

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ЦУНАМИ ВБЛИЗИ ПОБЕРЕЖЬЯ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

*Ю.П. Королев*

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск,  
Yu\_P\_K@mail.ru, yury@imgg.ru*

### **Введение**

Проблема оперативного прогноза цунами на Дальнем Востоке России является актуальной, до настоящего времени не вполне решенной задачей, несмотря на успехи сейсмологической подсистемы предупреждения о цунами.

Недавнее событие 24 мая 2013 г. вновь показало необходимость совершенствования системы и регламента предупреждения о цунами.

24 мая в 05:47 UTC (16:47 сахалинского времени) в Охотском море произошло сильное землетрясение магнитудой  $M_s=7.3$  с координатами: 54.9 с.ш., 153.8 в.д. Глубина гипоцентра – 620 км.

В 05:57 в соответствии с регламентом ИОЦ "Южно-Сахалинск" Сахалинского филиала ГС РАН объявил тревогу цунами по охотоморскому побережью Сахалина и Курильских островов.

Отбой тревоги цунами был объявлен Центром цунами ФГБУ «Сахалинское УГМС» Росгидромета в 06:17 в связи с глубоким расположением гипоцентра землетрясения [12].

Недостаток объявления тревоги цунами 24 мая заключается не столько в том, что землетрясения с глубиной гипоцентра 620 км не возбуждают цунами, сколько в одновременном объявлении тревоги по всему охотоморскому побережью Сахалина и Курильских островов, хотя времена пробега цунами до различных пунктов существенно различается. Подобный недостаток присущ другим тревогам, объявляемым в соответствии с магнитудно-географическим критерием (сейсмологический способ).

Проблема заключается в том, чтобы давать адекватный, дифференцированный по участкам побережья, заблаговременный прогноз времен прихода первой, максимальной волн цунами в заданный пункт и их амплитуд. По современным представлениям тревога цунами должна объявляться в населенных пунктах с учетом прогнозируемого времени прихода цунами. В настоящее время на основании сейсмологической информации о землетрясении такой прогноз невозможен.

Гидрофизические способы не подменяют существующий сейсмологический способ, но во многих случаях с достаточной заблаговременностью дают достоверный прогноз цунами, что позволяет принимать решение об объявлении тревоги в оптимальные сроки только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу.

### **Гидрофизический способ оперативного прогноза цунами (постановка задачи)**

В настоящее время существуют два гидрофизических способа оперативного прогноза цунами.

Один из них, разработанный в Тихоокеанской лаборатории морской окружающей среды (Pacific Marine Environmental Laboratory (NOAA PMEL)), практически применяется во время событий, связанных с цунами [8]. В настоящей статье этот способ называется *способ PMEL*. Несмотря на эффективность способа PMEL, основным способом предупреждения о цунами остается сейсмологический.

Другой способ, разрабатываемый в ИМГиГ ДВО РАН, в настоящее время используется для моделирования процесса оперативного прогноза цунами после события [1-4, 6, 7]. Ниже он называется *способ ИМГиГ*.

Гидрофизические способы оперативного прогноза цунами ставят целью дать наиболее полную информацию об ожидаемом цунами вблизи конкретных пунктов побережья: время вступления цунами, амплитуды первых волн, времена прибытия максимальных волн и их амплитуды, длительность (длительность тревоги) цунами.

Понятие *оперативный прогноз цунами* изначально применялось к прогнозу, выполняемому на основе сейсмологического способа. Однако, как известно, сейсмологический способ не может давать детальную информацию об ожидаемом цунами, тем более для конкретного пункта побережья.

До 2013 года не существовало определения оперативного прогноза цунами, осуществляемого гидрофизическим способом [9]. Лишь в 2013 г. такое определение было дано в Глоссарии цунами, разработанном Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО (IOC UNESCO): "A quantitative estimate of any property of the tsunami hazard that is made in advance. Properties that may be

forecast include the time of initial wave arrival, the time of maximum wave arrival, *the amplitude* of the maximum tsunami waves, and the duration of the tsunami hazard" [5].

В настоящей работе для моделирования оперативного прогноза цунами применялся способ ИМГиГ [1, 6, 7]. Целью, которая с самого начала ставилась при разработке способа, являлась цель гидрофизических способов, сформулированная выше. Рассчитанная этим способом форма ожидаемого цунами дает ответы на все пункты, приведенные ЮНЕСКО в определении понятия прогноз цунами. Согласно этому способу, по данным об уровне в одной, удаленной от побережья, точке рассчитывается форма ожидаемого цунами вблизи любого заданного пункта. При этом необходима информация только о координатах эпицентра землетрясения.

