

Автоматическое определение параметров цунамигенных землетрясений на Дальнем Востоке России в режиме реального времени: алгоритмы и программное обеспечение

© 2010 г. Д.В. Чебров¹, А.А. Гусев^{1,2}

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Описана система алгоритмов и программных модулей для автоматического определения в реальном времени эпицентров и магнитуд потенциально цунамигенных землетрясений. Модули сведены в единый программный комплекс “Быстрая локализация источника цунами” (ПК БЛИЦ). Комплекс БЛИЦ был успешно опробован на материале десятков реальных цифровых записей. В настоящее время комплекс БЛИЦ непрерывно эксплуатируется в опытном режиме в составе первой очереди сейсмической подсистемы системы предупреждения о цунами (СП СПЦ) на Дальнем Востоке России.

Ключевые слова: цунами, землетрясение, система предупреждения о цунами.

Введение

Сейсмическая подсистема службы предупреждения о цунами (СП СПЦ) Дальнего Востока России разрабатывается в КФ ГС РАН с 2006 г. Одним из ее важнейших компонентов является система полностью автоматического определения параметров цунамигенных землетрясений в реальном времени. В нормальном режиме автоматическая система выполняет информационную функцию, а ключевым звеном СП СПЦ остается оператор Информационно-обрабатывающего центра (ИОЦ) СП СПЦ, также проводящий обработку землетрясения в реальном времени. На случай чрезвычайной ситуации, когда оператор по тем или иным причинам будет не в состоянии провести обработку землетрясения вовремя, он может воспользоваться результатами автоматической оценки для того, чтобы принять решение о возможности цунами. Предусмотрена, но пока не используется, функция принятия такого решения в полностью автоматическом режиме с правом объявления тревоги [Чебров и др., 2009].

Известно, что цунамигенный потенциал землетрясения зависит, в первую очередь, от магнитуды землетрясения. На этом факте основан так называемый магнитудно-географический критерий оценки цунамигенности [Соловьев, 1972], когда суждение об цунамиопасности произошедшего землетрясения выносится на основе локализации эпицентра и значения магнитуды.

Традиционно на Дальнем Востоке СССР России в этом критерии пользовались магнитудой по поверхностным волнам M_S , определяемой по Соловьеву (современное обозначение $M_S(\text{BB})$). Согласно классическим работам Соловьева, значения пороговых по цунамиопасности магнитуд M_S для акваторий Дальнего Востока составляют 7.0 для района Курило-Камчатского глубоководного желоба и 6.5 для Берингова, Охотского и Японского морей. Эти значения выбирались, исходя из подразумеваемой цели службы предупреждения о цунами: в случае цунамигенного землетрясения тревога должна была быть объявлена практически с гарантией. В то же время, допускалось относительно большое количество ложных тревог. В настоящее время персонал сейсмических станций ГС РАН, входящих в СП СПЦ, руководствуется инструкцией, согласно которой мини-

мальная пороговая магнитуда по поверхностным волнам для прилегающих к Дальнему Востоку России акваторий составляет 7.0.

Учитывая вышесказанное, можно с высокой степенью уверенности утверждать, что, обрабатывая все землетрясения с магнитудой $M_S > 5.5$, произошедшие в указанных районах, 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 более высоких уровней системы, а остаются в данном конкретном узле, для внутреннего пользования, или для последующего анализа работы системы.

Заметим, что рассмотренные выше пороговые магнитуды, относятся лишь к таким цунами, возникновение которых вызвано непосредственно движением океанического дна при землетрясении. Но генерация цунами может быть вызвана также и вторичными сейсмическими явлениями, такими как подводные оползни и обвалы. Данные процессы могут быть запущены локальным землетрясением намного слабее установленного нами порога. В настоящее время не имеется критериев, позволяющих установить магнитудный порог или иные оперативные сейсмологические критерии цунамигенности для цунами, вызванных подобными причинами, поэтому не делается попыток оперативно оценить цунамигенный потенциал явлений данного рода. Данное замечание касается также цунамигенного потенциала эксплозивных извержений вулканов, а также таких подводных оползней и обвалов, которые возникают независимо от землетрясений.

С учетом истории сильной сейсмичности и цунами, наиболее часто побережьям Дальнего Востока России угрожают цунами, порожденные сильнейшими землетрясениями в Курило-Камчатском сейсмоактивном регионе. Но не меньшую опасность представляют возможные цунами с очагами в акваториях дальневосточных морей: Беринговом, Охотском и Японском.

В повседневной практике СП СПЦ в настоящее время установлена зона ответственности (то есть регион, в пределах которого сильные землетрясения обрабатываются без исключений). Она включает в себя Берингово, Охотское и Японское моря и часть акватории Тихого океана, ограниченную с востока меридианом 180° , а с юга – параллелью 41° с.ш. Автоматическая система должна обеспечивать полную, без исключений обработку землетрясений с магнитудой $M_S > M'_S$, произошедших в пределах указанной зоны. Включение в зону ответственности более широкой акватории Тихоокеанского региона представляется в данное время нецелесообразным, поскольку время реакции российской дальневосточной системы на транстихоокеанские цунамигенные землетрясения будет заведомо больше, чем займет получение сигнала тревоги по международным каналам. В настоящее время, на период отладки, система настроена на слежение за несколько большим регионом, чем установленная зона ответственности, до 25° с.ш. Это позволяет увеличить выборку землетрясений, используемых для обучения системы.

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

При создании ПК БЛИЦ учитывали результаты более ранних исследований данного направления [Поплавский и др., 1988; Никифоров и др., 1989; Talandier, Okal, 1989; IASPEI..., 2002; Stein, Wysession, 2003].

Структура БЛИЦ и организация обработки в реальном времени

Структурно БЛИЦ представляет собой набор процедур, которые решают ряд подзадач и имеют стандартизованные вход, выход и формат 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. Такая организация 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 добавления новых алгоритмов анализа данных на всех уровнях процесса.

Порядок вызова модулей и организация обмена данными между ними, то есть, собственно, технологическая цепочка, определяется общепринятой последовательностью действий, предпринимаемых при обработке землетрясения. В этой работе мы будем под программным модулем понимать совокупность программных единиц, решающих определенную подзадачу в технологической цепочке, связанную с нахождением некого 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.

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 [Поплавский и др., 1988]. При разработке БЛИЦ первоочередное внимание уделялось таким свойствам алгоритмов, как быстродействие и робастность. Иными словами, алгоритм должен использовать самые надежные и устойчивые параметры сигнала при его анализе.

Получение данных в реальном времени организовано следующим образом. Система накапливает данные на жестком диске в кольцевом буфере. БЛИЦ опрашивает кольцевой буфер с установленной периодичностью (практически – каждые 30 с), и, получив новую порцию данных, запускает процедуры обработки. Прежде всего, осуществляется ряд чисто технических операций: диагностика текущего состояния каналов, ведение журнала событий и подготовка данных к последующей обработке. Назовем выполнение всей технологической цепочки, начиная с получения новой порции данных, циклом обработки.

Обработка новых данных начинается с модуля, отвечающего за обнаружение землетрясения. Модуль имеет два режима работы в зависимости от того, обнаружено или нет землетрясение в предыдущем цикле обработки. В первом случае принимается решение о том, не завершилась ли запись землетрясения. Во втором случае, когда принято решение, что землетрясение не происходит, система переводится в режим ожидания следующей порции данных, которые она пытается получить через 30 с. Если же землетрясение обнаружено, то снимается время вступления P -волны и фоновые значения уровня шума в наборе частотных полос. Детектирование землетрясений осуществляется для каждой станции независимо.

После окончания работы модуля обнаружения событий, последовательно выполняются модули расчета параметров землетрясений. Выполнение каждого модуля начинается с принятия решения на запуск процедур обработки записи.

После обнаружения землетрясения на данной станции запускается модуль определения угловых параметров сейсмического луча: азимута и кажущегося угла выхода. Принято, что длина участка записи, по которому производятся оценки угловых па-

метров, должна составлять не менее 5 с и не более 20 с после вступления P -волны. Вариант результатов анализа, полученный в том цикле обработки, когда названный участок имеет длину 20 с, считается окончательным для данной станции.

После окончания работы модуля, оценивающего угловые параметры сейсмического луча, запускается модуль снятия момента вступления S -волны. Обработка записей начинается лишь при наличии оценок: времени вступления P -волны t_P и угловых параметров сейсмического луча. Модуль возвращает текущие оценки времени вступления S -волны t_S , а также времени прихода максимума поверхностных волн t_{LR}^{\max} .

