы является реконструкция расположения очага землетрясения по отложениям цунами. Отложения цунами изучались на Камчатском побережье Берингова моря в течение многих лет (напр. [5]). Результаты показывают что высота цунами в данном районе может достигать 10 м и более, и приводить к катастрофическим последствиям для населенных пунктов, расположенных вдоль побережья. Для сравнения: история цунами за последние 4000 лет показывает, что зона северной части Курило-Камчатской зоны субдукции испытывает цунамигенные землетрясения каждые несколько столетий [1, 2].

**Моделирование очагов землетрясений**

В данном исследовании мы попытались реконструировать очаги цунамигенных палеоземлетрясений, путем численного моделирования высот цунами и их сравнения с реальными данными, полученными в результате полевых исследований береговых отложений. Для этого мы смоделировали цунами для набора очагов на потенциально активных разломах в акваториях Берингова моря (см. Рис. 1). В общей сложности были подготовлены 47 исходных моделей очагов.

Модельные землетрясения строились, исходя из общих представлений о тектонике и сейсмичности региона и включали широкие диапазоны очаговых параметров. При этом мы ориентировались на три группы данных:

-пространственное распределение сейсмичности в акватории и прибрежных районах Берингова моря и Алеутской дуги (с учетом распределения максимальных наблюдавшихся магнитуд землетрясений);

-характерные для различных районов механизмы землетрясений;

-залегания и кинематические характеристики современных и голоценовых сейсморазрывов, зафиксированных при полевых наблюдениях и дешифрировании космических снимков на западном побережье моря.

Далее, при выборе исходной магнитуды модели, были учтены следующие параметры:

- максимальная магнитуда, наблюдаемая или расчетная, в окрестностях (50-250 км) от центра модели;

- тектоническое расположение исходной модели (например, принадлежность к границе плиты), и распределения магнитуд, характерных для землетрясений в этом районе;

- типа движения по разлому - взброс, сброс, или сдвиг, а также максимальная магнитуда наблюдаемая для землетрясений этого типа во всем регионе.

Для всех регионов со сравнительно низким уровнем зарегистрированной сейсмичности, максимальные магнитуды модели были взяты на уровне Олюторского, 2006 землетрясения. Используются значения:  $M=7.5$  для взбросов,  $M=7.0-7.5$  для сдвигов и сбросовых разломов.

Для областей, включающих зарегистрированные землетрясения с  $M \sim 7.5$ , для взбросов, помимо указанного значения, рассчитывалась модель с  $M = 8.0$ . Аналогичная магнитуда была использовано при моделировании взбросовых землетрясений, происходящих у подножья западного континентального склона Командорской котловины. Для задуговых сдвигов Алеутской дуги модельные магнитуды также выбраны в интервале 7.0–7.5, но здесь они соответствуют наблюдавшимся значениям. В Алеутской зоне субдукции зарегистрированы сильнейшие события до  $M = 9$ . Здесь модельные магнитуды выбирались из интервала 8.5–9.0 с постепенным возрастанием в восточном направлении, что соответствует возрастанию в очагах взбросовой составляющей подвижки.

В настоящей работе используется простейшая модель очага – однородный мгновенный сдвиг по поверхности плоского прямоугольного разрыва. Верхнее и нижнее ребра площадки разрыва предполагаются горизонтальными.

