

УДК 532 59

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЦУНАМИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ
COASTOX-UN, ВЫЗВАННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 2011г. У ВОСТОЧНЫХ
БЕРЕГОВ ЯПОНИИ**

М.И. Железняк³, Р.И. Демченко², П.С. Коломиец², М.В. Сорокин¹, А. Пилипенко¹

¹Институт математических машин и систем НАНУ,

²Украинский центр экологических и водных проектов,

³Institute of Environmental Radioactivity Fukushima University

e-mail: demri@ukr.net

*В 2004г. волна индонезийского цунами накрыла
трехкилометровую зону побережья Шри-Ланки,
в которой находился природный заповедник Яла
с сотнями диких слонов и леопардов.
Не погиб ни один из них - все успели уйти*

Выбор модели

В Тихом океане, в 70 км от северо-восточного побережья японского острова Хонсю, 11.03.2011 произошло землетрясение ($M_w = 9.0$) в результате подвижки Тихоокеанской плиты под Северо-Американской плитой с эпицентром (✱) (142.372E, 38.297N) и очагом на глубине 32 км ниже уровня океана, являющееся катастрофическим наряду с землетрясением 2004 г. в Индийском океане, и приведшее к техногенной катастрофе на атомной станции Фукусима-1 [1].

Точность и оперативность расчета высоты наката цунами зависит от точности моделирования как источника цунами, так и модели расчета трансформации волны, начиная от источника до выхода на побережье.

COASTOX –UN является кодом одной из таких моделей для решения двухмерных нелинейных уравнений мелкой воды методом конечных объемов с использованием схемы типа Годунова на неструктурированной сетке [2]. При этом вся область моделирования разбивается на треугольные непересекающиеся контрольные объемы, и для каждого такого объема значения искомым переменных задаются в его центре, а переменные, описывающие дно, в вершинах треугольников.

Численная схема консервативна, имеет TVD особенность и 2-й порядок точности по пространству и времени. При этом 2-й порядок по времени достигается с помощью метода Рунге-Кутты типа предиктор-корректор, а 2-й порядок по пространству получается применением двух разных методов расчета потоков на этапах предиктора и корректора. На первом этапе используется схема типа Годунова с приближенными солверами HLL и Roe. На втором этапе потоки вычисляются непосредственно методом вниз по потоку, используя состояния задачи Римана. COASTOX-UN использует неструктурированную сетку и, следовательно, применим к большим областям при избежании многократных нестингов с локальным увеличением разрешения сетки [2].

Численное моделирование распространения Тохоку-Оки цунами 2011г. было проведено для двух моделей источника генерирования цунами [1] и [3] с неоднородным распределением поля сдвигов в плоскости конечного смещения.

В первом случае схема расположения сегментов и соответствующее им поле распределения сдвигов было выбрано в соответствии с [1]. Источник состоит из сорока сегментов размером 50 км x 50 км каждый, с одинаковыми фокусными углами: $\varphi = 193^\circ$, $\delta = 14^\circ$ и $\theta = 81^\circ$. Деформация дна вычислялась по формулам Окада [4] для каждого сегмента при максимальном значении сдвига с последующей линейной суперпозицией смещений всех сегментов для получения соответствующего возмущения свободной

поверхности. Контурные линии начального отклонения поверхности воды показаны на рис.1 (левая панель). Максимумы превышения и понижения свободной поверхности равны 14.6м и 1.5м соответственно.

В случае второй модели источника землетрясения [3] распределение поля деформации смещения, полученное в [3] и [5] (рис.1, правая панель) было применено для мгновенной передачи на поверхность воды в качестве ее возмущения в начальной фазе распространения цунами. При этом область разлома была разделена на одиннадцать сегментов с длиной и шириной от 25 до 175 км [3]. Значения сдвигов в плоскости сегментов варьировались от 1 до 50 м возле трещины, а фокусные углы были приняты равными соответствующим углам в случае модели [1].

В настоящей работе данные батиметрии/топографии были получены с помощью ETOPO1 (1arc') для области (32° - 46°N, 140° - 150°E).