Следующим запускается модуль определения набора магнитуд. Расчет магнитуд производится лишь при наличии оценок времен вступления P -волны t_P и S -волны t_S . При расчете значения какой-либо магнитуды в качестве эпицентрального расстояния используется оценка по текущей разности $t_S - t_P$ в предположении фиксированной глубины 33 км. Результат работы модуля – набор магнитуд, включая M_S – базовую магнитуду принятую для классификации землетрясений в СПЦ, а также второстепенные (m_P и др.) номенклатура которых для БЛИЦ в данное время жестко не установлена.

Далее при наличии оценок более чем по одной станции запускается процедура совместного анализа результатов, уже рассчитанных для каждой станции в отдельности. В результате, БЛИЦ в каждом цикле обработки формирует оценку координат эпицентра и оценки магнитуд по сети.

Завершает цикл обработки модуль, формирующий сообщение о землетрясении и принимающий решение о необходимости рассылки этого сообщения. Начиная с первого обнаружения землетрясения, вплоть до окончания его регистрации, в конце каждого цикла обработки система позволяет оператору Информационно-обрабатывающего центра СП СПЦ ознакомиться с текущими оценками эпицентра и магнитуды, выработанными БЛИЦ.

Согласно ориентировочным расчетам, первая вполне приемлемая по надежности оценка эпицентра землетрясения с очагом из зоны ответственности СПЦ может быть с гарантией вычислена автоматически не позже чем через пять минут после начала регистрации любой из сейсмических станций Дальнего Востока России, входящих в СПЦ. Определение указанного периода ожидания надежной оценки базируется на числе станций, которые должны успеть зафиксировать обрабатываемое землетрясение. При расчетах принято, что достаточно состоятельная оценка получается при начале регистрации землетрясения не менее чем четырьмя станциями. Разумеется, чем больше станций зарегистрирует землетрясение, тем обоснованнее будет оценка параметров его очага. Однако, в условиях ограничения времени на подготовку решения о цунамигенности, неприемлемо ожидать прихода волн на все станции сети. Поэтому установлено принудительное ограничение периода ожидания, по истечению которого БЛИЦ оформляет результаты своих расчетов в законченном виде: графически, на ряде планшетов, в текстовом виде, в том числе сохраняя результаты в файлы на диске, для внутреннего пользования и, наконец, в виде сообщения для сервера СПЦ. Подобную, “пятиминутную” оценку мы называем “быстрой”. После окончания регистрации землетрясения на всех станциях, формируется окончательная оценка параметров землетрясения, результаты которой оформляются так же, как и для быстрой.

Отсылка сообщения с быстрой оценкой на сервер производится, только если обрабатываемое землетрясение классифицируется по магнитуде выше порога обязательной реакции, то есть при выполнении условия $M_S \geq M'_S$.

Добавим, что в БЛИЦ реализована возможность запускать систему в режиме эмуляции реального времени, что необходимо, прежде всего, для опробования новых и модифицированных алгоритмов. Принципиально режим эмуляции от режима реального времени отличается только источником данных, в качестве которого выступает сейсмограмма, сохраненная на жестком диске, а не получаемая в реальном времени. При об-

работке архивного землетрясения также существует возможность передать системе параметры этого землетрясения (рассчитанные ранее) для сравнения с рассчитанными автоматически. Все демонстрационные материалы, представленные в данной статье, получены в режиме эмуляции реального времени.

Система алгоритмов

Сопровождение данных

Кратко коснемся внутренних средств сопровождения данных. Производится диагностика данных (наличие/отсутствие потока данных, некачественный сигнал), ведение журнала состояния каналов, при необходимости производится децимация данных или изменение частоты дискретизации сигнала (ресэмплинг, от англ. *resample*). Таким образом, набор модулей для сопровождения данных обеспечивает надежную работу системы вне зависимости от состояния обрабатываемых каналов.

Обнаружение землетрясения и снятие вступления P-волны

Важнейшим шагом процесса обработки сейсмических сигналов является обнаружение землетрясения и последующее уточнение времени его начала (то есть, снятие момента прихода *P*-волны). Поскольку наибольший интерес для описываемой системы представляют относительно близкие и достаточно сильные землетрясения, можно предположить, что в условиях обычной зашумленности каналов сейсмостанций, соотношение сигнал/шум для данных событий будет велико. Это дает возможность применить авторскую модификацию достаточно простого и широко известного алгоритма STA/LTA (отношение осреднений в коротком/длинном окне), а именно его вариант, основанный на сравнении интенсивности сигнала в нескольких частотных диапазонах. Заметим здесь, что решение о завершении регистрации землетрясения на станции также принимается на основе этого алгоритма.

Важными особенностями детектора, работающего в составе программного комплекса БЛИЦ в настоящее время, являются:

- раздельное детектирование для вертикальной и полной горизонтальной компонент с различными порогами срабатывания U_{th}^{ver} и U_{th}^{hor} ;
- детектирование сигнала в нескольких частотных диапазонах;
- сохранение уровня шумов, замеренного до обнаружения полезного сигнала;
- возможность устанавливать порог отношения STA/LTA при котором сигнал объявляется завершенным.

Предположим здесь и далее, что сигнал представлен набором величин x_i , которым соответствуют моменты времени t_i , разница во времени между соседними отсчетами постоянна и равна Δt . Тогда средняя интенсивность сигнала в длинном временном окне протяженностью T_{LTA} будет равна:

$$I_{LTA} = \frac{1}{N+1} \sum_{j=t_0^{LTA}}^{t_N^{LTA}} x_j^2, \quad (1)$$

где $N = T_{LTA}/\Delta t$.

Соответственно, средняя интенсивность сигнала в коротком временном окне T_{STA} запишется аналогично:

$$I_{STA} = \frac{1}{n+1} \sum_{j=t_0^{STA}}^{t_n^{STA}} x_j^2, \quad (2)$$

где $n = T_{STA}/\Delta t$.

При детектировании сейсмических сигналов в БЛИЦ используется отношение квадратных корней величин (2) и (1). Таким образом, отслеживается скачок функции

$$F_{\text{det}}(t) = \frac{\sqrt{I_{\text{STA}}}}{\sqrt{I_{\text{LTA}}}},$$

которую для краткости называют функцией STA/LTA. Момент времени $t = t_d$, когда величина F_{det} достигает установленного порогового значения U_{th} , объявляют моментом начала сейсмического сигнала. При использовании критерия типа STA/LTA обычно отсчет t_d ассоциируют с моментом начала окна STA. Однако, в нашем случае (БЛИЦ), принято, что $t_d = t_n^{\text{STA}}$, то есть последнему отсчету в окне STA. Такой метод временной привязки функции STA/LTA имеет несколько преимуществ при непрерывной обработке данных в реальном времени, а именно:

- позволяет с высокой степенью уверенности утверждать, что истинное вступление P -волны t_P находится в пределах окна STA и всегда $t_P \leq t_d$;
- позволяет при фиксировании уровня микросейсм остановиться на текущем значении I_{LTA} , что очень удобно при достаточно протяженных окнах LTA.

Указанные замечания справедливы при детектировании достаточно сильных землетрясений. Таким образом, ожидаемые свойства используемой функции STA/LTA (а именно крутой подъем) позволяют реализовать уточнение времени вступления P -волны, методом возврата от момента времени t_d ($F_{\text{det}} \geq U_{\text{th}}$) назад, до момента времени t_P ($F_{\text{det}} \approx 1$).

Как уже было сказано выше, детектирование осуществляется параллельно в нескольких частотных полосах $[f_{\min}; f_{\max}]_k$, где f_{\min} – нижняя граница среза частот, f_{\max} – верхняя граница среза частот, а k , соответственно, выбранное число полос в детекторе. Как показала практика, нет необходимости производить детектирование более чем в четырех–пяти полосах.

Таким образом, после построения и обработки функций STA/LTA в каждой полосе, возникает набор q оценок для t_P , не всегда полный ($q \leq k$). Из указанного набора выбирается значение для той полосы частот, которая имеет наиболее высокое соотношение сигнал/шум.

Для того чтобы исключить случайные выбросы на записях, обычно принимают за сигнал достаточно протяженные во времени возмущения фонового процесса (минимальная длительность сейсмического сигнала). В детекторе БЛИЦ это – настраиваемый параметр. Таким образом, если в момент наблюдения $t' > t_P$ справедливо выражение

$$\forall t \in [t_P; t'], F_{\text{det}}(t) > U_{\text{th}},$$

то длительность сейсмического сигнала на данный момент будет равна $T_{\text{sig}} = t' - t_P$.

В настоящее время детектор использует набор из четырех полос частот (Гц): [0.5; 2], [1; 3], [2; 4], [3; 6]. Пороги срабатывания для указанных полос $U_{\text{th}}^{\text{ver}}$ и $U_{\text{th}}^{\text{hor}}$, соответственно равны 10, 11, 12, 13. Длительность окна STA равна 8 с для первой полосы, и 5 с для остальных. Длительность окна LTA составляет 200 с для всех полос. Минимальная продолжительность возмущения фонового процесса, необходимая для того, чтобы принять решение о том, что происходит землетрясение, для всех полос составляет 10 с.