Способ ИМГиГ не опирается на конкретный механизм землетрясения, размер очага, поэтому возможен прогноз цунами, возбуждаемых различными механизмами, в частности, в результате подводного оползня.

Момент времени выполнения прогноза этим способом равен моменту времени прихода цунами в точку регистрации плюс время идентификации цунами в этой точке (первый полупериод для предварительного прогноза) и плюс время для выполнения прогноза (1 – 2 мин.).

Способ применим для пунктов, для которых момент времени прогноза меньше, чем момент первого вступления (максимальных волн) цунами в заданный пункт минус время, необходимое для эвакуации (разное для различных пунктов).

Для пунктов, для которых этот критерий не выполняется, тревога цунами должна быть объявлена в соответствии с действующим регламентом.

Расчет может выполняться в режиме реального времени, если информация от уровенной станции поступает в таком же режиме. Возможно также создание базы расчетных вспомогательных мареограмм. Однако такая работа весьма трудоемка, ее выполнение целесообразно после создания парка глубоководных уровенных станций Российской службы предупреждения о цунами.

В [4, 6, 7] представлены результаты ретроспективного прогноза некоторых цунами.

В настоящей работе для моделирования процесса оперативного прогнозирования цунами применялся способ ИМГиГ, модифицированный для расчета прогнозируемой формы волны цунами большой длительности. По ограниченной продолжительности уровенной информации в удаленной точке (первый полупериод) возможен прогноз цунами достаточно большой продолжительности, на основании которого можно оценивать длительность тревоги цунами. [7].

### **Моделирование оперативного прогноза Чилийского цунами 2010 г.**

Чилийское землетрясение магнитудой 8.8 произошло 27 февраля 2010 г. в 06:34:12 UTC вблизи побережья Чили. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 36°07'19" ю. ш., 72°53'53" з. д. [14].

Для построения передаточной функции выполнялся расчет волнового поля от вспомогательного источника диаметром 100 км с максимальной высотой 10 м. Расчет выполнен на разностной сетке с шагом 5 км на экваторе, применялись географические координаты. Эпицентр источника находился в точке с координатами 36°07'19" ю. ш., 73°23'53" з. д. Глубина океана в эпицентре источника по батиметрическим данным составляла 207 м. Смещение центра источника относительно фактического эпицентра обусловлено тем, что в противном случае большая часть источника приходилась бы на область суши.

Для расчетов вблизи Курильских островов был выполнен переход на сетку с шагом 1 км на широте 45° с. ш. Положение пунктов, для которых выполнялся расчет, а также ближайших к Курильским островам станций DART указано на рис. 1. Координаты станций системы DART, мареографов и данные об уровне океана доступны на сайтах [13, 15].

Расчет цунами выполнялся по различной длительности записи цунами станции DART 32412, ближайшей к очагу, зарегистрировавшей цунами. Форма цунами представлена на рис. 2. В точке, где расположена станция DART 32412, цунами представляло собой головную волну заметной амплитуды с характерным периодом около 60 мин., сопровождавшуюся хвостом малой амплитуды.

Результаты расчета цунами в районе Курильских островов, выполненного по длительности записи на станции DART 32412, равной 64 мин., представлены на рис. 3.

Расчет формы цунами длительностью 256 мин. в точках 21413 и 21416 в открытом океане показывает неплохое совпадение головных волн, структуры волн в среднем с зарегистрированными цунами. Однако расчетные формы волн осложнены высокочастотными колебаниями с периодами 15 – 20 мин. Возможная причина появления таких колебаний обсуждается в [2].

Длительность рассчитанной формы цунами для Северо-Курильска и Южно-Курильска равна 512 мин. при длительности данных станции DART 32412 64 мин.

