

АНАЛИЗ СПОСОБА ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ЦУНАМИ

Ю.П. Королев

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Yu_P_K@mail.ru,
yury@imgg.ru*

Введение

Способ оперативного прогноза цунами, первоначальный вариант которого описан в [1], применялся для ретроспективного прогноза цунами, произошедших в 2010–2011 гг. [2, 4, 5]. В [5] описан усовершенствованный вариант способа.

Во всех экспериментах наблюдалось вполне хорошее совпадение рассчитанных (прогнозированных) и зарегистрированных форм цунами.

Качество прогноза одинаково хорошее как в случаях, когда станции измерения уровня и пункты прогноза находятся в одном, восточном, направлении от эпицентра землетрясения (Симуширское цунами 2006 г.), так и в случаях, когда станции и пункты находятся в существенно разных направлениях, перпендикулярных и противоположных относительно очага цунами (Симуширские цунами 2007 и 2009 гг.). Правильно прогнозируется начальная фаза цунами: повышение или понижение уровня [2].

Прогноз в пунктах Курильских островов выполнен для Чилийского 2010 г. и Тохоку 2011 г. цунами. Результат прогнозирования формы цунами демонстрирует хорошее совпадение временных характеристик, амплитуд, а также появление максимальных волн через несколько часов после первого вступления [5].

Применение способа оперативного прогноза цунами в целом дает результат, вполне пригодный для принятия решения об объявлении тревоги и ее отмене. Однако встречаются случаи не вполне удачных прогнозов, в которых наблюдаются излишние высокочастотные колебания в хвостовой части волнового пакета, не отвечающие реальности. Эти высокочастотные колебания не влияют на процесс выработки решения о тревоге цунами. Тем не менее, при большой амплитуде эти колебания могут повлиять на правильную оценку длительности цунами. В работе предпринята попытка выяснения возможных причин не вполне адекватных прогнозов.

Расчетное соотношение

В работе [1] выведено расчетное соотношение $\zeta(\omega, X) = \eta(\omega, X) \cdot \frac{\zeta(\omega, M)}{\eta(\omega, M)}$, где $\eta(\omega, X)$ и

$\eta(\omega, M)$ – спектры форм волн в точках X и M от вспомогательного источника в виде кругового начального возвышения свободной поверхности с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения, $\zeta(\omega, M)$ – спектр реального цунами в точке M . Приближенный характер соотношения выражается в том, что вспомогательный источник никак не связан с особенностями источника реального цунами. Тем не менее, как показано в упомянутых выше работах, прогноз хорошо совпадает с наблюдениями.

Приведенное расчетное соотношение выведено из соотношения подобия спектров

$$\frac{\zeta(\omega, X)}{\eta(\omega, X)} = \frac{\zeta(\omega, M)}{\eta(\omega, M)}.$$

Обсуждение этого соотношения приведено в [4, 5].

В идеальном случае отношения, как функции частоты, в левой и правой частях должны быть одинаковыми. В силу приближенного характера расчетного соотношения и соотношения подобия эти функции могут иметь некоторые отклонения. Величины и характер этих отклонений влияют на качество прогноза. Поскольку способ прогноза является приближенным, а дальнейшее исследование носит качественный характер, степень совпадения функций будет характеризоваться нестрогим термином "похожесть".

Анализ спектров

В дальнейших исследованиях используются результаты, опубликованные в [4, 5]. Размещение станций измерения уровня океана, положение эпицентров землетрясений 2010 и 2011 гг. указаны на

рис. 1. Более детальная схема района Курильских островов приведена в статье [3] настоящего сборника. Координаты станций системы DART, мареографов и данные об уровне океана доступны на сайтах [6, 7].