Угловые параметры сейсмического луча

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.

Пусть сейсмический сигнал представляет собой трехкомпонентную запись $X^k = (x_1^k, x_2^k, x_3^k)$. Запишем ковариационную матрицу A размером 3×3 с компонентами

$$A_{ij} = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^{k=N} x_i^k x_j^k,$$

где i, j – индексы, изменяются от 1 до 3, N – номер последнего отсчета в выбранном окне, а нулевой отсчет соответствует установленному значению времени вступления P -волны. Находя собственные значения и собственные вектора вычисленной ковариационной матрицы A , объявляем направление, соответствующее максимальному собственному вектору, направлением движения луча P -волны. Далее рассчитываем степень поляризации сигнала J , равную, согласно определению, отношению интенсивности линейно поляризованной части сигнала к интенсивности полного сигнала. Рассчитывая для набора временных интервалов $[t_P; t_P+W]$ значение J , можно получить функцию зависимости качества поляризации сигнала от ширины окна $J(W)$. Максимум этой функции определит ширину окна, в котором следует искать направление прихода продольной волны.

Добавим, что определение угловых параметров производится для наилучшей, в смысле соотношения сигнал/шум, частотной полосе. В настоящее время используется гребенка фильтров из семи полос (Гц): [1/8; 1/3], [1/4; 1/2], [1/3; 1], [2; 4], [3; 6].

Имея направление луча P -волны на станции, можно легко определить азимут на событие, а также кажущийся угол выхода. Ошибка азимута на событие (без учета систематических ошибок различной природы) определяется арктангенсом отношения полусуммы меньших собственных значений ковариационной матрицы A к максимальному собственному значению.

Снятие времени t_{LR}^{\max}

Оценивание момента прихода максимума поверхностной волны основана на том эмпирическом факте, что амплитуда группы поверхностных волн является преобладающей на достаточно длиннопериодной записи, с периодами 10 с и более. За рабочий диапазон периодов, исследуемых для выделения и анализа поверхностных волн, принят диапазон вблизи периода 20 с. Исходная запись землетрясения (цифровая велосиграмма) пропускается через цифровой фильтр с полосой пропускания 0.04–0.0625 Гц (периоды 16–25 с), затем максимум полученного сигнала (в окне от t_P до последнего имеющегося отсчета t_{end}) и временная позиция этого максимума рассматриваются как максимальная амплитуда в поверхностной волне и время прихода группы поверхностных волн t_{LR}^{\max} .

Снятие вступления S -волны

Поиск времени вступления S -волны ведется с использованием результатов работы предыдущих модулей. При обнаружении вступления поперечной волны принято опираться на следующие факты:

- скорость S -волны меньше, чем скорость P -волны, следовательно $t_P < t_S$;
- скорость S -волны больше, чем скорость движения максимума поверхностных волн ($t_P < t_S < t_{LR}^{\max}$);
- часто S -волна имеет большую интенсивность, чем группа P -волн;
- поперечная волна поляризована в плоскости, по отношению к которой направление луча P -волны оказывается нормальным. Будем далее эту плоскость называть S -плоскостью.

Исходя из вышесказанного, вступление поперечной волны следует искать на отрезке записи землетрясения от его начала до момента прихода максимума поверхностных волн, то есть на интервале времени $[t_P; t_{LR}^{\max}]$. В указанных пределах строятся функция степени поляризации (плоской) от времени $J(t)$ и функция $F_S(t)$, определяемая аналогично функции STA/LTA $F_{det}(t)$, описанной в подпункте, посвященном обнаружению землетрясений на записях сейсмической станции. Конкретное же отличие функции $F_S(t)$ от $F_{det}(t)$, заключается в том, что окна в случае поиска поперечной волны равны (поэтому, строго говоря, некорректно называть $F_S(t)$ функцией STA/LTA), а время привязано к первому отсчету в более позднем окне. Таким образом, функция показывает разницу в характеристике сигнала (в нашем случае – интенсивности) до и после установленного момента.

Предполагается, что момент вступления S -волны должен соответствовать максимуму функции $J(t)$. Исходя из этого, точки t_J'' на временной оси, соответствующие максимумам функции $J(t)$, считаются возможными вступлениями S -волны.

Заметим, что к этапу оценивания t_S уже можно по значениям t_P и t_{LR}^{\max} грубо оценить, в каком интервале следует ожидать прихода поперечной волны. Практически можно с хорошей надежностью предполагать, что момент вступления S -волны заключается в интервале $(0.47–0.83)(t_{LR}^{\max} - t_P)$, на этой основе и задается диапазон поиска (перебора вариантов) t_S . В случае сильной неопределенности, при очень низком качестве оценок времени прихода t_S для приблизительной оценки t_S можно использовать соотношение $t_S \approx 0.7(t_{LR}^{\max} - t_P)$.

В целом, при выборе момента вступления S -волны из набора точек, учитываются следующие факторы: 1) степень поляризации сигнала в данной точке; 2) величина скачка интенсивности сигнала, а также 3) согласие времени рассматриваемого “кандидата во вступление” с грубыми оценками по времени прихода максимума поверхностной волны.

Следует отметить важный методологический факт: степень доверия к оценкам t_{LR}^{\max} и t_P гораздо выше, чем к оценкам t_S . Это объясняется тем, что, вообще говоря, алгоритмы оценки этих параметров гораздо robustнее, чем алгоритм оценки момента вступления поперечной волны. Это соответствует опыту ручной обработки: бывают случаи, когда поперечная волна практически не различима даже опытным оператором.

Оценка магнитуд

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 $M_S(20)$, а точнее ее недавно предложенный вариант $M_S(20R)$ [Гусев и др., 2009; Чубарова и др., 2010]. Выбор данной шкалы объясняется простотой оценки этой магнитуды, надежностью способа и устойчивостью полученных оценок.

Для запуска блока расчета магнитуд необходимо, чтобы для землетрясения в обработке уже были определены времена вступления t_P , t_S и t_{LR} . В этом случае в оперативной памяти хранится достаточно продолжительный полезный сигнал, позволяющий произвести оценку магнитуды по поверхностным волнам. Заметим, что принятие решения о том, считать ли текущую оценку M_S на данной станции окончательной по данной станции, отложено на более позднее время. Такое решение может быть принято на основе соотношения момента начала землетрясения (времени вступления P -волны t_P),

времени прихода максимума поверхностной волны и момента, принимаемого программой за окончание события.

Расчет магнитуды типично выполняется по алгоритму: снятие максимального значения (A/T) и последующее использование некой функции от отношения амплитуды к периоду (A/T), эпикентрального расстояния Δ и глубины h $M = f\left(\frac{A}{T}, \Delta, h\right)$, которая часто имеет табличный вид. Учитывая, что определение основывается на записях велосиграфа, можно использовать следующее соотношение: $\frac{A}{T} = \frac{V_{\max}}{2\pi}$, где V_{\max} – это максимальная амплитуда записи велосиграфа. Расчет $M_S(20R)$ проводится по фильтрованной записи поверхностных волн в полосе 0.04–0.065 Гц (период около 20 с), что дает спектрально определенную магнитуду, хорошо коррелированную с телесейсмической $M_S(20)$. В описанных ниже расчетах использовали предварительный вариант калибровочной кривой для $M_S(20R)$. Для расчета магнитуды $M_S(20R)$ используется следующее соотношение:

$$M_S(20R) = \begin{cases} \lg \frac{A}{T} + 1.66 \lg \Delta + 3.3; & \Delta > 20^\circ \\ \lg \frac{A}{T} + 0.65 \lg(\Delta) + 3.3 + 1.314; & 1^\circ < \Delta < 20^\circ. \end{cases}$$

Станционная оценка $M_S(20R)$ получается как среднеквадратическое по трем компонентам. Снятие амплитуды V_{\max} производится на участке записи $[t_S; t_S + 2.5(t_{LR} - t_S)]$. Практика показала, что поиск в указанном временном интервале обеспечивает снятие максимальной амплитуды поверхностной волны. Магнитуда $M_S(20R)$ оказалась стабильной и устойчивой, разброс между оценками по индивидуальным станциям ДВ сети и расхождение с телесейсмической $M_S(20)$ характеризуется стандартным уклонением 0.20–0.25. Оценки $M_S(20R)$ приемлемо согласуются с более традиционными для Дальнего Востока России оценками широкополосной магнитуды $M_S(BB)$. Они обладают тем преимуществом, что опираются на более низкочастотную часть очагового спектра землетрясения, что желательно для задачи оценки цунамиопасности.