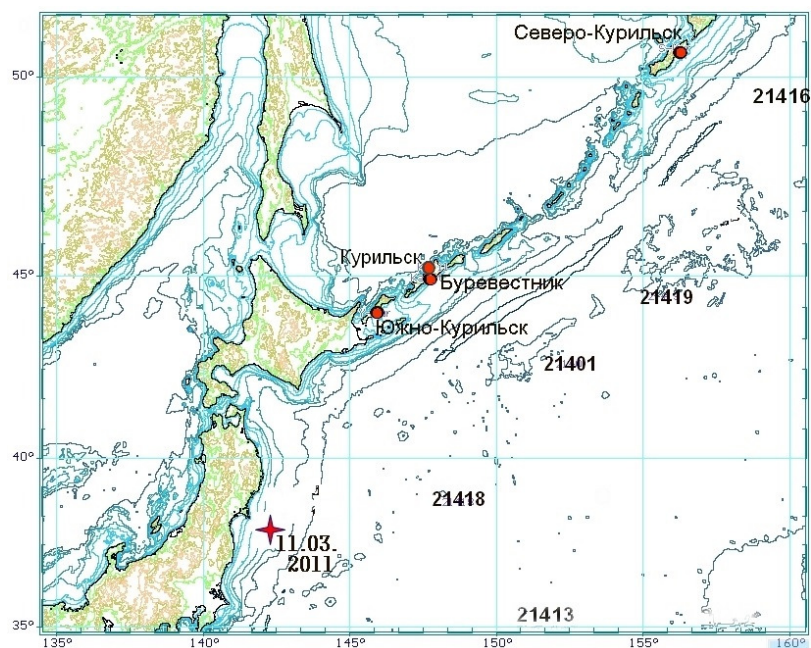


Рис. 1. Схема расположения пунктов прогноза, станций DART. Звездочкой показано положение эпицентра цунами Тохоку 2011 г.

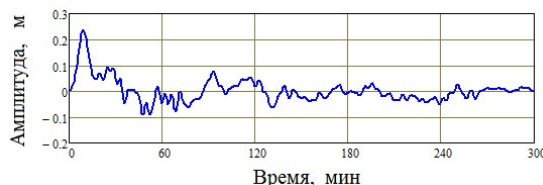


Рис. 2. Форма цунами, зарегистрированная ближайшей к эпицентру станцией DART 32412 (приливные составляющие удалены).

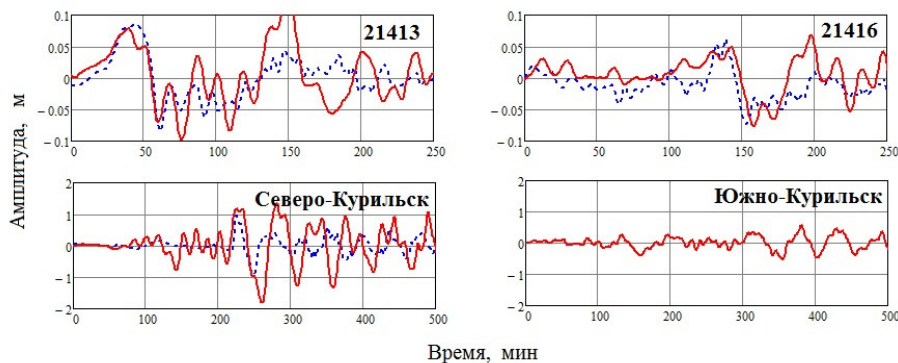


Рис. 3. Результат расчета цунами по данным станции DART 32412 длительностью 64 мин. Красная сплошная линия – расчет, синий пунктир – наблюдения.

Для Северо-Курильска расчет дает головные волны небольших амплитуд, несколько превышающих амплитуды зарегистрированных волн, в течение 220 мин. Прогнозируется приход максимальных волн с амплитудами, превышающими 1 м, спустя 3.5 час. после первого вступления. Уровневые данные доступны на сайте [15]. Фактически тревога цунами в Северо-Курильске объявлялась, но была отменена до прихода максимальных волн. Регистрация Чилийского цунами в Южно-Курильске не проводилась, сравнить результат расчета с фактическим цунами не представляется возможным.

### Моделирование оперативного прогноза цунами Тохоку 2011 г.

Землетрясение Тохоку магнитудой 9.0 произошло 11 марта 2011 г. в 05:46:24 UTC вблизи восточного побережья о. Хонсю. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 38°17'49" с. ш., 142°22'23" в. д. [14].

Вспомогательный источник имел диаметр 100 км и высоту 10 м. Глубина воды в центре источника составляла 970 м. Расчет волны от вспомогательного источника для пунктов в открытом океане выполнен на разностной сетке с шагом 5 км на экваторе, применялись географические

координаты. Для пунктов вблизи Курильских островов расчет выполнялся на сетке с шагом 1 км на широте 45°.

