

УДК 551.466.62
УДК 550.344.42 (265)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИМУШИРСКИХ ЦУНАМИ 2006, 2007 и 2009 НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ СТАНЦИЙ СИСТЕМЫ DART

Королев Ю.П., Лоскутов А.В.

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, y.korolev@imgg.ru

Введение

В 2006–2009 гг. в районе центральных Курильских островов, восточнее о. Симушир, произошли 3 землетрясения с различными магнитудами на западном и восточном склонах глубоководного Курило-Камчатского желоба [10].

Цунами 15.11.2006 вызвало высокие уровни затопления (до 20 м) на центральных Курильских островах [9], проявилось на побережье Японии, нанесло заметный ущерб в Кресент-Сити на западном побережье США. Максимальные высоты заплеска на о. Матуа и о. Симушир составили 20 м. На других островах заплески составляли 4.5–11 м.

На Курильских островах в 2006 и 2007 гг. была объявлена тревога, произведены эвакуация населения из опасных районов, вывод судов в открытое море. Несмотря на высокие заплески на центральных Курильских островах, на северных и южных Курильских островах цунами проявилось незначительно.

Моделирование цунами 2006 и 2007 гг. на Курильских островах описано в работах [5, 12]. На основе детальной информации о подвижках дна в соответствии с моделью Окады [11] построены источники цунами и выполнен расчет цунами, порожденных этими подвижками [12]. Получено совпадение рассчитанных и зарегистрированных форм цунами в открытом океане. Распределение максимальных амплитуд волн вблизи берегов центральных Курильских островов качественно совпадает с измеренным во время полевых обследований [5, 9]. Необходимость использования детальной сейсмологической информации о механизме землетрясения и большого числа элементарных источников обусловлено тем, что при определении магнитуд землетрясений возможны ошибки: при оценке магнитуд землетрясений 2006 и 2007 гг. разными службами возникли заметные расхождения [12]. В работе [14] также описаны случаи неадекватного определения магнитуд землетрясений во время событий 2004, 2010, 2011 гг. Скорректированные спустя 1–4 часа магнитуды превышали предварительные почти на порядок. В режиме реального времени такие ошибки могут привести к неадекватным результатам в прогнозе цунами.

Нередко возникшее цунами оказывается более значительным, чем предсказывается магнитудным методом. Примерами этого являются цунами 2006 г. (район западной Явы) и 2007 г. (Соломоновы острова), сопровождавшиеся жертвами [14].

Подходы к расчету цунами, изложенные в [5, 12], в силу большого объема используемой информации едва ли могут быть применимы при оперативном прогнозе. Результаты, несомненно, весьма полезны для понимания процесса возбуждения цунами, их распространения в океане. Такие подходы, видимо, могут быть полезны для решения задач цунамирайонирования.

Гидрофизические способы прогнозирования цунами, не опирающиеся на информацию о магнитуде землетрясения, не зависят от точности определения магнитуды. Достоверной для оценки степени опасности цунами является информация о сформировавшемся цунами, получаемая в океане станциями системы DART.

Цель

Целью настоящей работы являлось проведение численного эксперимента по расчету формы цунами в пунктах Курильских островов и о. Хоккайдо во время событий 2006 и 2007 гг. без привлечения какой-либо сейсмологической информации о землетрясениях. Оценивалась применимость способа расчета, основанного на информации о цунами, получаемой станциями системы DART. Оценивалась также заблаговременность выполнения расчетов (прогноза), выявлялись ограничения предложенного способа.

Расчет выполнялся на основе способа оперативного прогноза цунами [8].