В тестовом режиме реализованы еще две магнитудные оценки. Первая из них – это оценка моментной магнитуды M_{WP} по алгоритму Цубои [Tsuboi et al., 1995].

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 между интенсивностью цунами J и моментной магнитудой M_W наблюдается больший коэффициент корреляции, чем между J и M_S . 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 не представляется возможным дать оценку моментной магнитуды согласно классическому определению.

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 [Tsuboi et al., 1995]. Очевидное достоинство этой, так называемой магнитуды Цубои, обозначаемой обычно M_{WP} , в быстроте оценки, поскольку для снятия значения требуется около 15–20 с записи. Это говорит о целесообразности опробования этой магнитуды в целях возможного включения в повседневную практику СПЦ.

Вкратце, метод оценки магнитуды Цубои заключается в следующем. Амплитуда первого колебания интеграла смещения на вертикальной компоненте U_{\max} подставляется в следующее соотношение для оценки скалярного сейсмического момента:

$$M_0 = 4U_{\max} \pi \rho \Delta V_p^3,$$

где ρ – средняя плотность горных пород; V_p – средняя скорость P -волн; Δ – эпицентральное расстояние. Результат подставляется далее в известную формулу Канамори [Kanamori, 1977]:

$$M_w = \frac{1}{1.5} \log(M_0 - 9.1).$$

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 [Kanamori, 1977], 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, и достаточно большое их количество. То есть, по двум–трем станциям принципиально невозможно добиться надежных оценок магнитуды Цубои. Возможно, с развитием сети сейсмических наблюдений на Дальнем Востоке, можно будет достигнуть устойчивых оценок M_{wp} .

Второй из опробованных в работе способов оценки M_w заключается в расчете оценки этой магнитуды M_{WAR} исходя из пиковых горизонтальных ускорений на записи [Kanno et al., 2006]. Соотношение выглядит следующим образом:

$$\log A_{\max} = a_1 M_w + b_1 X - \log(X + d_1 10^{e_1 M_w}) + c_1 + \varepsilon_1,$$

где A_{\max} – пиковое горизонтальное ускорение; M_w – моментная магнитуда; X – эпицентральное расстояние; $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, \varepsilon_1$ – некоторые коэффициенты, определенные в работе [Kanno et al., 2006].

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 удается 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. Заметим, что используемая зависимость получена ее авторами для условий Японии. Мы используем ее без изменений (но с несколько ослабленным ограничением на эпицентральное расстояние) исключительно в целях тестирования подобной техники.

Попутно, модуль оценки магнитуд производит снятие ускорений грунта в наблюдаемых пунктах, а также оценку инструментальной интенсивности сотрясения грунта по шкале Японского метеорологического агентства (JMA), I_{JMA} . Соотношение для этой оценки записывается следующим образом:

$$I_{JMA} = 2 \lg a_0 + 0.94,$$

где a_0 – пиковое векторное ускорение, после применения к записи специального фильтра, эмулирующего чувствительность человека к сотрясениям почвы. Методика оценки подробно описана в ряде работ [JMA, 1995; Shabestari, Yanazaki, 2001; Kuwata, Takada, 2002].

Оценка положения эпицентра

Оценка координат производится параллельно несколькими способами, данные которых затем объединяются. Относительный вес и приоритет оценок распределяется в зависимости от полноты и качества 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 с записи и не требуется ожидать прихода поперечной волны на второй–третью 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 вступлениям *P*-волн). Указанный метод также отличается быстродействием и большей надежностью, по сравнению с предыдущими.

Проводится также быстрая классификация текущего события по удаленности. Событие относится к одной из двух групп: заведомо удаленные, либо относящиеся (с определенным запасом) к зоне ответственности системы БЛИЦ. Решение принимается исходя из спектрального состава *P*-волн: используется тот факт, что на записях удаленных событий обычно преобладают низкие частоты. Определение удаленности события производится по записям станций Дальнего Востока России (другими словами, по станциям, расположенным на защищаемой территории). Решение о включении события в ту или иную группу принимается по записи землетрясения на станции, первой включившейся в обработку, на основе значений соотношения сигнал/шум в ряде частотных полос. События, спектр которых явно указывает на их удаленность, далее не обрабатываются. Описанный подход достаточно эффективен и, как правило, позволяет системе избегать обработки землетрясений, произошедших вне установленной зоны ответственности.

Быстрая оценка наиболее вероятного положения эпицентра

После начала регистрации землетрясения на первой станции по данным об азимуте на событие и об его ошибках строится карта наиболее вероятного положения эпицентра, которая, по сути, есть функция правдоподобия $\theta(\varphi, \lambda)$, где φ – широта точки, а λ – ее долгота. Указанная функция, в свою очередь, представляет собой произведение двух нормированных функций правдоподобия

$$\theta(\varphi, \lambda) = \theta_S(\varphi, \lambda)\theta_A(\varphi, \lambda),$$

где $\theta_S(\varphi, \lambda)$ – функция правдоподобия, основанная на данных о сейсмическом режиме региона, а $\theta_A(\varphi, \lambda)$ – функция правдоподобия, основанная на данных об азимуте на событие на первой станции, зарегистрировавшей землетрясение и о его ошибке определения.

Вычисленная таким образом функция $\theta(\varphi, \lambda)$ картируется в отдельном графическом планшете и используется оператором в справочных целях.

Информационный интерфейс ПК БЛИЦ

Программный комплекс предусматривает автоматическую обработку землетрясений, не требующую вмешательства человека в процесс. Однако система оснащена средствами визуализации, предназначенными для использования текущих результатов оператором Информационно-обрабатывающего центра в справочных целях.

Внешний вид информационного интерфейса БЛИЦ будет продемонстрирован на нескольких рисунках. Изображения, представленные здесь, получены при обработке архивной записи землетрясения 15 ноября 2006 г. в режиме эмуляции реального времени. Сеть станций в данном случае состояла из восьми цифровых широкополосных велосиграфов сети GSN (нередки ссылки на сеть IRIS): “Билибино” (BILL), “Магадан” (MA2), “Мацуширо” (MAJO), “Мидуэй” (MIDW), “Инхон” (INCN), “Петропавловск” (PET), “Южно-Сахалинск” (YSS) и “Якутск” (YAK).

Во время работы программы на экран выводятся записи сейсмических сигналов, получаемые системой из выбранного источника данных в режиме реального времени. Учитывая, что оператор не должен детально разбираться с особенностями записей в рамках ПК БЛИЦ, сигналы всех трех компонент одной станции наносятся на одну координатную ось. В случае обнаружения землетрясения система подает звуковой сигнал и начинает, по мере получения результатов, отображать их в виде графики и текста. Так, в графическое окно выводятся в явном виде: момент вступления P -волны (при этом указывается полоса детектора, в которой определился момент t_P), азимут на источник, момент вступления S -волны, момент прихода максимума поверхности волны, расчетная магнитуда M_s (рис. 1).

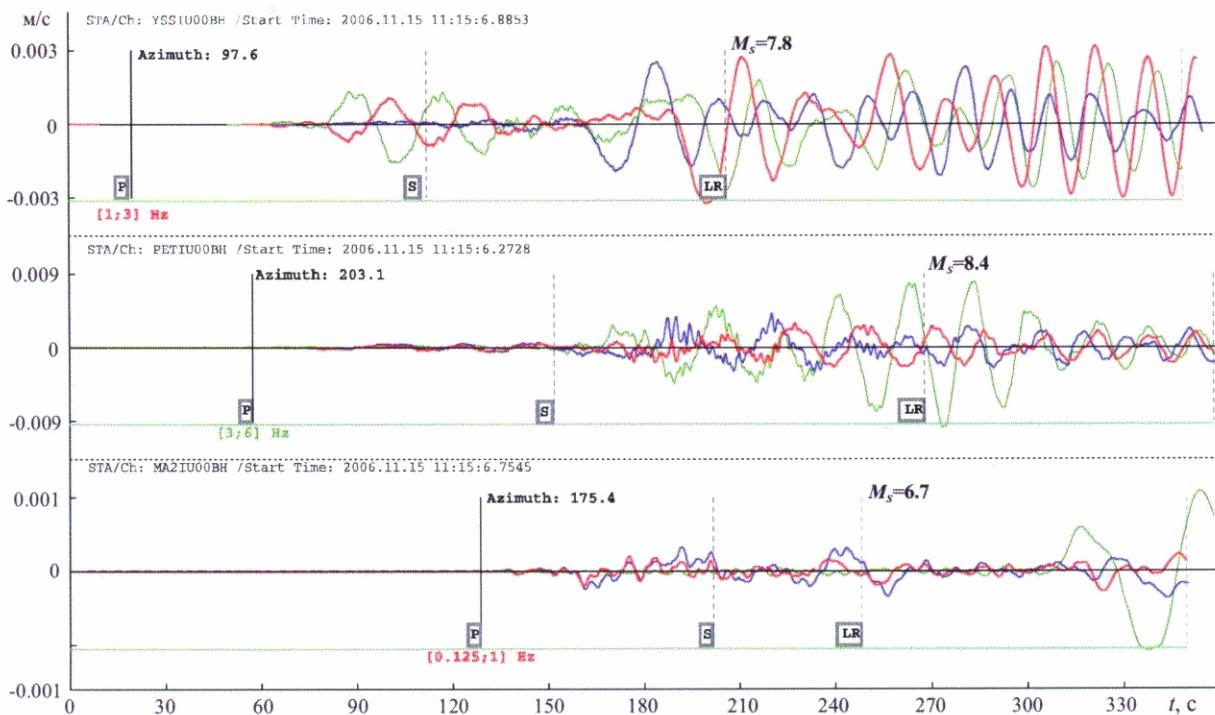


Рис. 1. Пример визуализации записи землетрясения 15.11.2006 г. широкополосными велосиграфами на трех станциях YSS, PET и MA2 в конкретном цикле обработки. Идентификация фаз S и LR на MA2 ошибочная и будет изменена в следующих циклах