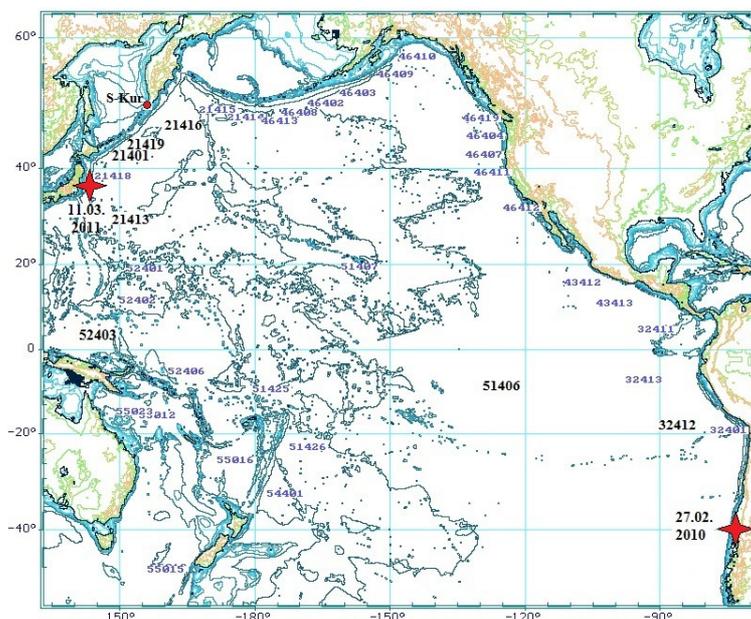


Рис.1. Схема расположения точек регистрации цунами. Звездочками обозначены эпицентры Чилийского и Тохоку землетрясений.

Анализировались записи цунами и формы волн от вспомогательных источников, как в открытом океане, так и вблизи побережья, их спектры, а также отношения спектров в одной точке.

Отношения спектров (модулей) обозначены, как $R_X(\omega) = \frac{|\zeta(\omega, X)|}{|\eta(\omega, X)|}$ и $R_M(\omega) = \frac{|\zeta(\omega, M)|}{|\eta(\omega, M)|}$,

где M – точка, в которой производится регистрация цунами в океане, X – пункт, для которого выполняется прогноз в океане или вблизи побережья.

Для получения спектров выполнялось быстрое преобразование Фурье (БПФ). Оно по сути является дискретным, спектры могут быть изрезанными, но поведение спектров может быть достаточно показательным.

Анализировались как "удачные", так и "неудачные" прогнозы. "Удачными" называются прогнозы, хорошо совпадающие с реальными наблюдениями, не допускающие неоднозначного толкования.

Анализ "удачных" прогнозов

К "удачным" можно отнести все прогнозы для Тохоку цунами 2011 г. и многие для Чилийского цунами 2010 г.

Прогноз Тохоку цунами 2011 г. выполнялся, как для пунктов в океане, где волна зарегистрирована станциями системы DART, так и вблизи населенных пунктов Курильских островов. Для прогноза использовались данные первой российской глубоководной станции системы DART 21401. Использовались данные этой станции различной длительности, от 16 до 256 мин. На рис. 2 приведены зарегистрированное станцией DART 21401 Тохоку 2011 г. цунами и форма волны от вспомогательного источника, а также отношение спектров уровня, функция $R_M(\omega)$.

Как видно на рис. 2, реальное цунами в точке 21401 представляло собой волну практически одного периода длительностью около 30 мин., сопровождающуюся хвостом с малой амплитудой, не превышающей 0.15 м. Волна вспомогательного источника имеет аналогичную структуру.

В настоящем пункте для прогноза использовались данные станции DART 21401 длительностью 64 мин.

На рис. 3а изображено цунами в точке 21419, имеющее структуру, подобную структуре цунами в точке 21401. Здесь же представлена форма вспомогательной волны в точке 21419. Она также представляет собой практически одиночную волну с хвостом незначительной амплитуды.

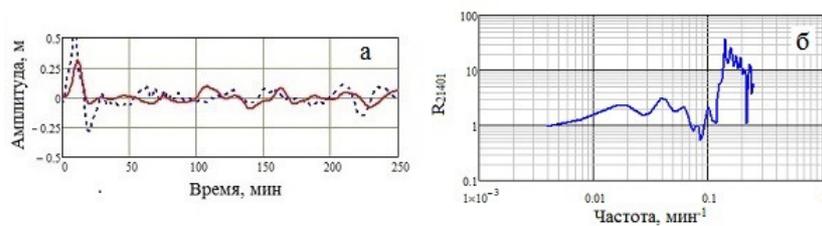


Рис. 2. Форма цунами (синий пунктир) и форма волны вспомогательного источника (красная сплошная линия) в точке 21401 (а). Всюду на следующих рисунках время отсчитывается от вступления волны в точку. Отношение спектров, функция R_{21401} . (б).