Способ применялся ранее для моделирования процесса оперативного прогнозирования цунами 2006 и 2007 гг. в открытом океане и слабого цунами 2009 г. в Северо-Курильске по данным станций DART 21414 и 21416 [1]. Получено хорошее соответствие расчетных и зарегистрированных форм волн. При этом точки (станции системы DART), для которых выполнялся расчет, находились дальше от очага цунами, чем станция DART 21414. При моделировании цунами 2007 г. в открытом

океане правильно рассчитывалась начальная, отрицательная, фаза цунами. Моделирование для побережий и пунктов Курильских островов не выполнялось по причине отсутствия зарегистрированных данных.

В работе [3] было показано, что способ может применяться в режиме реального времени при прогнозе локальных цунами. Впервые в режиме практически реального времени был осуществлен прогноз Чилийского цунами 2014 г. [2, 4].

Описание эксперимента

Эксперимент состоял в расчете способом оперативного прогноза формы цунами вблизи побережья Курильских островов и острова Хоккайдо по данным станции DART 21419, ближайшей к очагу, пробег цунами до которой составлял 15 мин в 2006 г. и 12 мин в 2007 г. Ввиду того, что станция DART 21419 не зарегистрировала цунами 2006 и 2007 гг., форма цунами в этой точке рассчитывалась (восстанавливалась) по данным более далекой станции DART 21414, время пробега цунами до которой составляло около 2 часов. Расчет форм цунами в точках открытого океана по данным станции DART 21414 и восстановленным данным станции DART 21419 дал практически идентичные результаты.

На рис. 1 представлена расчетная схема эксперимента с пространственным шагом 3.83 км на широте 40° для расчетов в океане и схема для расчетов вблизи побережья с шагом 0.9 км на широте 45° с указанием местоположений станций системы DART.