На рис. 1 изображены записи землетрясения 15.11.2006 г. на станциях “Магадан”, “Петропавловск” и “Южно-Сахалинск” через пять с половиной минут после начала регистрации на станции “Южно-Сахалинск”. Чтобы не перегружать читателя деталями, в демонстрационном окне оставлено лишь три ближайших к эпицентру станции; вообще же, в штатном режиме выводятся записи всех станций, участвующих в обработке. Масштаб каждой координатной оси устанавливается соответственно максимальным амплитудам на данной станции. Поскольку на рисунке изображен момент времени, когда на станции “Петропавловск” и “Южно-Сахалинск” уже явно пришли поверхности

ные волны, имеющие амплитуды, значительно превышающие амплитуды волн группы P , оценить на глаз точность снятия моментов t_p в этом масштабе сложно. Для наглядности начало регистрации землетрясения на станции “Петропавловск” в более крупном масштабе изображено на врезке.

Характер записей дает основания полагать, что в данный момент времени на станциях PET и YSS уже регистрируются поперечные и продольные волны, в то время как на станцию MA2, по-видимому, только приходят первые вступления S -волн (относительно сильные колебания в районе отметки 330 с). Тем не менее, и для MA2, программа формально рассчитывает значения моментов времени t_S (между отметками 180 и 210 с) и t_{LR}^{\max} (между отметками 240 и 270 с), которые в данном случае оказываются чисто фиктивными. Также фиктивной оказывается и оценка магнитуды M_S , рассчитанные для этой станции. Поясним, что программа БЛИЦ при выработке сводной оценки параметров очага землетрясения вполне успешно умеет отличать чисто фиктивные значения от правдоподобных (фиктивные значения получают нулевой вес). Практика показывает, однако, что для ориентировки оператора, имеющего навыки по обработке сейсмограмм, более полезно выводить в графическое окно все рассчитанные значения, включая и неправдоподобные. Зная, что БЛИЦ игнорирует неправдоподобные оценки при расчетах, оператор получает информацию о том, данные каких станций вообще участвуют в данный момент при оценке параметров землетрясения.

Местоположение расчетного эпицентра землетрясения и некоторые параметры записей на станциях наносятся на карту в отдельном окне, что прежде всего, дает оператору, представление о том, где происходит землетрясение. Также, карты-схемы дают возможность по ряду признаков, визуально оценить степень надежность оценки эпицентра. Изображение обновляется по окончании каждого цикла обработки; рис. 2–4 иллюстрируют вид одного и того же окна в нескольких циклах.

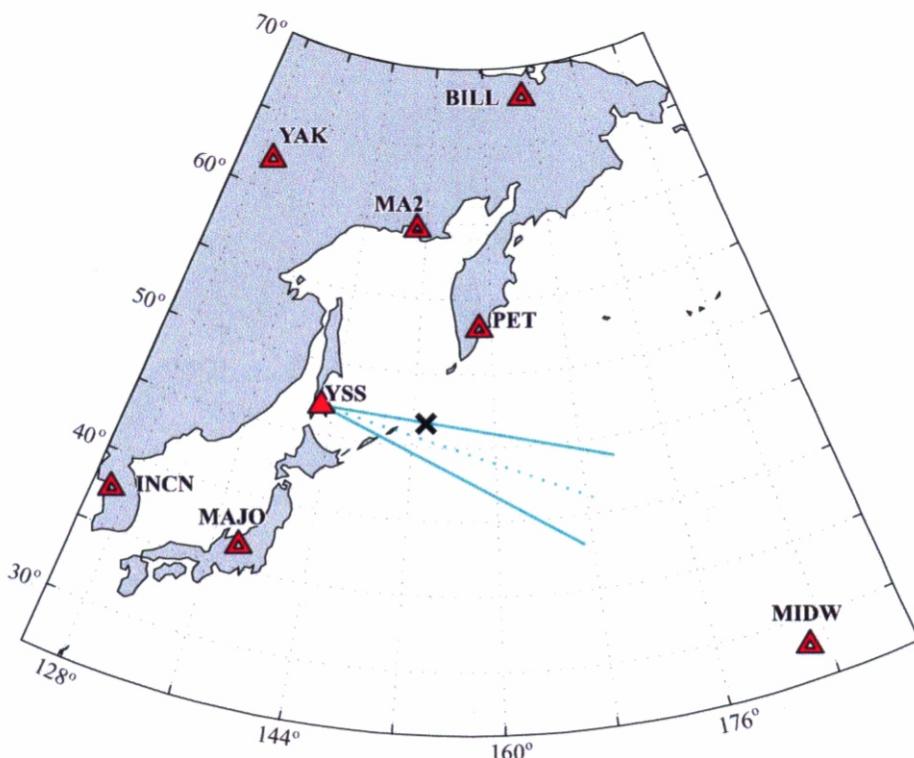


Рис. 2. Отображение результатов обработки землетрясения на карте-схеме: 30 с с момента начала регистрации землетрясения сетью. Условные обозначения см. на рис. 4

На географическую карту наносятся:

- сейсмостанции, задействованные в обработке;
- азимутальные отрезки (сегменты лучей) от станции до возможного эпицентра, имеющие длину, равную оценке эпицентрального расстояния по величине ($t_S - t_P$) (только для станций, время t_S на которых сочтено найденным устойчиво);
- круги-засечки $S-P$ (не отображаются для станций, на которых снятое значение t_S имеет фиктивный характер);
- расчетные эпицентры землетрясения (рассчитанные разными методами);
- подпись – текстовая строка, содержащая время в очаге, широту, долготу, невязку по координатам и магнитуду землетрясения.

В каждом новом цикле обработки могут добавиться новые параметры (например, при начале регистрации землетрясения на очередной сейсмостанции), или несколько измениться уже рассчитанные (вследствие появления новых данных). На рисунках показано несколько характерных изображений, генерирующихся на различных этапах обработки землетрясения. Напомним, что все операции цикла обработки (включая и генерацию и отображение визуальной информации) укладываются в определенный промежуток времени, равный установленной частоте опроса буфера данных (на практике используется 30-секундный интервал). Поэтому, когда мы говорим, что на данном цикле обработки сеть начала регистрировать землетрясение (иначе говоря, первый цикл обработки землетрясения), подразумевается, что реально с момента начала регистрации события могло пройти какое-то время, от нуля до 30 с.