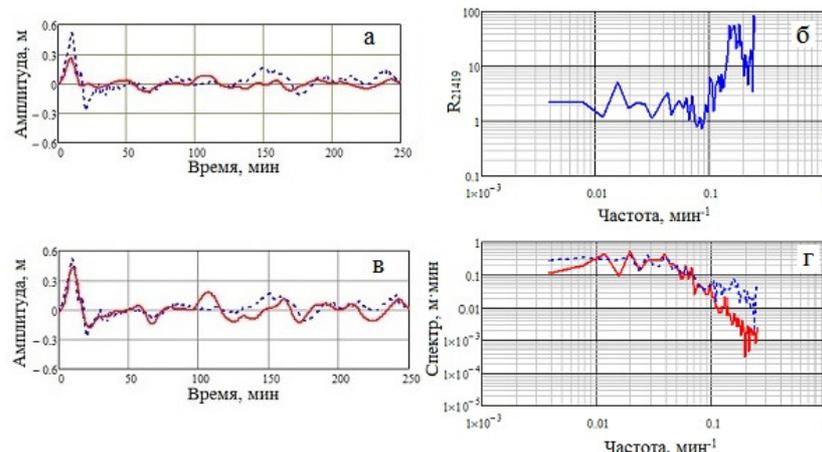


Рис. 3. Форма цунами (синий пунктир) и форма волны вспомогательного источника (красная сплошная линия) в точке 21419 (а). Отношение спектров, функция R_{21419} , (б).

Прогноз цунами в точке 21419 длительностью 256 мин. (красная сплошная линия) по данным станции DART 21401 длительностью 64 мин. Реальное цунами – синий пунктир (в). Спектры реального (синий пунктир) и прогнозированного цунами (красная сплошная линия) (г).

Отношения спектров в интервале частот $0.02 - 0.2 \text{ мин}^{-1}$ на рис. 2б и 3б похожи, если отвлечься от дискретности БПФ. Структуры цунами и волны вспомогательного источника в точках 21401 и 21419 также похожи. Поэтому следует ожидать хорошего результата прогноза. Результат такого прогноза представлен на рис. 3в. Как видно, результат прогноза очень хороший, несмотря на приближенный характер способа. Для сравнения на рис. 3г приведены спектры реального и прогнозированного цунами.

Подобный эксперимент прогнозирования в Северо-Курильске выполнен для Чилийского цунами 2010 г. Результаты представлены на рис. 4 и 5.

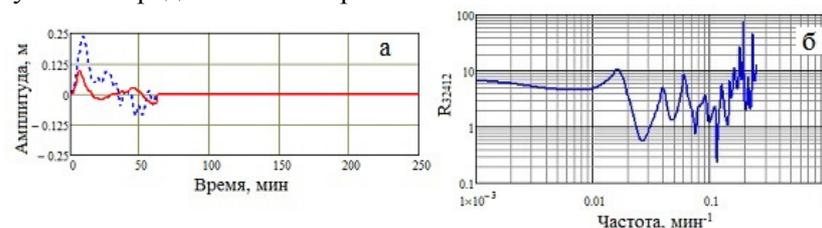


Рис. 4. Формы цунами (синий пунктир) и волны вспомогательного источника (красная сплошная линия) в точке 32412 (а). Отношение спектров, функция R_{32412} , (б). Спектры рассчитаны по длительности 64 мин.

Как видно на рис. 4а, цунами на станции DART 32412 представляло собой волну одного периода с хвостом незначительной амплитуды. Это свидетельствует о том, что возбуждение цунами носило кратковременный характер. Вспомогательный источник представлял собой мгновенное поднятие свободной поверхности в области очага. Логично предполагать, что формы волн от вспомогательного источника должны иметь структуру, подобную (похожую) форме реального цунами. Действительно, в пределах 80 минут форма вспомогательной волны похожа на запись цунами. Прогноз выполнялся по данным станции DART 32412 длительностью 64 мин.

На рис. 5а и 5б представлены формы реального цунами и вспомогательной волны вблизи Северо-Курильска и отношение их спектров. Качественно эти формы похожи. Можно сказать также, что отношения спектров в полосе частот $0.02-0.2 \text{ мин}^{-1}$ в этой точке (рис. 5б) и в точке 32412 (рис. 4б) похожи. Также следует ожидать хорошего результата прогноза.