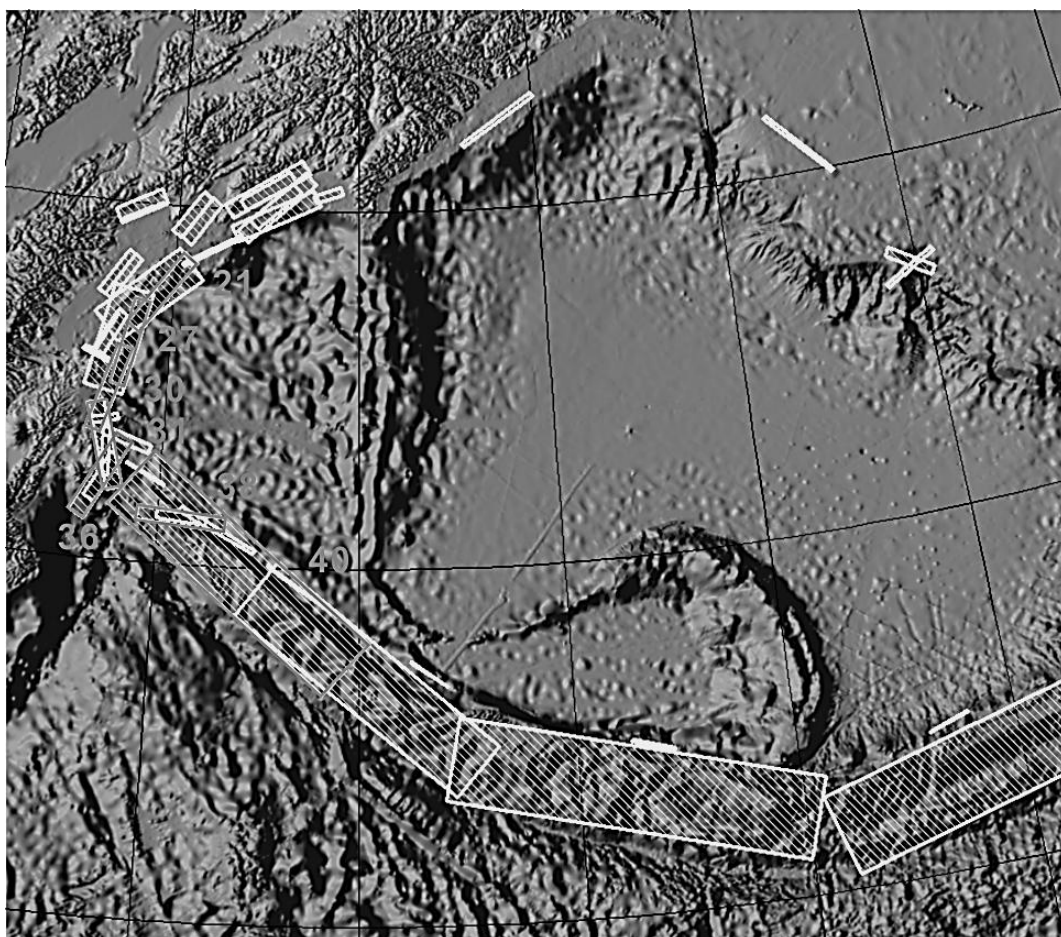


Рис. 1. Распределение очагов землетрясений (заштрихованные прямоугольники). Очаги, которые были использованы для моделирования набега волны на берег, выделены белым; численные значения указывают номер очага.

### Моделирование цунами

Численное моделирование цунами требует наличие трех компонент: (1) модели очага, определяющей место разрыва и распределение подвижки; (2) океанической батиметрии и прибрежной топографии, и (3) модели распространения цунами и набега волны на берег. Смещение дна моделируется по классической модели плоского дислокационного источника со сдвигом на косой плоскости разрыва врезанной в полубесконечную упругую среду [4]. Модуль сдвига принят равным  $4.0 \times 10^{10}$  кг/мсек<sup>2</sup>. Начальное распределение высот поверхности моря равно распределению вертикального смещения морского дна.

Для расчета цунами использовалась модель батиметрии и топографии берега скомпилированная из глобальной модели батиметрии и топографии (GEBCO) и данных нивелировки во всех пунктах обследования отложений цунами. Данные глубин были приведены к прямоугольной сетке с шагом 500м при помощи линейной триангуляции. Карта распределения глубины моря показана на Рис. 2. Шаг батиметрических данных 500 м вполне достаточен для расчета распространения цунами и набега в

прибрежной зоне при простой конфигурации берега. Однако, в сложных условиях побережья западной части Берингова моря, с многочисленными проливами и заливами, а также для небольших глубин в Карагинском заливе, большие ошибки моделирования возможны при расчете подтопления и набега волны. Другой причиной усиления волны цунами является эффект геометрической фокусировки на структурах берегового мыса. Поэтому для моделирования затопления и набега волны на берег мы также подготовили батиметрические данные с шагом 90 м.