Рис. 2 соответствует моменту начала регистрации землетрясения сетью сейсмостанций: событие обнаружено на станции “Южно-Сахалинск”. Сейсмостанция, на которой регистрируется событие, обозначается заливым треугольником, сейсмостанции же, на которых событие пока не обнаружены, обозначены пустыми треугольниками. На рисунке также изображен сектор, обозначающий азимут на событие и доверительный

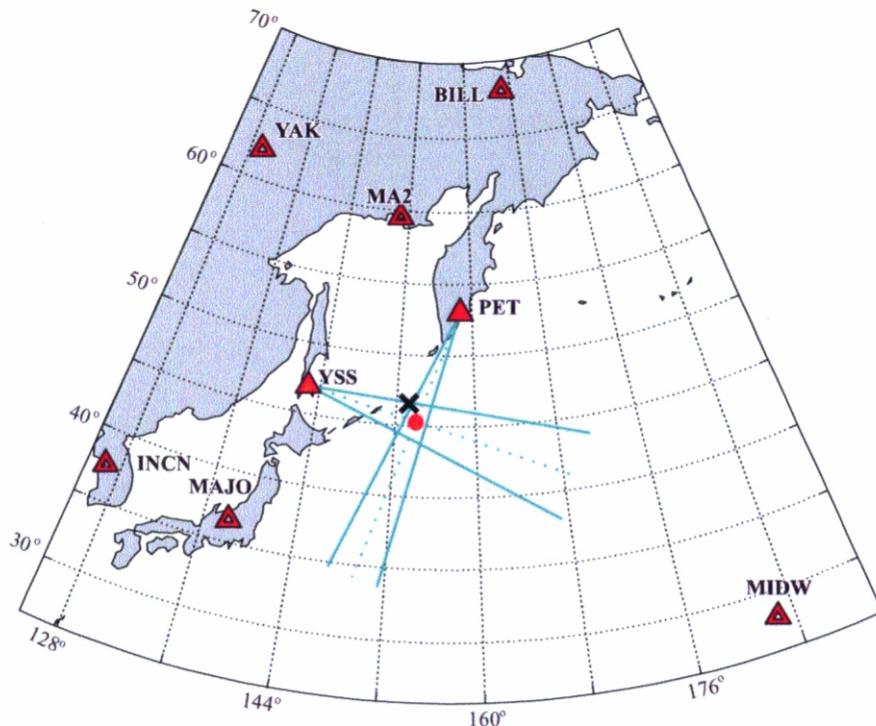


Рис. 3. Отображение результатов обработки записи землетрясения на карте-схеме: 1 мин с момента начала регистрации землетрясения сетью. Условные обозначения см. на рис. 4. Все магнитуды в данном цикле недостоверны

интервал данной оценки. Это означает, что в данный момент на станции “Южно-Сахалинск” накоплено достаточно данных, чтобы получить оценку азимута на событие. В то же время, данных пока недостаточно, чтобы сделать оценку времени прихода S -волн, а следовательно и вычислить координаты эпицентра и магнитуду землетрясения. На этой и последующих картах-схемах для ориентировки приведен также окончательный эпицентр (по данным NEIC), никак не используемый в расчете.

На рис. 3 отображен второй шаг процесса обработки: с момента, запечатленного на рис. 2 прошло еще 30 с. Теперь землетрясение регистрируется на двух станциях: “Петропавловск” и “Южно-Сахалинск”. На карте отмечен эпицентр, рассчитанный по азимутам на событие (обозначен заливым кружком). Группы S -волн, очевидно еще не пришли на сейсмостанции, поэтому информация о них пока не наносится на карту. Также, это означает, что формально рассчитанная оценка M_S пока неправдоподобна. Оценка магнитуды Цубои M_{PW} на данном этапе обработки сочтена программой совершенно неприемлемой и не отображается вовсе.

Наконец, на рис. 4 можно увидеть внешний вид карты-схемы на десятом шаге обработки землетрясения, когда с момента его обнаружения прошло не менее пяти минут. На карту нанесены азимуты с доверительными интервалами почти для всех станций сети (кроме более удаленной MIDW). Кроме того, для двух первых сработавших станций нанесены засечки $t_S - t_P$, и, дополнительно, по азимуту на событие отложенные отрезки, равные радиусам кругов-засечек. При количестве станций в обработке более трех эпицентр рассчитывается методом гипербол на основе вступлений P -волн. Такое решение принимается за приоритетное и обозначается на схеме ромбом. Также на карту наносится и расчетный эпицентр по азимутам на событие, рассчитанный по первым трем станциям. Его местоположение на рис. 4 несколько отличается от того, что представлено

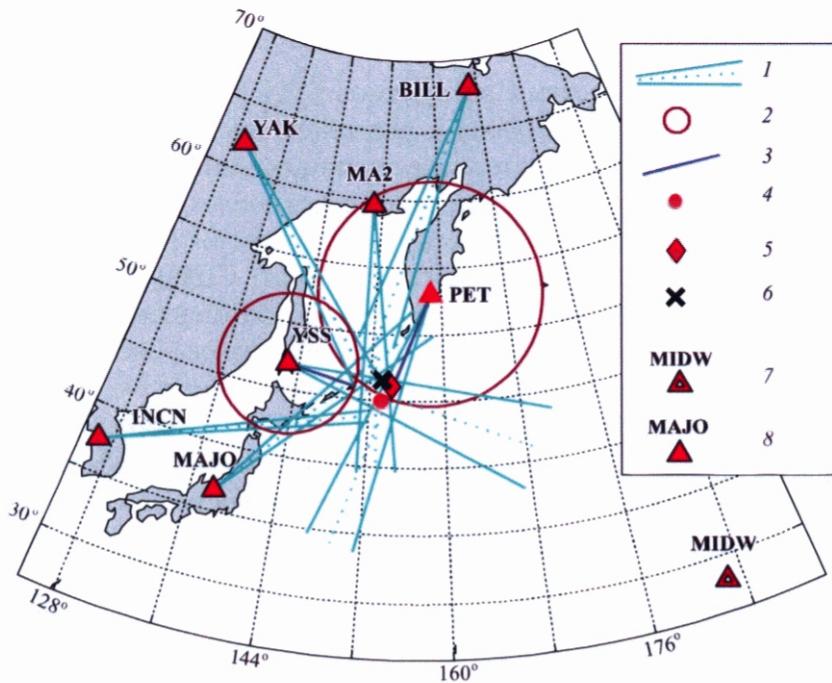


Рис. 4. Отображение результатов обработки записи землетрясения на карте-схеме: 5 мин с момента начала регистрации землетрясения сетью

1 – доверительный интервал для оценок азимута на станции; 2 – засечки по разности про-
бега поперечных и продольных волн; 3 – азимут на событие; 4 – расчетный эпицентр (по ази-
мутам на событие); 5 – расчетный эпицентр (по методу гипербол); 6 – эпицентр по данным
NEIC; 7, 8 – сейсмостанции (7 – землетрясение пока не регистрируется, 8 – землетрясение ре-
гистрируется)

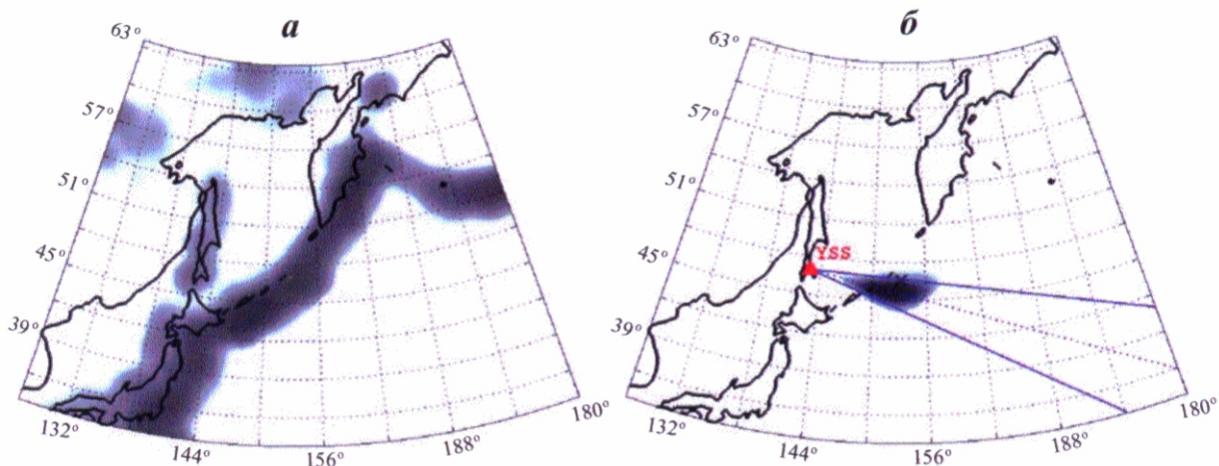


Рис. 5. Априорная карта уровня сейсмичности (*а*) для зоны ответственности. Ожидаемая вероятность местоположения эпицентра землетрясения (*б*) по данным априорной сейсмичности и азимуту на событие, снятому с первой станции

на рис. 3, поскольку на более раннем цикле обработки расчет производился лишь по двум станциям, которые на тот момент приступили к регистрации землетрясения.

Еще одно графическое окно (рис. 5) отображает оценку наиболее вероятного положения эпицентра по данным о сейсмическом режиме региона и азимуту на событие, определенному на сейсмической станции, первой начавшей регистрацию обрабатываемого землетрясения. Более темный цвет отвечает высоким значениям функции правдоподобия $\theta(\varphi, \lambda)$.