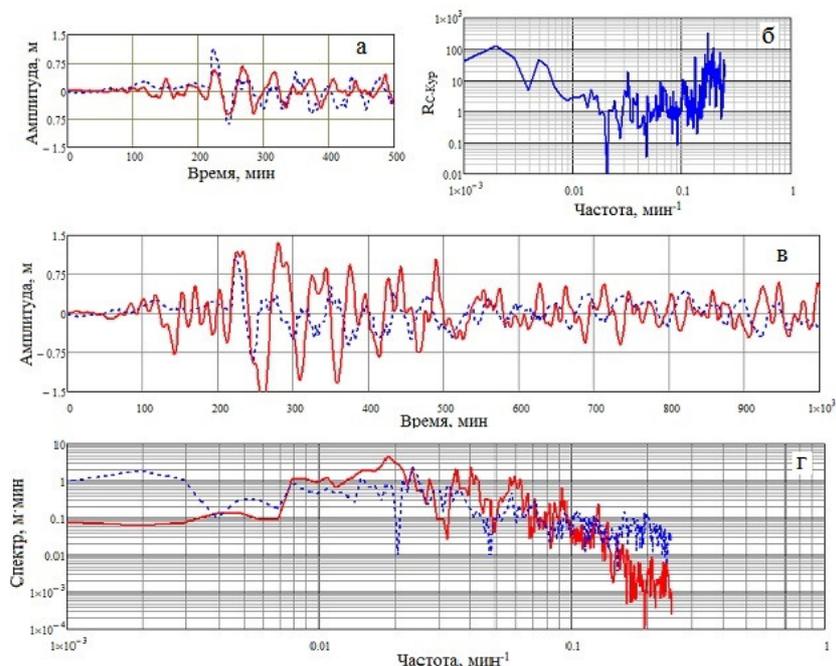


Рис. 5. Формы цунами (синий пунктир) и волны вспомогательного источника (красная сплошная линия) в точке вблизи Северо-Курильска (а). Отношение спектров, функция $R_{C-Кури}$, (б). Прогноз цунами в точке вблизи Северо-Курильска длительностью 1024 мин. (красная сплошная линия) по данным станции DART 32412 длительностью 64 мин. (в). Реальное цунами – синий пунктир. Спектры реального (синий пунктир) и прогнозируемого цунами (красная сплошная линия) (в).

Прогноз демонстрирует (рис. 5в) небольшие амплитуды в течение 220 мин., приход максимальных волн через 220 мин., амплитуда первой из которых хорошо совпадает с амплитудой цунами, продолжительность опасных колебаний около 300 мин. Длительность тревоги цунами может быть оценена в 9 час. от момента первого вступления (5 час. от момента прихода максимальной волны).

Анализ "неудачных" прогнозов

Прогноз Чилийского цунами 2010 г. в Северо-Курильске выполнен также с использованием данных станции DART 32412 длительностью 256 мин. На рис. 6а представлена запись цунами, а также форма вспомогательной волны в точке 32412 большой длительности.

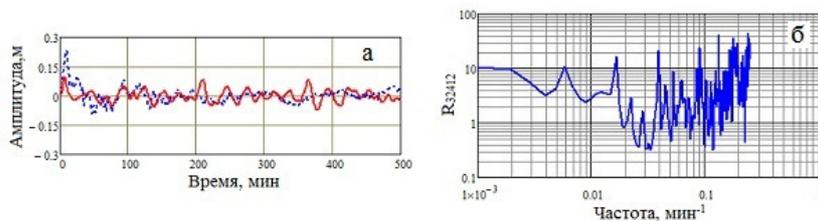


Рис. 6. Формы цунами (синий пунктир) и волны вспомогательного источника (красная сплошная линия) в точке 32412 (а). Отношение спектров, функция R_{32412} , (б). Спектры рассчитаны по длительности 256 мин.

На рис. 6а видно, что после 80-й минуты во вспомогательной волне наблюдаются колебания с амплитудами, сравнимыми или даже превышающими амплитуду головной волны. Структура вспомогательной волны длительностью 500 мин. вопреки предположениям существенно отличается от структуры цунами в этой точке. Отношение спектров в точке 32412 при длительности сигнала 256 мин. (рис. 6б) и 64 мин. (рис. 4б) также отличаются. Ожидать хорошего результата прогноза в данной ситуации не приходится.