Расчеты цунами для пунктов на Курильских островах и в точках расположения глубоководных станций выполнялся по данным российской станции DART 21401. Положение точек, для которых выполнялся расчет, а также эпицентр землетрясения показаны на рис. 1. Форма цунами, зарегистрированная станцией 21401, изображена на рис. 4. Цунами представляло собой волну практически одного периода длительностью около 30 мин.

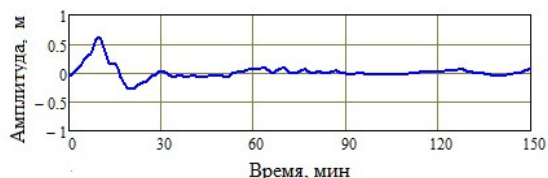


Рис. 4. Форма цунами, зарегистрированного станцией DART 21401 (приливные составляющие удалены).

Результаты расчетов представлены на рис. 5 и 6.

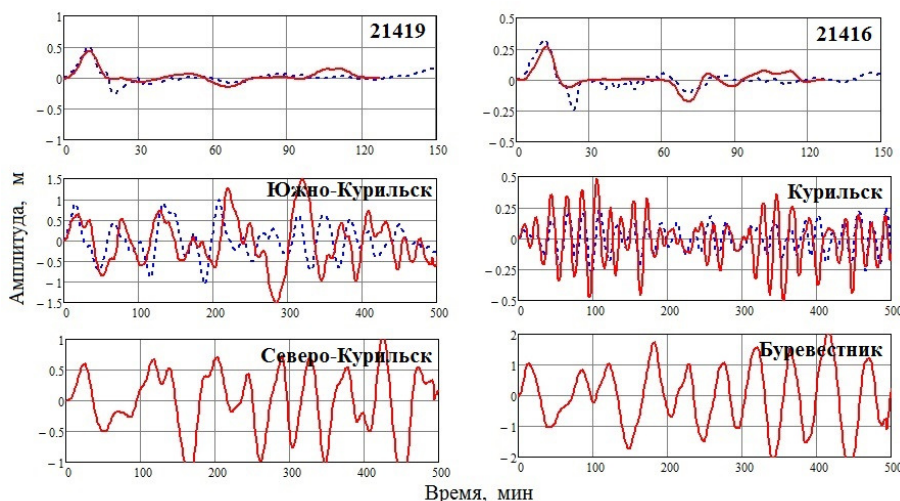


Рис. 5 – Расчет цунами по данным станции DART 21401 длительностью 16 мин (первый полупериод). Красная сплошная линия – расчет, синий пунктир – наблюдения

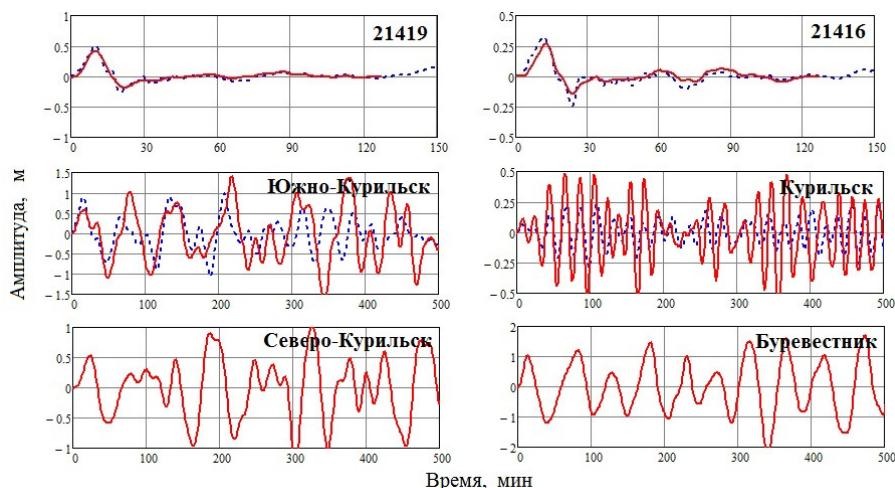


Рис. 6 – Расчет цунами по данным станции DART 21401 длительностью 128 мин. Красная сплошная линия – расчет, синий пунктир – наблюдения

Прогноз, выполненный по уровненным данным станции DART 21401 длительностью 16 и 128 мин., дает практически одинаковые результаты. Это подтверждает возможность способа прогнозировать цунами большой длительности по ограниченной информации уровневных станций. Получено очень хорошее соответствие расчетной и фактической форм цунами в точках 21419 и 21416. Этого следовало ожидать, поскольку станции находятся в открытом океане, на волновой процесс не оказывают влияние различные береговые, резонансные эффекты.