Опробование системы

Отладка и опробование системы алгоритмов БЛИЦ проводилось с помощью специально реализованного режима эмуляции реального времени. Это позволяло проверять и подстраивать алгоритмы на материале архивных записей землетрясений. Результаты обработки режима эмуляции сравнивались с независимыми оценками параметров землетрясений. За основу для сравнения был принят каталог Национального сейсмического информационного центра Геологической службы США (NEIC USGS), который для краткости далее мы будем называть каталог NEIC. Моментные магнитуды брали из Гарвардского каталога тензоров-центроидов моментов (далее – каталог СМТ).

Для опробования системы БЛИЦ были отобраны записи ряда землетрясений последних десяти лет с магнитудой $M_W \geq 5.8$. Дополнительно в набор было включено Кронштадтское землетрясение 1997 г. Всего обработано 39 событий. Сведения о землетрясениях, отобранных для обработки, сведены в табл. 1, которая содержит стандартные данные о событиях: время в очаге, координаты эпицентра, глубину гипоцентра в километрах, а также магнитуды по поверхностным волнам M_S (NEIC), и моментную магнитуду M_W (СМТ). Каталог, сгенерированный в результате эмуляционных расчетов системой БЛИЦ представлен в табл. 2. Сгенерированный каталог содержит те же землетрясения, что и в табл. 1, в том же порядке. Однозначная идентификация события возможна по номеру и дате (в табл. 2 время в очаге опущено). Сгенерированный каталог дополнен, относительно табл. 1, некоторыми данными: указана расчетная невязка координат $d(\varphi, \lambda)$, а также ошибка оценки эпицентра по сравнению с оценкой NEIC. Также представлены оценки магнитуд: магнитуды по поверхностным волнам $M_S(20R)$ и две оценки моментной магнитуды: методом Цубои M_{WP} и по пиковым горизонтальным ускорениям M_{WAR} .

Таблица 1. Обработанные землетрясения. Каталог NEIC

№	Дата и время	Широта	Долгота	Глубина, км	M_S	M_W
1	1997.12.05 11:27:21.3	54.31	161.91	34	7.6	7.8
2	1998.06.01 05:34:03.6	52.89	160.07	44	6.3	6.4
3	1999.03.08 12:25:42.0	51.93	159.72	7	7.1	6.9
4	2000.01.28 14:21:07.3	43.05	146.84	61	6.6	6.8
5	2000.07.30 12:25:45.6	33.9	139.38	10	6.5	6.5
6	2000.08.04 21:13:02.7	48.79	142.25	10	7.1	6.8
7	2000.10.06 04:30:19.1	35.46	133.13	10	6.8	6.7
8	2000.12.22 10:13:01.1	44.79	147.2	140	—	6.1
9	2001.08.02 23:41:06.2	56.26	163.79	14	6.2	6.3
10	2001.08.13 20:11:23.4	41.05	142.31	38	6.3	6.4
11	2002.01.29 13:50:28.7	49.38	155.59	33	5.7	6.1
12	2002.05.08 19:45:18.9	53.81	160.77	39	5.4	5.8
13	2002.06.28 17:19:30.3	43.75	130.67	566	—	7.3
14	2002.10.16 10:12:21.4	51.95	157.32	102	—	6.2
15	2002.11.03 03:37:42.1	38.89	141.98	39	6.1	6.4
16	2002.11.17 04:53:54.0	47.82	146.21	459	—	7.3
17	2003.03.15 19:41:28.7	52.25	160.39	30	5.8	6.0
18	2003.03.17 16:36:17.0	51.27	177.98	33	7.1	7.0
19	2003.04.24 10:56:22.0	48.76	154.99	44	5.7	6.0
20	2003.04.29 13:53:17.3	43.71	147.8	63	6.0	5.9
21	2003.05.26 09:24:33.4	38.85	141.57	68	6.7	7.0
22	2003.06.16 22:08:02.1	55.49	160	174	—	6.9
23	2003.06.23 12:12:34.0	51.44	176.78	29	7.0	6.9
24	2003.09.25 19:50:06.0	41.81	143.91	27	8.3	8.3
25	2003.09.29 02:36:53.1	42.45	144.38	25	6.3	6.4
26	2003.10.08 09:06:55.3	42.65	144.57	32	6.6	6.6
27	2003.12.05 21:26:09.1	55.54	165.78	10	6.7	6.6
28	2004.09.05 10:07:08.1	33.07	136.68	14	7.2	7.2
29	2004.09.05 14:57:19.0	33.18	137.07	10	7.4	7.4
30	2004.11.28 18:32:14.0	43.01	145.12	39	7.0	7.0
31	2005.06.14 17:10:12.0	51.24	179.31	17	6.8	6.8
32	2005.08.16 02:46:28.0	38.28	142.04	36	7.2	7.2
33	2004.11.14 21:38:51.0	38.11	144.9	11	7.0	7.0
34	2006.04.20 23:21:02.1	60.95	167.09	22	7.6	7.6
35	2006.06.14 04:18:47.0	51.75	177.08	14	6.5	6.5
36	2006.08.24 21:50:37.0	51.15	157.52	43	6.5	6.5
37	2006.11.15 11:14:13.5	46.59	153.27	10	8.3	8.3
38	2009.01.15 17:49:39.0	46.86	155.15	36	7.4	7.4
39	2009.04.07 04:23:34.0	46.14	151.42	39	7.0	6.9

Также приведены данные количества станционных оценок, вовлеченных в формирование окончательной (среднесетевой) оценки магнитуды. В последних трех колонках даны фактические ошибки определения магнитуд $M_S(20R)$, M_{WP} , M_{WAR} относительно первых значений M_S (NEIC), M_W (CMT) и M_W (CMT), соответственно. В обработке участвовали преимущественно станции сети GSN-IRIS: ADK, BILL, INCN, MA2, MAJO, MIDW, PET, YAK, YSS. Для нескольких последних землетрясений были добавлены станции MSH и PAL (табл. 3).

Заметим особо, что оценки БЛИЦ, представленные в работе – это эмуляция быстрых (пятиминутных) оценок, соответствующих работе в режиме реального времени. Такие оценки могут в существенной степени зависеть от положения эпицентра относительно расположения станций, вовлеченных в обработку этого землетрясения.

Таблица 2. Каталог, сгенерированный по результатам обработки землетрясений в ПК БЛИЦ (быстрые оперативные оценки)

№	Дата	Широта	Долгота	$d(\phi, \lambda)$, градус	$M_{(20R)}^*$	N_{Ms}	M_{WP}	N_{MWP}	M_{War}	N_{Mwar}	$d\Delta$	dMs	dM_{WP}	dM_{War}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1997.12.05	54.4	162.4	0	7.8	4	7.2	6	7.8	3	0.3	0.2	-0.6	0
2	1998.06.01	53.19	158.24	0.61	6.3	4	6.2	4	7.1	3	1.1	0	-0.2	0.7
3	1999.03.08	51.94	164.65	4.85	6.9	2	6.2	5	8	1	3	-0.2	-0.7	1.1
4	2000.01.28	42.67	147.42	0.28	6.7	2	6	7	7.3	3	0.6	0.1	-0.8	0.5
5	2000.07.30	35	139.8	0.43	6.8	1	6.4	4	6	3	1.2	0.3	-0.1	-0.5
6	2000.08.04	48.75	141.94	0.42	7.2	1	6.1	6	7.3	4	0.2	0.1	-0.7	0.5
7	2000.10.06	34.51	133.34	0.59	7.0	3	6.6	6	5.9	2	1	0.2	-0.1	-0.8
8	2000.12.22	46.33	144.48	0.42	5.0*	3	5.8	4	5.4	3	2.4	-	-0.3	-0.7
9	2001.08.02	56.09	164.59	0.5	6.1	2	6.5	2	2.7	2	0.5	-0.1	0.2	-3.6
10	2001.08.13	41.14	143.24	0.35	6.1	3	6.2	6	5.9	3	0.7	-0.2	-0.2	-0.5
11	2002.01.28	49.25	156.35	0.07	5.7	3	5.4	4	6.3	3	0.5	0	-0.7	0.2
12	2002.05.08	53.72	160.74	0.55	5.3	5	5.8	7	5.9	4	0.1	-0.1	0	0.1
13	2002.06.28	45.27	132.26	0.18	6.4*	4	6.1	6	8.4	2	1.9	-	-1.2	1.1
14	2002.10.16	52.25	155.92	0.25	5.1*	3	5.4	7	5.3	3	0.9	-	-0.8	-0.9
15	2002.11.3	40.05	138.66	0.21	5.9	3	5.8	5	4.9	3	2.8	-0.2	-0.6	-1.5
16	2002.11.17	49.63	153.38	6.47	6.5*	4	7.4	6	7.9	3	5.1	-	0.1	0.6
17	2003.03.15	52.41	159.56	0.16	6.0	2	5.6	5	5.2	3	0.5	0.2	-0.4	-0.8
18	2003.03.17	51.99	176.45	0.19	6.6	2	6.4	5	6	2	1.2	-0.5	-0.6	-1
19	2003.04.24	48.1	156.43	0.39	5.6	3	5.4	6	6	3	1.2	-0.1	-0.6	0
20	2003.04.29	43.11	148.41	0.29	5.3	4	6.2	4	6.3	3	0.7	-0.7	0.3	0.4
21	2003.05.26	38.51	142.63	0.45	6.7	2	4.8	4	6.2	2	0.9	0	-2.2	-0.8
22	2003.06.16	55.63	160.67	4.85	6.2*	5	6.7	7	7.4	4	0.4	-	-0.2	0.5
23	2003.06.23	51.7	176.49	0.58	6.8	1	6.2	5	8	1	0.3	-0.2	-0.7	1.1
24	2009.09.25	44.12	140.66	6.52	8.1	1	6.5	5	8	1	3.3	-0.2	-1.8	-0.3
25	2003.09.29	42.08	145.1	0.36	6.6	2	5.8	7	4.9	2	0.6	0.3	-0.6	-1.5
26	2003.10.08	42.63	144.42	0.2	6.8	2	6	6	4.7	2	0.1	0.2	-0.6	-1.9
27	2003.12.05	55.56	164.21	0.18	6.4	4	6.3	7	6.9	4	0.9	-0.3	0.3	-0.9
28	2004.09.05	33.45	136.78	0.26	7.2	2	7.5	3	6.3	2	0.4	0	0.3	-2.1
29	2004.09.05	33.9	136.16	0.96	7.4	1	7.6	4	5.3	1	1	0	0.2	-2.1
30	2004.11.28	43.4	143.45	0.36	7.1	2	6.8	4	5.4	2	1.3	0.1	-0.2	-1.6