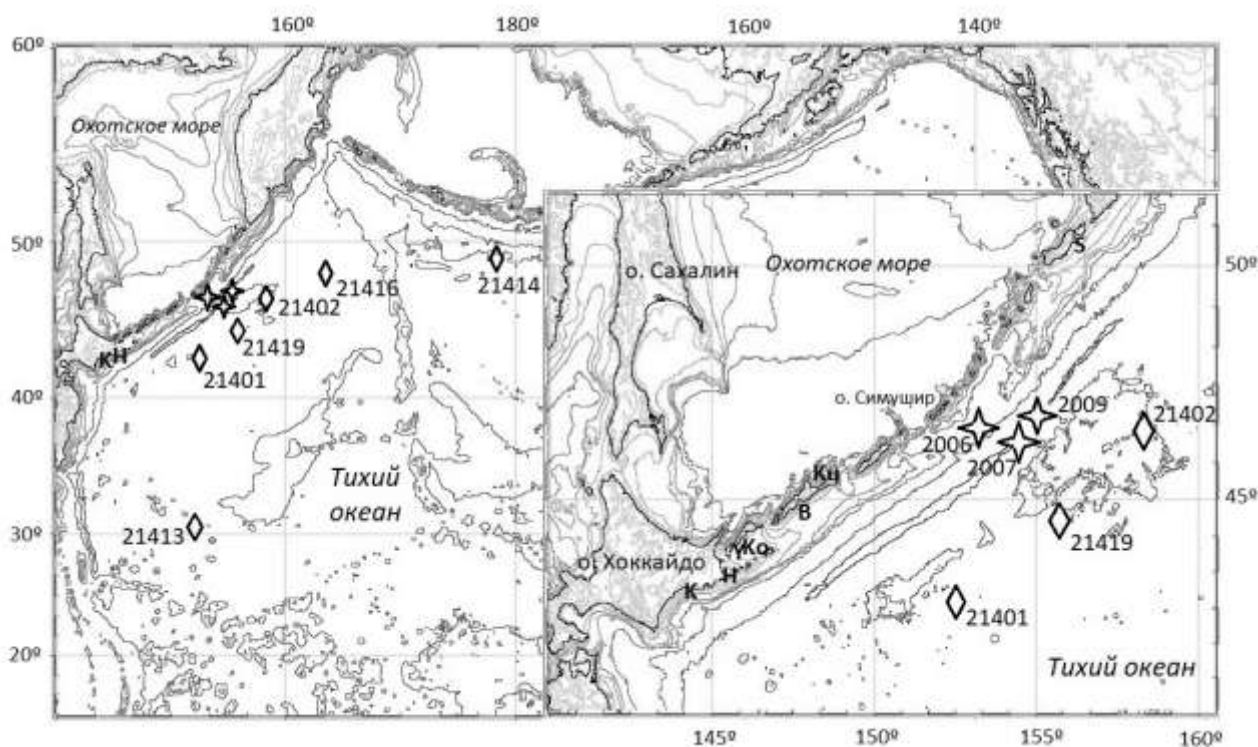


Рис. 1. Расчетная схема численного эксперимента: звездочками обозначены эпицентры землетрясений, ромбами – положения станций системы DART. На схеме обозначено: *H* – Ханасаки, *K* – Кусиро, *Y* – Южно-Курильск, *Ko* – бух. Космодемьянской, *B* – Буревестник, *Ku* – Курильск, *S* – Северо-Курильск

Независимо от расчетов способом оперативного прогноза было выполнено прямое моделирование цунами 2006 г. с использованием детального смещения океанского дна в очаге. Для моделирования распространения цунами в океане использовалась модель глобального рельефа – SRTM15. Данные массива представляют собой регулярную сетку в географических координатах с разрешением 15 угловых секунд.

Для расчета применялся вариант кода TSUNAMI [7] для сферической Земли с распараллеливанием на GPU-процессоре. В качестве начальных условий в расчет вводилось начальное смещение поверхности океана в очаге цунами, оцениваемое с помощью инверсии сейсмических волн [6] и расчета косейсмических деформаций в очаге по формулам Окады [11].

На рис. 2 представлен результат прямого расчета формы цунами 2006 г. на станции DART 21419 и восстановленная способом оперативного прогноза по данным станции DART 21414 форма цунами 2006 и 2007 гг. на станции DART 21419.

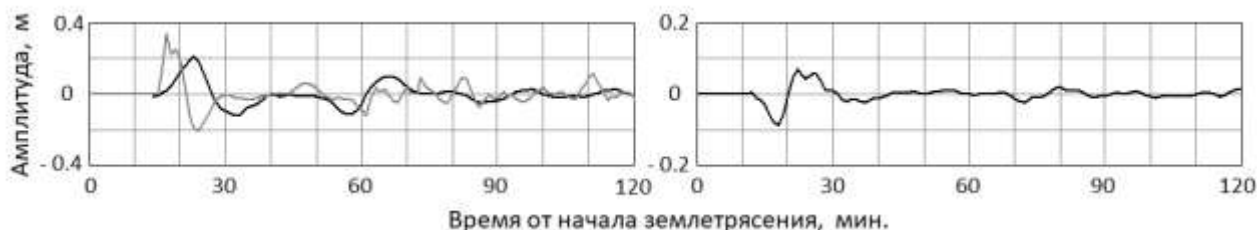


Рис. 2. Волновая форма, полученная прямым расчетом (серая линия), и восстановленная форма (черная линия) цунами 2006 г. (слева) и 2007 г. (справа) на станции DART 21419

Восстановленные формы цунами правильно показывают начальную фазу волн: положительную для 2006 г. и отрицательную для 2007 г. По этим данным длительностью 13 мин (первый полупериод) (2006 г.) и 19 мин (первый период, начинающийся с отрицательной фазы) (2007 г.) в дальнейшем выполнялся расчет (прогноз). В дальнейшем под термином «прогноз» понимается расчет цунами по восстановленной форме цунами в точке DART 21419 способом оперативного прогноза цунами.

Как видно из рис. 2, форма цунами, полученная прямым расчетом, имеет более крутой фронт, нежели восстановленная. Аналогичный эффект наблюдался при моделировании цунами Тохoku 2011 г. [13].

