

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЗАПИСЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ

Чебров Д.В.¹, Гусев А.А.^{1,2}

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, danila@emsd.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии РАН, Петропавловск-Камчатский, gusev@emsd.ru

Введение

Одно из главных требований к сейсмологической части системы предупреждения о цунами (СПЦ), разрабатываемой в КФ ГС РАН с 2006 года – это наличие системы автоматического определения параметров цунамигенных землетрясений в реальном времени с возможностью формирования заключения о вероятности возникновения цунами вследствие зарегистрированного события. Предполагается, что ключевым звеном сейсмологической подсистемы остается оператор станции цунами, также проводящий обработку землетрясения в реальном времени. Тем не менее, в реальной практике очень вероятна ситуация, когда оператор по тем или иным причинам будет не в состоянии сформировать вовремя сообщение о землетрясении. В этом случае наличие автомата, способного дать оценку происходящему событию и, возможно, разослать сообщение, представляется крайне необходимым.

Достаточно давно известно, что цунамигенность землетрясения зависит от магнитуды землетрясения, в частности, на этом факте основан так называемый магнитудно-географический критерий оценки цунамигенности [2]. Традиционно для оценки по этому критерию пользовались магнитудой по поверхностным волнам M_S . Согласно классическим работам, минимальная пороговая магнитуда M_S , из установленных для различных территорий Дальнего Востока, равна 6.5. Учитывая, что эта величина найдена из условия минимизации (проще говоря, сведения к нулю) пропусков цели, без учета количества ложных тревог, можно с высокой степенью уверенности утверждать, что обрабатывая все землетрясения с магнитудой $M_S > 5.5$, мы не пропустим ни одного цунамигенного землетрясения. Назовем величину $M_S^* = 5.5$ порогом обязательной реакции системы. В данном случае под реакцией системы понимается полная обработка события, формирование сообщения о нем и его рассылка. Это означает, что более слабые землетрясения могут обрабатываться, но сообщения о них не доводятся до других уровней системы, а остаются в данном узле, для внутреннего пользования, или для последующего анализа работы системы.

Заметим, что при выборе пороговой магнитуды обязательной реакции системы мы не учитывали цунами, возникновение которых вызвано не непосредственно землетрясениями, а такими вторичными сейсмическими явлениями как оползни и обвалы. Разумеется, эти опасные природные явления могут быть запущены локальным землетрясением много слабее установленного нами порога, или же сопровождаться таковыми. Однако на данный момент эти события учесть невозможно.

Согласно известному нам распределению сильной сейсмичности и цунами, основную опасность для Дальнего Востока России в будущем представляют цунами, которые возникнут вследствие сильнейших землетрясений в Курило-Камчатском сейсмоактивном регионе. Разумеется, нельзя исключать вероятность цунами в Японском, в Охотском и в Беринговом морях. Таким образом, зону ответственности сейсмической подсистемы СПЦ можно предварительно обрисовать следующим образом: район Курило-Камчатского желоба, Японское, Охотское и Берингово моря, русская часть Алеутского глубоководного желоба (и непосредственно прилегающая к ней), восточное и южное побережья Японских островов. Получается территория, с севера ограниченная широтой Берингова пролива, с востока – условно 180-м градусом долготы, с юга – 25-м градусом северной широты, а с запада – материковой береговой линией. Включение же в зону ответственности всего Тихоокеанского региона представляется в данное время нецелесообразным, поскольку время реакции дальневосточной системы на трансихоокеанские цунамигенные землетрясения будет заведомо больше, чем получение сигнала тревоги из международных каналов.

Учитывая все вышесказанное, задачу, стоящую перед программой-автоматом в общем, и конкретными алгоритмами в частности, кратко можно сформулировать следующим образом: обнаружить и обработать достаточно сильное землетрясение, произошедшее достаточно близко. Для решения указанной задачи в КФ ГС РАН разрабатывается программный комплекс «Быстрая Локализация Источника Цунами», сокращенно – ПК БЛИЦ.

Структура ПК БЛИЦ

Структурно БЛИЦ представляет собой набор программных единиц, которые решают ряд подзадач и имеют стандартизированные определенным образом вход, выход и систему данных. Вызов модулей осуществляется программой-диспетчером, которая, кроме того выполняет задачи подготовки системы к работе при запуске, отслеживает состояние поступающих данных, обеспечивает ведение журнала обнаруженных землетрясений и их параметров, а также возможных возникающих сбоев в работе программного комплекса. Подобный способ построения программы позволяет сделать максимально гибким процесс обработки обнаруженного сигнала, оставляет широкое поле для последующей модернизации продукта, как в рамках существующей технологической цепочки, так и в виде наращивания количества алгоритмов анализа данных на всех уровнях процесса.