Для расчета распространения цунами мы использовали волновую модель Буссинеска, разработанную в [7] (программа FUNWAVE). Эта модель полностью нелинейна (т.е. сохраняет информацию на всех уровнях нелинейности  $A/H$ , где  $A$  – амплитуда волны, а  $H$  – глубина воды) и учитывает дисперсию волн, FUNWAVE также учитывает придонное трение и разрушение волны, без которых волна может искусственно усиливаться на побережье. Для моделирование набега на берег используется алгоритм щелей, который был полностью проверен на моделировании набега и разрушения коротких (т.е. штормовых) волн. FUNWAVE была откалибрована для моделирования длинных волн (т.е. цунами) и успешно использована для моделирования различных региональных цунами. Район моделирования цунами в Беринговом море ограничен  $160^{\circ}$ – $174^{\circ}$ в.д. и  $53^{\circ}$ – $61^{\circ}$ с.ш. Использованы сетки: 500 м для открытых районов моря и 90м для прибрежных районов в большинстве участков шурфования между Камчатским мысом и Южным Карагинским заливом.

### Результаты моделирования

Изначально, мы рассчитывали цунами для всех источников на Рис. 1, которые находятся внутри модели батиметрии Рис. 2. Для этих расчетов мы использовали сетку 500м. На Рис. 3 показан пример распределения пиковых высот цунами для источника № 31.

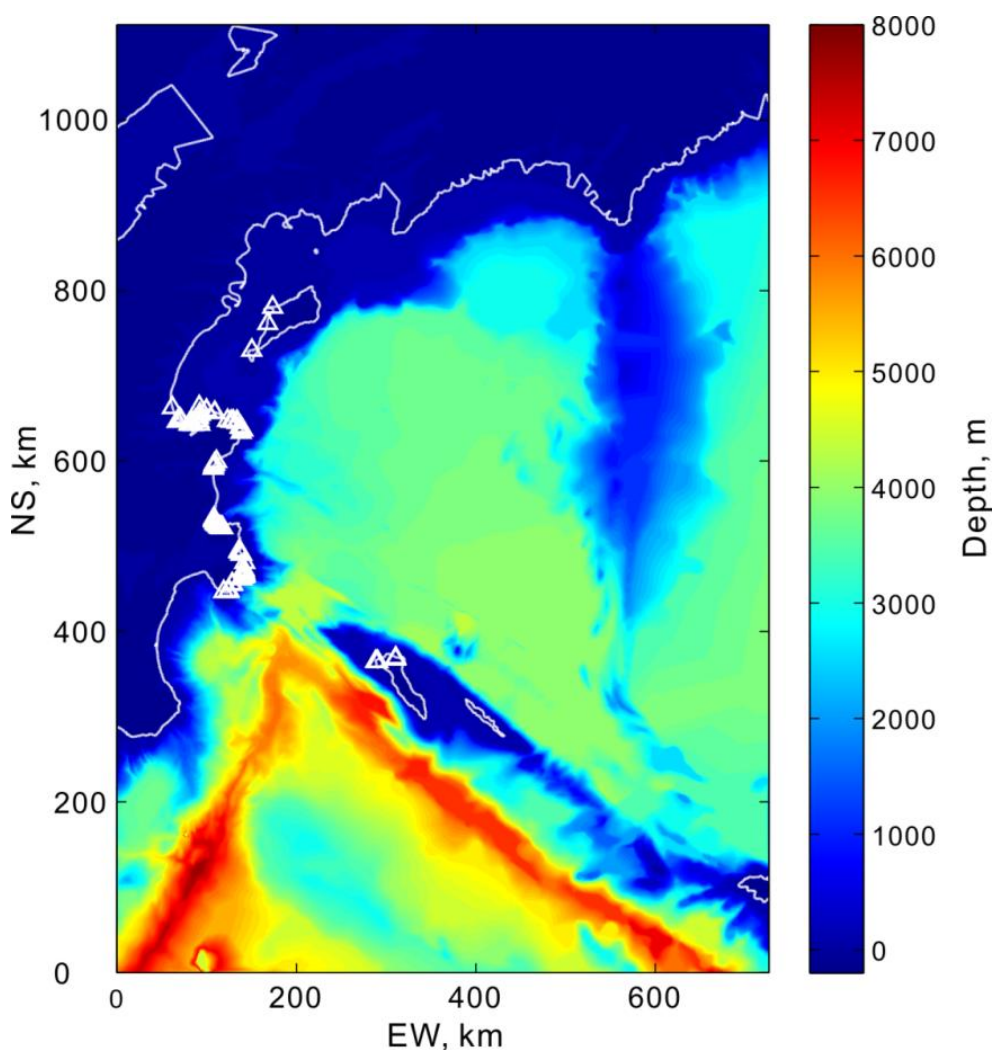


Рис. 2. Батиметрическая карта исследуемого района. Глубина моря в метрах показана цветом. Белая линия - береговая линия по батиметрической модели (линия нулевой глубины). Треугольники отмечают пункты закладки шурфов для изучения отложений палеоцунами.