Хорошее согласие наблюдается для Южно-Курильска. Совпадают время прихода цунами в точку прогноза, практически совпадают амплитуды и структура цунами. Согласно прогнозу, амплитуда максимальной волны не должна превышать 1.5 м. Длительность тревоги цунами может составлять 7 – 8 час.

Для Курильска наблюдается очень хорошее совпадение структуры, периодов цунами, однако расчетные амплитуды волн в 1.5 – 2 раза превышают фактические.

К сожалению, регистрация цунами в Северо-Курильске и Буревестнике не проводилась, выполнить сравнение расчетной формы цунами с фактической не представляется возможным. Согласно прогнозу, амплитуды волн не должны превышать 1.5 м для Буревестника. В Северо-Курильске возможно усиление амплитуд последующих волн до 1 м. Результаты расчетов согласуются с данными неинструментальных наблюдений в Буревестнике и Северо-Курильске [4].

Заблаговременность прогноза первого вступления для Южно-Курильска составляет 35 мин., для Курильска 20 мин., для Северо-Курильска 90 мин. и для Буревестника 6 мин. В данной ситуации гидрофизический способ прогноза цунами для Буревестника оказался неэффективным. Такой же вывод можно сделать и для всего побережья Малой Курильской гряды.

Результаты моделирования прогноза цунами, Чилийского и Тохоку, способом PMEL доступны на [10, 11].

### **Заключение**

Результаты моделирования оперативного прогноза цунами на примерах событий 2010 г. (Чили), 2011 г. (Тохоку) показывают, что предложенный способ хорошо работает как в случаях близких, так и дальних цунами. Качество прогноза достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу. Возможность прогнозировать цунами большой длительности позволяет оценить время отбоя тревоги. Таким образом, предложенный способ оперативного прогноза цунами полностью удовлетворяет определению прогноза цунами, сформулированному ЮНЕСКО.

Предложенный способ может служить основой для создания комплекса оперативного прогноза цунами.

Автор выражает благодарность Г.В. Шевченко за предоставленные цифровые данные о Чилийском цунами 2010 г. станции DART 21416.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №13-07-00412.

### **Список литературы**

1. Королев Ю.П. Расчет цунами по измерениям уровня моря в удаленных точках при оперативном прогнозе. // Океанология. 2004. Т. 44, № 3. С. 373 – 379.
2. Королев Ю.П. Анализ способа оперативного прогноза цунами. // Настоящий сборник.
3. Королев Ю.П., Ивельская Т.Н. О совершенствовании оперативного прогноза цунами на Дальнем Востоке. // III научно-техническая конференция "Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России". Петропавловск-Камчатский, 9 - 15 октября 2011 г. Сборник докладов. На CD. <http://emsd.ru/konf111009/pdf/sb/index.html>
4. 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.
5. Intergovernmental Oceanographic Commission. Revised Edition 2013. Tsunami Glossary, 2013. Paris, UNESCO. IOC Technical Series, 85. (English.) (IOC/2008/TS/85rev), [http://ioc-unesco.org/index.php?option=com\\_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442](http://ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442)
6. Korolev, Yu. 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. doi:10.5194/nhess-11-3081-2011. <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/3081/2011/nhess-11-3081-2011.pdf>
7. Korolev, Yu. A New Approach to Short-Term Tsunami Forecasting. // Tsunami - Analysis of a Hazard - From Physical Interpretation to Human Impact. Rijeka, Croatia: InTech. 2012. P. 141-180. ISBN: 979-953-307-835-8. <http://dx.doi.org/10.5772/51345>.
8. Titov, V. V. Tsunami Forecasting // The Sea. Vol. 15, eds. E. N. Bernard and A. R. Robinson. Harvard University Press, Cambridge, MA and London, England, 2009. P. 367—396.
9. UNESCO-IOC. Tsunami Glossary. IOC Information document No. 1221 Paris, UNESCO, 2006. [http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1328&Itemid=1142&lang=en](http://itic.ioc-unesco.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1328&Itemid=1142&lang=en)
10. <http://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20100227/chile20100227-modeldata.html>
11. <http://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/honshu20110311-modeldata.html>
12. <http://rtws.ru/centers/sakhalin/news/240513>
13. <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>
14. [http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml)
15. <http://www.rtws.ru/sea-level/>