Порядок вызова модулей и организация обмена данными между ними, то есть, собственно, технологическая цепочка, определяется логикой обработки землетрясения, в основе которой лежит порядок действий обработчика-человека. В этой работе мы будем под программным модулем понимать совокупность программных единиц, решающих определенную подзадачу в технологической цепочке, связанную с нахождением некоего однородного набора параметров (например, ряда различных магнитуд и прочих параметров движения грунта в точке наблюдения), не останавливаясь подробно на организации доступа к данным и обмена результатами между модулями. В реальности же модули состоят из более мелких подмодулей и процедур. Таким образом, структура программного комплекса более-менее соответствует идеологии модульного структурного программирования.

Для многих подзадач в процессе обработки землетрясения существует более одного алгоритма, которые могут опираться на разные свойства сейсмического сигнала, использовать разные его описания, или же просто эксплуатировать некие особенности языка программирования. Зачастую, предлагается пользоваться сразу несколькими методами оценки какого-либо параметра [3]. При разработке БЛИЦ первоочередное внимание уделялось таким свойствам алгоритмов, как быстроедействие и робастность. Иными словами, алгоритм должен использовать самые надежные и устойчивые параметры сигнала при его анализе, учитывая, конечно, сделанные предположения о его свойствах.

При получении новой порции данных, вызов модулей осуществляется последовательно, в порядке, определенном производственной необходимостью. Каждый последующий модуль может использовать непосредственные результаты работы предыдущих, а так же, при необходимости, имеет доступ к результатам расчетов, произведенных ранее.

Не останавливаясь подробно на средствах обеспечения данных, укажем основные этапы обработки в порядке их следования в технологической цепочке. Это обнаружение сигнала, определение угловых параметров сейсмического луча, снятие момента вступления S -волны, снятие набора магнитуд и параметров движения грунта. Далее следует модуль синтеза результатов: расчет координат эпицентра и магнитуд. Завершает цикл обработки модуль, формирующий сообщение о землетрясении и принимающий решение о его рассылке.

Система алгоритмов

Первоочередной задачей в процессе обработки сейсмических сигналов является, собственно, обнаружение самого сигнала. Из сделанных нами предположений о природе целевого сигнала можно сделать важный вывод, который определяет выбор алгоритма, лежащего в основе этой процедуры. А именно, относительная близость и высокая магнитуда ожидаемого системой события дает нам возможность предположить, что в условиях обычной зашумленности каналов сейсмостанций, соотношение сигнал/шум для данных событий будет достаточно велико. Это дает возможность применить авторскую модификацию достаточно простого и широко известного алгоритма STA/LTA, а именно его вариант, основанный на сравнении мощности сигнала в нескольких частотных диапазонах. Добавим, что принятие решения об окончании события также использует эту технику.

Оценка угловых параметров сейсмического луча на станции основывается на предположении, что момент времени, определенный в модуле-детекторе – это истинное вступление P -волны, и соответственно, следующий участок записи должен быть линейно поляризован. Поэтому, можно считать, что максимальный собственный вектор ковариационной матрицы соответствует направлению луча P -волны. Таким образом, можно вычислить азимут на событие, а также его ошибку. Окно, в котором ищется линейно поляризованная компонента записи, определяется как максимум функции степени поляризации записи от ширины окна $f(W)$.

Поиск времени вступления S -волны ведется с использованием результатов работы предыдущих модулей. Известно, что поперечные волны приходят позже продольной волны, но ранее максимума поверхностных волн, а также имеют большую интенсивность и поляризованы в плоскости, поперечной распространению P -волны. Алгоритм снятия вступления S -волны учитывает все эти факторы. Это помогает избежать грубых ошибок при снятии момента вступления t_s .

В модуль определения магнитуд логически объединены процедуры снятия различных магнитуд и прочих параметров движения грунта в точке наблюдения. Основой энергетической классификации землетрясений в системе БЛИЦ в настоящее время выбрана магнитуда по поверхностным волнам, а точнее ее вариант M_{S20} , предложенный А.А. Гусевым [1]. Выбор данной шкалы объясняется простотой оценки этой магнитуды, надежностью способа и устойчивостью полученных оценок.