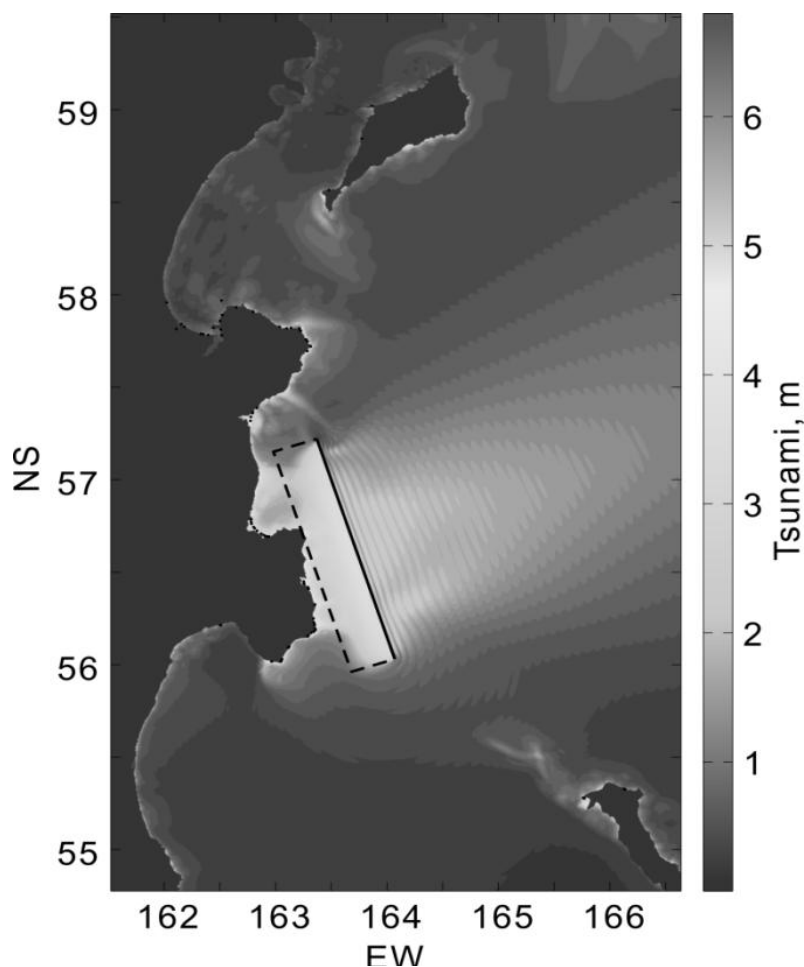


Рис. 3. Пример распределения пиковых амплитуд цунами для очага 31, в метрах. Точки вдоль береговой линии отмечают места шурфования отложений цунами. Прямоугольник – модельный очаг, его верхний край отмечен сплошной линией.