Выбор пунктов расчета обусловлен наличием в этих пунктах или на ближайшем берегу реальных записей цунами, инструментальных измерений высот заплеска или визуальных наблюдений.

Производилось сравнение результатов прямого моделирования, результатов прогноза и немногочисленных натуральных данных о цунами.

Результаты

Выполнен прямой расчет и прогноз формы цунами 2006 и 2007 гг. вблизи побережий северных, центральных, южных Курильских островов и о. Хоккайдо. Прогноз и прямой расчет выполнены в точках на расстояниях 1.0–2.0 км от берега. Некоторые результаты, для которых имелась возможность сравнения с реальными записями, представлены на рис. 3.

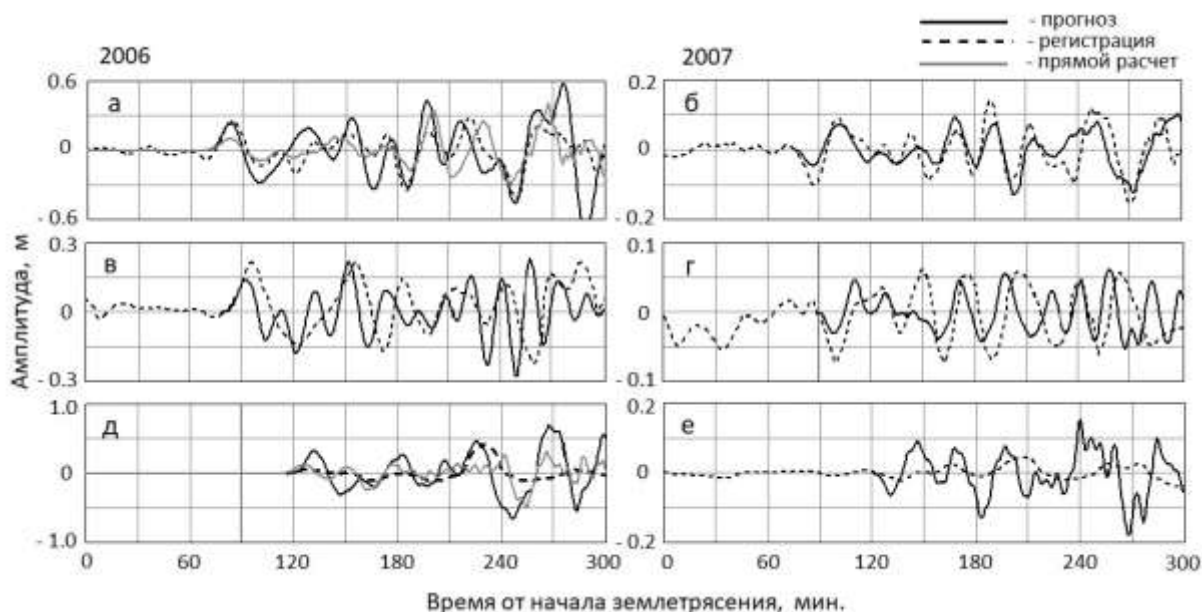


Рис. 3. Сравнение зарегистрированной формы и результатов прямого расчета и прогноза по восстановленным данным на станции DART 21419 цунами 2006 и 2007 гг. На рисунке обозначено: а, б – Ханасаки; в, г – Кусирос; д, е – Южно-Курильск

Несмотря на приближенный характер способа оперативного прогноза цунами, получено неплохое совпадение прогноза и зарегистрированной формы цунами для Ханасаки и Кусиро, причем правильно прогнозируется начальная фаза волны. Совпадения зарегистрированной формы волны с прогнозом и результатом прямого расчета для Южно-Курильска не наблюдается, как в случае 2006 г., так и в случае 2007 г. Объяснений несовпадения для Южно-Курильска в настоящее время нет. Однако даже завышенные оценки амплитуд позволяют определить степень опасности ожидаемого цунами в этом пункте.