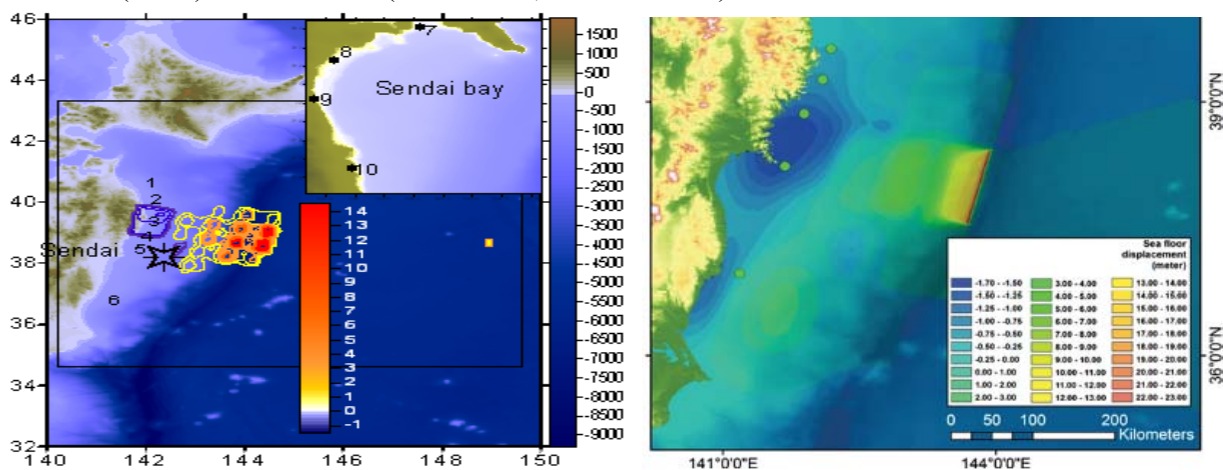


Рис.1. Левая панель: начальное возмущение уровней воды, полученное согласно [1];
Правая панель: смещение донной поверхности, полученное в [5]

Распределение максимальных высот для фазы распространения цунами в расчетной акватории (34.5° - 43.5°N, 140.5° - 149.5°E) с помощью цилиндрической моды модели COASTOX-UN показано на рис.2 для обоих источников цунами, генерированных статической деформацией поверхности дна. Сравнение результатов численного моделирования в этой области с данными GPS створов, расположенных в 10-15 км от береговой линии (точки 1 – 6, рис.1) и ближайшего к эпицентру датчика показано в работе [6].

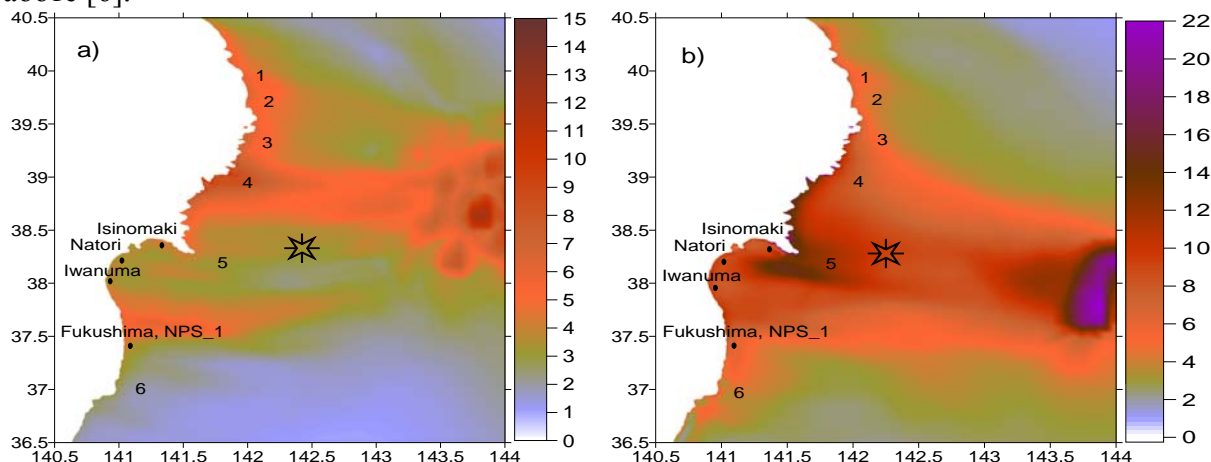


Рис. 2. Максимумы уровней воды (м), соответствующие моделям источника цунами [1] (левая панель) и [3] (правая панель)