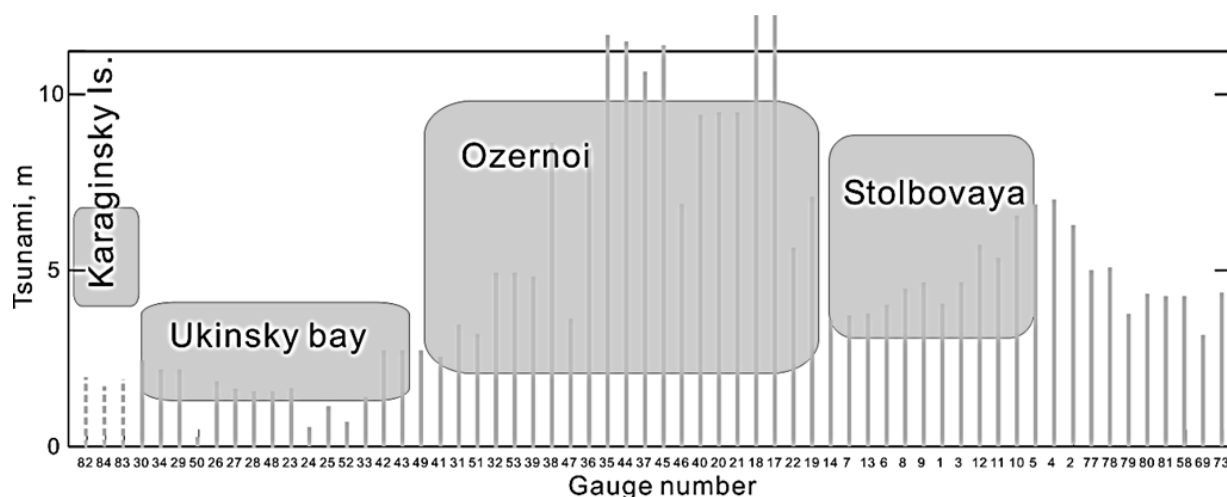


Рис. 4. Сравнение наблюдаемых ("серая зона", см. [1]) и смоделированных высот цунами (максимальное значение среди выбранных очагов 21, 27, 30, 31, 36, 38 и 40; расположение очагов см. на Рис. 1). Места шурфования располагаются с севера (левая сторона рисунка) на юг (правая сторона рисунка). Порядок расположения от Карагинского острова через залив Ука, полуостров Озерной, река Столбовая, до Камчатского мыса. Для острова Карагинский показаны результаты по начальной сетке моделирования 500м.

Далее мы моделировали набег на берег для выборки из 6 очагов, для которых величины расчетных пиковых амплитуд совместимы с наблюдаемыми максимальными высотами заплеска цунами определенными по отложениям цунами. А именно, были выбраны очаги 21, 27, 30, 31, 36, 38 и 40 (отмечены белым цветом на Рис. 1). Для этих моделирований мы использовали сетку 90м. По сравнению с обычно используемыми сетками от 10 до 30м, сетка 90м довольно груба, однако она

совместима с нехваткой прибрежных батиметрических и топографических данных в этом малоизученном районе.

На Рис. 4 показано сравнение высот модельных и наблюдаемых цунами согласно [1]. Хотя амплитуда слегка недооценена на некоторых участках, наблюдается хорошее согласие рассчитанных и наблюдаемых высот между мысами Озерной и Камчатский. Следует отметить не учтенную в модели неопределенность в соотношении между сдвигом на разломе и размером очага (например, [3], по результатам инверсии очага), которая позволяет нам слегка скорректировать величину подвижки и, в конечном итоге, высоту цунами до  $\pm 1.5$  раз. С помощью такого рода коррекции мы можем получить хорошее совпадение в среднем по группе очагов.

### **Список литературы**

1. Пинегина Т.К. Пространственно-временное распределение очагов цунамигенных землетрясений Тихоокеанского и Беринговоморского побережий Камчатки по отложениям палеоцунами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, Петропавловск-Камчатский, 2014.
2. Bourgeois, J., T.K. Pinagina, V.Ponomareva, and N.Zaretskaia. Holocene tsunamis in the southwestern Bering Sea, Russian Far East, and their tectonic implications // *GSA Bulletin*, 2006, v. 118, no. 3/4, p. 449–463, doi: 10.1130/B25726.1
3. Murotani, S., H.Miyake, and K.Koketsu. Scaling of characterized slip models for plate-boundary earthquakes // *Earth Planets Space*, 2008, 60, 987–991.
4. Okada, S. Surface displacement due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1985, 75, 1135–1154.
5. Pinagina, T.K., and Bourgeois, J. Historical and paleotsunami deposits on Kamchatka, Russia: Long-term chronologies and long-distance correlations // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2001, v. 1, p. 177–185.
6. Thio, H.K., P.G. Somerville, and J. Polet. Probabilistic Tsunami Hazard Analysis // *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lissabon, 2012, paper 5689.
7. Wei, G. and Kirby, J.T. A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations // *J. Waterw. Port Coastal Oceanic Eng.* 1995, 121, 251– 261.