Сопоставление результатов прямого расчета и прогноза для других пунктов Курильских островов представлено на рис. 4.

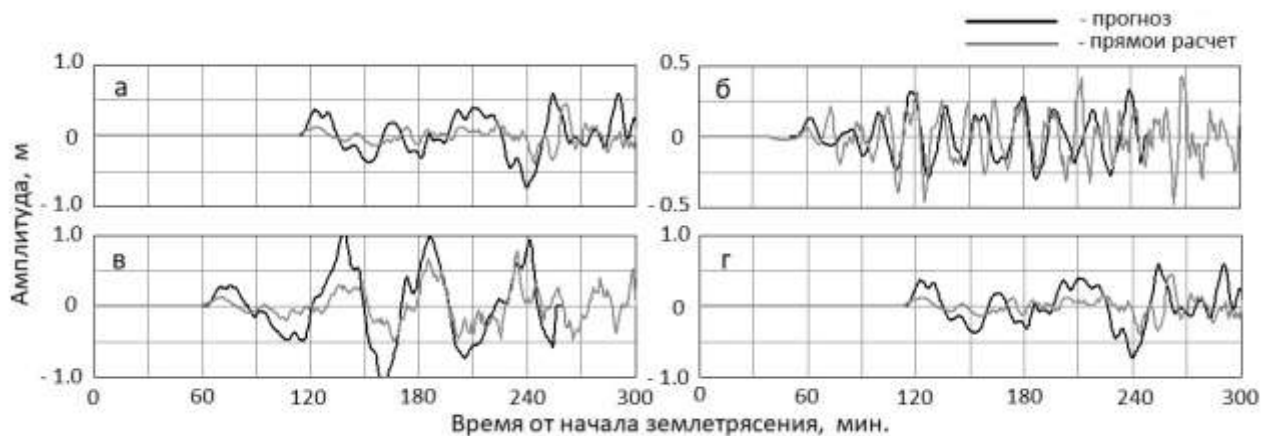


Рис. 4. Сравнение результатов прямого расчета и прогноза по восстановленным данным на станции DART 21419 цунами 2006 г.: а – Северо-Курильск, б – Курильск, в – Буревестник (о. Итуруп), г – бух. Космодемьянская (о. Кунашир)

Получено неплохое соответствие прямого расчета и прогноза цунами для пунктов на островах Парамушир, Итуруп и Кунашир.

Несмотря на неудачный расчет для Южно-Курильска, можно оценить заблаговременность прогноза для этого и других пунктов. При пробеге цунами до станции DART 21419 15 мин и длительности сигнала, взятого для прогноза, 13 мин (для 2007 г. 12 и 19 мин, соответственно), заблаговременность для Южно-Курильска и Северо-Курильска составляет около 1.5 часов. Для этих населенных пунктов, как представляется, времени вполне достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами и, при необходимости, проведения эвакуации населения и вывода судов в открытое море.

Для Буревестника заблаговременность составляет около 30 мин, для Курильска – около 20 мин. Для этих населенных пунктов времени, видимо, недостаточно для объявления тревоги и эвакуации населения. Тревога цунами в подобных ситуациях должна объявляться на основе магнитудного метода.

Выполнены прямой расчет и прогноз цунами 2006 г. вблизи о. Матуа и о. Симушир. Прямой расчет в точках на расстояниях от берега 1–3 км дает амплитуды 1–5 м. Прогноз в тех же точках дает заниженные по сравнению с прямым расчетом амплитуды в 1.5–2 раза для о. Матуа и в 1.2–1.5 раза для о. Симушир. Однако следует иметь в виду, что способ оперативного прогноза цунами является асимптотическим, расчет на малых расстояниях от очага (пробег до островов сравним с характерным первым полупериодом волны) не может быть адекватным. Впрочем, ввиду близости центральных Курильских островов к очагу, расчет по данным станции DART 21419 может быть выполнен заметно позднее прихода цунами. Условие асимптотичности накладывает ограничения на применимость способа оперативного прогноза цунами.