Данные измерений вблизи береговой линии залива Сендаи приведены в волновых створах, отмеченных на карте залива [3]. На рис.3 показано сравнение высот цунами, полученных моделью COASTOX-UN на расстоянии 10-15м от берега в точках 7 – 9 (рис.1, левая панель), находящихся в окрестности этих волновых створов (координаты точек 7 – 9 приведены в табл.1). Для 10-й точки (рис.1) координаты и измерения соответствуют экспериментальным данным, используемым в работе [7].

Таблица 1. Координаты точек 7 – 9, 10

N	Locations	Lat. N ⁰	Long. E ⁰	h (m)
7	Ishinomaki	38.4	141.3	10
8	Natori	38.14	140.96	10
9	Iwanuma	38.09	140.93	10
10	Fukushima	37.42	141.05	14

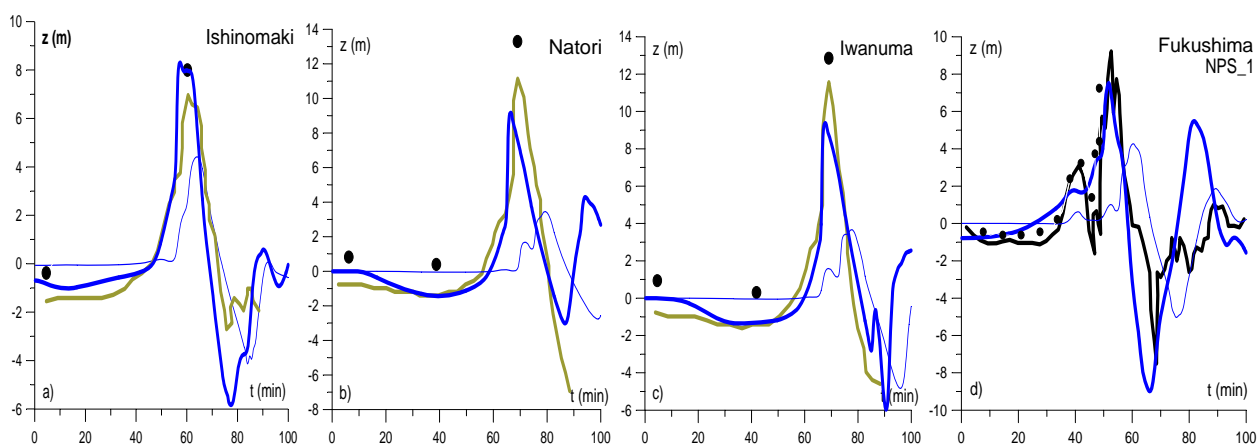


Рис.3. Высота цунами в точках 7 – 10, локализованных возле береговой линии городов Ишиномаки, Натори, Иванума и Фукусима

На рис.3 синие пунктирная и сплошная линии - численные результаты модели COASTOX-UN, соответствующие источникам цунами [1] и [3]. Зеленой линией обозначены результаты модели TUNAMI-N2, представленные в [3]. Маркеры (•) являются экспериментальными данными [3]. Черная сплошная линия и обозначения (•••) на рис. 3 d) соответствуют данным анализа и измерений в волновом створе [8].