Известно, что моментная магнитуда M_W часто является более предпочтительной, чем традиционные шкалы. Основным ее преимуществом стало то, что она не испытывает насыщения при высоких значениях магнитуды. Это, в частности, объясняет то, почему зависимость интенсивности цунами от моментной магнитуды $J(M_W)$ имеет большой коэффициент корреляции. Поэтому, казалось бы, моментная магнитуда больше подходит для использования ее в оценке цунамигенности землетрясения по магнитудно-географическому критерию. Однако, в рамках решаемой задачи, у данной шкалы есть одно существенное ограничение, а именно большое время формирования оценки. По этой причине при оперативной обработке оценка моментной магнитуды согласно классическому определению затруднена.

Тем не менее, существует возможность оценить M_W другими способами. Самый известный из них – это метод, предложенный Цубои, который основан на амплитуде первого полупериода интеграла записи смещения [9]. Очевидное достоинство этой, так называемой магнитуды Цубои, обозначаемой обычно M_{WP} , в быстроте оценки, поскольку для снятия значения требуется около 15 секунд записи. Это говорит в пользу активного использования этой магнитуды в повседневной практике СПЦ. Недостаток, заметно влияющий на результат в сегодняшних условиях дальневосточной СПЦ, вытекает из определения этой магнитуды. Суть в том, что моментная магнитуда вычисляется из скалярного сейсмического момента [5], который, в свою очередь, сильно зависит от диаграммы направленности излучения P -волн. Это означает, что для получения правдоподобной оценки, сейсмическая сеть должна обеспечивать хорошее азимутальное распределение приемников относительно источника. Нет никаких сомнений, в том, что с развитием сети сейсмических наблюдений на Дальнем Востоке, можно будет достигнуть устойчивых оценок M_{WP} .

Второй из используемых в работе способов оценки M_W заключается в определении этой магнитуды исходя из пиковых горизонтальных ускорений на записи [6]. Время, затрачиваемое на получении оценки M_{WAR} сравнимо с временем оценки магнитуды по поверхностным волнам. Существенным ограничением при использовании данных соотношений M_W - a - r является ограничение их использования сверху по расстоянию ($r < 1500$ км.). При современной плотности сети не удастся всюду в защищаемом регионе добиться устойчивых оценок M_{WAR} . Тем не менее, даже сейчас указанная техника может быть полезна для быстрой оценки магнитуды события, произошедшей в близкой зоне особо защищаемых населенных пунктов, вблизи которых развернуты опорные станции СПЦ, представляющие собой велосиметр и группу акселерометров.

Попутно, модуль оценки магнитуд производит оценку инструментальной интенсивности сотрясения грунта по шкале JMA, I_{JMA} . Эта шкала особо отличается использованием при расчетах специальной эмуляции чувствительности человеческого тела к сотрясениям грунта. Методика оценки подробно описана в ряде работ [4,7,8].

Оценка координат производится одновременно несколькими способами, приоритет между которыми распределяется в зависимости от полноты данных. Так, программа способна выдать оценку по единственной сработавшей станции. В этом случае приоритет отдается результату комбинации азимута на источник и разности во времени прихода продольных и поперечных волн. В случае двух-трех сработавших станций оценка производится по набору азимутов на источник. Основное преимущество такого метода по сравнению с засечками S - P заключается в быстроте – для оценки азимута на отдельной станции достаточно получить до 10-15 секунд записи и не требуется ожидать прихода поперечной волны на второй-третьей станции. Однако заметим, что благодаря возможным значительным ошибкам в оценке азимута этот метод нельзя считать вполне надежным. При включении в обработку четвертой станции, приоритет отдается методу гипербол (по вступлению P -

волн). Указанный метод также отличается быстродействием и большей надежностью, по сравнению с предыдущими.

Опробование системы

Благодаря наличию режима эмуляции реального времени, система алгоритмов БЛИЦ проверялась на архивных записях землетрясений. Результаты обработки сравнивались с независимыми оценками параметров землетрясений (каталог NEIC, Гарвардский каталог тензоров-центроидов моментов (СМТ)).

Для данной цели были отобраны записи ряда землетрясений последних десяти лет с магнитудой $M_S > 6.0$. Дополнительно в набор было включено Кроноцкое землетрясение 1997 года. Всего обработано 39 событий. В обработке участвовали преимущественно станции сети IRIS: ADK, BILL, INCN, MA2, MAJO, MIDW, PET, YAK, YSS. Для нескольких последних землетрясений были добавлены специализированные станции: MSH, PAL.