Заключение

Выполнено прямое моделирование цунами 2006 г. с использованием детального смещения океанского дна в очаге. Получено хорошее соответствие результатов прямого моделирования и расчетов (прогноза), полученных способом оперативного прогноза цунами.

Численным экспериментом подтверждена возможность расчета цунами вблизи побережья Курильских островов и о. Хоккайдо по данным станций измерения уровня океана, находящихся к востоку от Курило-Камчатского желоба. Получено неплохое согласие прогнозных и фактических данных.

Заблаговременность прогноза цунами для о. Кунашир и о. Парамушир от землетрясений, происходящих в районе центральных Курильских островов, по данным станций измерения уровня океана к востоку от Курило-Камчатского желоба составляет 1.5 часа. Для о. Итуруп заблаговременность прогноза, по-видимому, недостаточна. Для центральных Курильских островов при землетрясениях в том же районе никакой гидрофизический способ не может быть применим.

Способ оперативного прогноза цунами применим для пунктов, время пробега волны до которых превышает характерный первый полупериод (первый период) волны более чем в 4 раза. При этом станции измерения уровня в океане должны находиться в точках, время пробега цунами до которых сравнимо с характерным периодом волны.

Список литературы

1. *Королев Ю.П.* О гидрофизическом способе оперативного прогноза цунами // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8. № 2. С. 32–47.
2. *Королев Ю.П.* Чилийское цунами 1 апреля 2014 г.: оперативный прогноз для Курильских островов // Труды Пятой научно-технической конференции. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Обнинск: ГС РАН, 2015. С. 360–364.
3. *Королев Ю.П., Ивельская Т.Н.* Совершенствование оперативного прогноза цунами и тревоги цунами. Анализ последних цунами // Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9. № 2. С. 76–91.
4. *Королев Ю.П., Храмушин В.Н.* Об оперативном прогнозе цунами 1 апреля 2014 г. вблизи побережья Курильских островов // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 86–91.
5. *Левин Б.В., Кайстренко В.М., Рыбин А.В. и др.* Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков // ДАН. 2008. Т. 419. № 1. С. 118–122.
6. *Hayes G.* Finite fault model. Updated result of the March 11, 2011 Mw 9.0 earthquake offshore Honshu, Japan // USGS. Earthquake Hazards Program. URL: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/%20usc0001xgp/finite_fault.php (дата обращения: 15.05.2017).
7. *Imamura F.* Tsunami numerical simulation with the staggered leap-frog scheme (numerical code of TUNAMI-N1 and N2) // Disaster Control Research Center, Tohoku University. 1995.
8. *Korolev Yu.P.* An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 3081–3091.
9. *MacInnes B.T., Pinegina T.K., Bourgeois J. et al.* Field survey and geological effects of the 15 November 2006 Kuril Tsunami in the Middle Kuril Islands // Pure and Applied Geophysics. 2009. V. 166. P. 9–36.
10. Global Historical Tsunami Database of National Geophysical Data Center, NOAA. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=7&d=7> (дата обращения: 15.05.2017).
11. *Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // BSSA. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.
12. *Rabinovich A.B., Lobkovsky L.I., Fine I.V. et al.* Near-source observations and modeling of the Kuril Islands tsunamis of 15 November 2006 and 13 January 2007 // Advances in Geosciences. 2008. V. 14. P. 105–116.
13. *Shevchenko G., Ivetskaya T., Loskutov A.* Characteristics of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Russian Far East Coast: deep-water and coastal observations // Pure and Applied Geophysics. 2013. V. 171. № 12. P. 3329–3350.
14. *Titov V., Song Y.T., Tang L. et al.* Consistent estimates of tsunami energy show promise for improved early warning // Pure and Applied Geophysics. 2016. V. 173. P. 3863–3880.