Формы реального цунами и вспомогательной волны вблизи Северо-Курильска, а также отношения их спектров представлены на рис. 5а и 5б.

На рис. 7 представлены результаты прогноза. Этот результат следует отнести к "неудачным" прогнозам. Результат не прогнозирует правильно не только структуру, но и амплитуды волн. Можно видеть также отличия спектров цунами, прогнозируемых по данным станции DART32412 длительностью 64 (рис. 5г) и 256 мин. (рис. 7г).

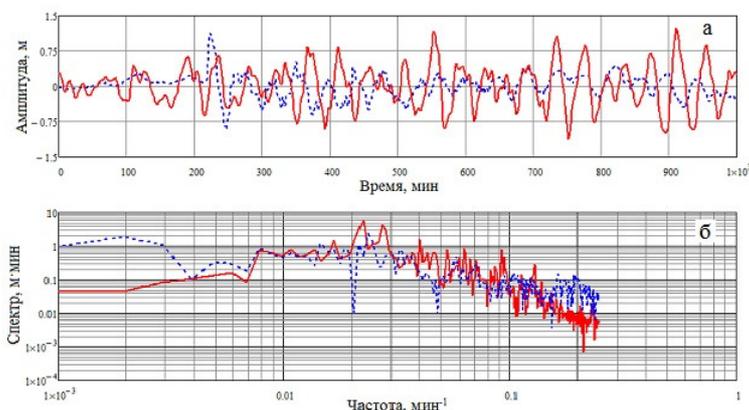


Рис. 7. Прогноз цунами в точке вблизи Северо-Курильска длительностью 1024 мин. (красная сплошная линия) по данным станции DART 32412 длительностью 256 мин. (а). Реальное цунами – синий пунктир. Спектры реального (синий пунктир) и прогнозируемого цунами (красная сплошная линия) (б).

Обсуждение

Представлены результаты расчетов (прогнозов) Чилийского 2010 г. и Тохоку 2011 г. цунами в океане вблизи Курильских островов, а также вблизи Северо-Курильска. В случае Тохоку цунами результаты прогноза хорошо согласуются с данными о реальном цунами. В этих случаях реальное цунами и волны от вспомогательного источника качественно совпадают. Как ожидалось, результаты прогноза вполне адекватны реальному цунами. В случае Чилийского цунами формы цунами и вспомогательной волны в точке 32412 качественно совпадают в пределах первых 80 мин. Прогнозы в Северо-Курильске, а также в других точках адекватны реальному цунами при использовании данных о цунами малой (32–64 мин.) длительности.

Прогноз Чилийского цунами при использовании данных о цунами в точке 32412 большой (более 80 мин.) длительности в Северо-Курильске, а также в других точках в океане относятся к "неудачным" прогнозам. Причина, как представляется, заключается в форме вспомогательной волны в точке 32412. Предположительно, такая форма вспомогательной волны для Чилийского цунами 2010 г. является результатом не вполне адекватного численного расчета. Эпицентр находился в непосредственной близости от побережья. Глубина океана в эпицентре землетрясения составляла 150 м. Использование разностной сетки с шагом 5 км на глубинах менее 150 м может приводить к неадекватному расчету волн в полосе частот, характерных для цунами.

Заключение

Как показано в работе, предложенный способ оперативного прогноза цунами дает вполне адекватные результаты. Примеры "неудачных" прогнозов для Чилийского цунами 2010 г. не являются недостатком способа. Причина заключается, видимо, в адекватности вспомогательных численных расчетов. При прогнозе цунами в случаях близких к побережью очагов необходимо использовать более мелкий шаг разностной сетки, применять способ вложенных сеток.

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. О гидрофизическом способе оперативного прогноза цунами // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8, № 2. С. 32-47.
3. Королев Ю.П. Моделирование оперативного прогноза цунами вблизи побережья Курильских островов // Настоящий сборник.
4. Korolev, Yu. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. 11. P. 3081–3091. doi:10.5194/nhess-11-3081-2011. www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/3081/2011/
5. 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. <http://dx.doi.org/10.5772/51345>.
6. <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>
7. <http://www.rtwis.ru/sea-level/>