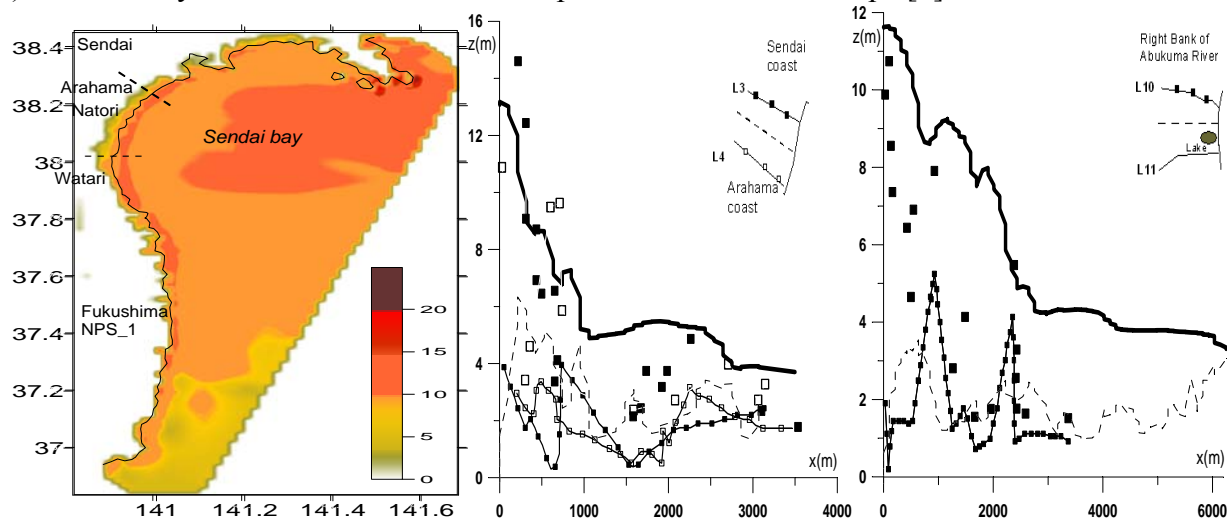


Рис. 4. Максимальные высоты наката (м) в моделируемых сечениях залива Сендаи

Сравнение максимальных уровней воды и максимумов наката цунами, вычисленных COASTOX-UN в моделируемых сечениях залива Сендаи, с экспериментальными данными [7] при использовании топографии SRTM (90м) показано на рис. 4. Черной тонкой береговой линией отделена зона заплеска шириной 4 – 6км (рис.4, левая панель), где пунктирные линии соответствуют моделируемым сечениям топографии на средней и правой панелях, в которых максимальные значения высоты наката (сплошная черная линия) сравниваются с экспериментальными данными на рельефе суши. Данные уровней топографии экспериментальных сечений L_3 , L_4 и L_{10} - тонкие линии, обозначенные соответственно этим сечениям.

Заключение

Результаты моделирования согласуются с измеренными данными в выбранных зонах экспериментальных измерений работ [3], [8] и могут быть улучшены при уточнении данных топографии этих сечений.

Список литературы

1. Fujii, Y., Satake, K., Sakai, S., Shinohara, M., Kanazawa, T. (2011). Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Earth Planets Space, 2011, 63. - pp. 815–820.
2. Kolomiets, P., Sorockin, M., Kivva, S. and Zheleznyak, M. (2014), UCEWP-MOR - A Numerical Simulator for Depth-Averaged Surface Water Flow, Sediment Transport and Morphodynamics in Nearshore Zone, UCEWP, User guide, Kiev, Ukraine.
3. Muhari A., Imamura F., Suppasfi A., Mas E. (2012). Tsunami arrival time characteristics of the 2011 East Japan Tsunami obtained from eyewitness accounts, evidence and numerical simulation. Journal of Natural Disaster Science, Volume 34, Number 1, 2012. - pp.91-104.
4. Okada Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a halfspace, Bull. Seismol. Soc., 1985, Am75: pp 1135–1154.
5. Dipsaptono S., Muhari A., Imamura F., Koshimura S. and Yanagisawa H. (2013). Impacts of the 2011 East Japan tsunami in the Papua region, Indonesia: field observation data and numerical analyses. Geophys. J. Int. (2013) 194. - pp.1625–1639.
6. Zheleznyak M., R.Demchenko, P.Kolomiets, M.Sorockin, P.Dikiy (2016). Numerical simulation of tsunami propagation by COASTOX-UN model. MODS_2016, pp. 83-85.
7. Gardner D. (2013). Modeling of tsunami event caused by Great East Japan earthquake of 2011, including run-up at Fukushima nuclear plants, 15 p.
8. Research Report of the National Institute for Land and Infrastructure Management. N.52. January 2013. Japan. 358 p.