По результатам расчетов был сформирован каталог. Сравнение каталога БЛИЦ и эталонного каталога NEIC позволило сделать несколько суждений о качестве оценки основных параметров землетрясений (см. табл.). Во-первых, можно констатировать однозначно отличное качество оценок магнитуды M_S . Вполне приемлемой остается точность оценки эпицентра, а с учетом того, что в данной работе часто для оценки параметров землетрясения приходилось довольствоваться не более, чем четырьмя довольно далеко расположенными друг от друга станциями, можно заключить, что реальная картина для существующей сети будет выглядеть значительно лучше. Оценки же моментных магнитуд, несмотря на приемлемые статистические показатели (особенно для магнитуды Цубои), пока остаются ненадежны в качестве основы службы цунами. Предполагается, что с развитием сети наблюдений оценки моментных магнитуд могут получить равный приоритет с магнитудой по поверхностным волнам, рассчитываемой в системе.

К настоящему времени система запущена в режиме опытной эксплуатации на станции «Петропавловск». Новые данные, получаемые из результатов работы системы, уже активно используются для улучшения существующей системы алгоритмов. В целом, ПК БЛИЦ продемонстрировал неплохие результаты, в том числе успешно обработав единственное землетрясение с магнитудой выше порога обязательной обработки ($M_{S20} = 5.6$) в защищаемом регионе (несколько южнее Японских островов), произошедшее во время его работы. Различие в положении эпицентра, по сравнению с каталогом NEIC составило 0.7 градуса дуги большого круга.

Заключение

Разработка и внедрение системы автоматического определения параметров землетрясений повышает надежность сейсмической подсистемы СПЦ. Специфика использования автомата накладывает серьезные требования к точности результата. На данном этапе работы можно заключить, что для тестовой конфигурации сети и существующей системе алгоритмов, БЛИЦ показывает хорошие и устойчивые результаты. Это означает, что предположения, заложенные в основу выбора алгоритмической базы, были сделаны верно. Тем не менее, даже в рамках уже налаженного технологического цикла остается множество возможностей для улучшения работы комплекса. Поэтому, особенно важен тот факт, что архитектура разрабатываемого приложения позволяет вести модернизацию и улучшение уже существующих алгоритмов без существенной переработки системы.

Таблица. Качество оценки параметров очагов землетрясений по результатам обработки архивных записей землетрясений

Параметр	Ошибка определения
Координаты эпицентра (δ, λ)	$d\Delta = 0.88^\circ$
Магнитуда по поверхностным волнам M_S	$\delta^2 \approx 0.05$
Моментная магнитуда Цубои M_{WP}	$\delta^2 \approx 0.5$
Моментная магнитуда по пиковым горизонтальным ускорениям M_{War}	$\delta^2 \approx 0.82$

Список литературы

1. Гусев А.А., Чубарова О.С., Викулина С.А. Региональная магнитудная шкала по поверхностным волнам MS (20-рег) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Вторая региональная научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский, 10-17 октября 2009 г. Тезисы докладов. С. 19.
2. Соловьев С.Л. Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // Волны цунами. Труды СахКНИИ, вып. 29. Южно-Сахалинск, 1972. С. 7-47.
3. Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н. Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.
4. Japan Meteorological Agency, 1996. Note on the JMA seismic intensity, Gyosei, (in Japanese).
5. Kanamori H. The Energy Release in Great Earthquakes // J. Geophys. Res. 1977. Vol. 82. P. 2981-2987.
6. Kanno T., Narita A., Morikawa N., Fujiwara H., Fukushima Y. A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. Vol. 96. N3. P. 879-897.
7. Kuwata Y., Takada Sh. Instantaneous Instrumental Seismic Intensity and Evacuation // J. Natural Disaster Science. 2002. Vol. 24. N1. P. 35-42.
8. Shabestari K.T., Yanazaki F. A Proposal of Instrumental Seismic Intensity Scale Compatible with MMI Evaluated from Three-Component Acceleration Records // Earthquake Spectra. 2001. Vol. 17. N4. P. 711-723.
9. Tsuboi S, Abe K, Takano K., Yamanaka Y. Rapid Determination of M_w from Broadband P Waveforms // Bulletin of the Seismological Society of America. 1995. Vol. 85. N2. P. 606-613.