Окончание табл. 2														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
31	2005.06.14	50.9	179	0	6.3	4	6.7	7	8.1	1	0.4	-0.5	-0.1	1.3
32	2005.08.16	38.04	138.38	2.45	7.0	2	6.7	5	5.6	2	2.9	-0.2	-0.5	-1.6
33	2005.11.14	38.18	144.82	0.43	7.0	3	6.4	5	6.9	2	0.1	0	-0.6	-0.1
34	2006.04.20	61.01	165.57	0.23	8.0	3	7.8	5	9.1	4	0.7	0.4	0.2	1.5
35	2006.06.14	52.03	176.29	0.41	6.3	3	6.5	6	7.4	1	0.6	-0.2	0	0.9
36	2006.08.24	50.45	159.3	0.11	6.2	3	4.9	6	6.9	3	1.3	-0.3	-1.6	0.4
37	2006.11.15	46.6	153.79	0.14	8.1	2	6.8	6	9.1	2	0.4	-0.2	-1.9	-0.5
38	2009.01.15	46.65	156.2	0.39	6.9	5	7.6	6	8.7	1	0.7	-0.5	0.2	1.3
39	2009.04.07	45.49	152.46	0.33	6.4	4	6.8	6	5.8	1	1	-0.6	-0.1	-1.1

* Отмечены формально рассчитанные магнитуды $M_S(20R)$ землетрясений с глубиной более 70 км.

Таблица 3. Станции в обработке

Код	Координаты		Расположение
	Широта	Долгота	
ADK	51.882	-179.683	о. Адак
BILL	68.065	166.453	Билибино
INCN	37.478	126.624	Инхон
MA2	59.58	150.77	Магадан
MAJO	36.55	138.2	Мацупиро
MIDW	28.216	-177.37	Мидуэй
MSH	42.581	131.157	мыс Шульца (Владивосток)
PAL	59.093	159.963	Палана
PET	53.024	158.653	Петропавловск
YAK	62.031	129.681	Якутск
YSS	46.958	142.761	Южно-Сахалинск

Исходя из табл. 2, средняя ошибка определения эпицентра составляет 1.1 градуса дуги большого круга. Медианная же оценка составляет 0.9 градусов. Это приемлемая точность для данной конфигурации сети.

Среднеквадратичная ошибка оценки магнитуды $M_S(20R)$ оценивалась по очагам на глубинах до 100 км. Она составляет 0.28, если опираться на различие между среднесетевой $M_S(20R)$ и телесейсмической $M_S(20)$ по NEIC. Аналогичная оценка на основе невязок при осреднении значений $M_S(20R)$ индивидуальных дальневосточных станций составляет 0.22; это оценка внутреннего согласия оценок в пределах сети. Среднее систематическое расхождение $M_S(20R) - M_S(20)$ по NEIC невелико и составило -0.1 , то есть быстрые оценки БЛИЦ несколько легче, чем оценки NEIC. Эти результаты можно считать вполне приемлемыми.

Среднеквадратичная ошибка оценки моментной магнитуды по методу Цубои составляет 0.76. В качестве опорных значений использовались M_W Гарвардского каталога, чьи оценки основаны, согласно определению на скалярном сейсмическом моменте M_0 . Среднее систематическое расхождение $M_{WP} - M_W(\text{CMT})$ составило -0.47 , то есть быстрая оценка моментной магнитуды данной сетью существенно занижена. При этом известно, что магнитуда Цубои чувствительна к расположению станций относительно источника. При большем количестве станций есть вероятность улучшения оценки. К сожалению, случаи аномально больших отскоков (больше единицы) наблюдаются достаточно часто: в пяти случаях из 39.

Среднеквадратичная ошибка оценки моментной магнитуды по пиковым горизонтальным ускорениям составляет 1.13. Как опорное использовали M_W Гарвардского каталога. Среднее систематическое расхождение $M_{War} - M_W(\text{CMT})$ составило -0.26 . Продемонстрированный разброс оценок, конечно же, не позволяет в настоящий момент использовать именно эту магнитуду в повседневной практике, даже несмотря на некоторое уменьшение средней ошибки с ростом числа станций, вовлеченных в оценку.

Суммарно, качество оценки параметров землетрясений с $M_W > 5.8$ в зоне ответственности на настоящий момент можно оценить из табл. 4, содержащей средние ошибки определения основных параметров очагов. Во-первых, можно констатировать однозначно отличное качество оценок магнитуды $M_S(20R)$. 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 на 2010 г. более плотной сети будет выглядеть значительно лучше.

Таблица 4. Качество оценки параметров очагов землетрясений по результатам обработки архивных записей землетрясений

Параметр	Ошибка определения по сети
Координаты эпицентра (δ, λ)	$d\Delta = 1.1^\circ$ $x_{0.5} = 0.9^\circ$
Магнитуда по поверхностным волнам M_S ($M_S(20R)$)	$\sigma = 0.28$ $dM_S = -0.1$
Моментная магнитуда Цубои M_{WP}	$\sigma = 0.76$ $dM_{WP} = -0.47$
Моментная магнитуда по пиковым горизонтальным ускорениям M_{War}	$\sigma = 1.13$ $dM_{War} = -0.26$

С сентября 2009 г. 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, по состоянию июль 2010 г., ПК БЛИЦ продемонстрировал неплохие результаты, в том числе успешно обработав два землетрясения с магнитудой выше порога обязательной обработки.

Первое из них произошло несколько южнее Японских островов 5.09.2009 г. (по сути, на периферии зоны ответственности: $\varphi = 28.16^\circ$ с.ш., $\lambda = 128.3^\circ$ в.д.), и его магнитуда $M_S(20R)$ по быстрой оценке БЛИЦ составила 5.6. Моментная магнитуда этого события по данным Гарвардского каталога составила $M_W = 5.8$, магнитуда по поверхностным волнам по NEIC: $M_S(20) = 5.8$. Разница в оценке координат эпицентра, по сравнению с NEIC, составила чуть менее 0.5 градуса дуги большого круга.

Второе событие произошло 30.07.2010 г. на траверзе Авачинского залива, то есть непосредственно вблизи одного из крупнейших населенных пунктов на побережье Дальнего Востока России: Петропавловска-Камчатского (~120 км). Разумеется, что работа системы в таких случаях вызывает повышенный интерес. Согласно быстрой оценке БЛИЦ, координаты эпицентра оказались равны $\varphi = 52.3^\circ$ с.ш., $\lambda = 160.13^\circ$ в.д., магнитуда по поверхностным волнам $M_S(20R) = 6.5$, а магнитуда Цубои $M_{WP} = 6.6$. Сотрясения ощущались в г. Петропавловске-Камчатском с интенсивностью $I_{MSK64} \approx 4$ балла, инструментально оцененная интенсивность сотрясений по шкале Японского метеорологического агентства $I_{JMA} = 1.76$. В быстрой оценке эпицентра участвовало 5 станций, магнитуда $M_S(20R)$ была оценена по трем из них (к тому моменту остальные станции еще не зарегистрировали максимум поверхностных волн). Оценка магнитуды M_S по данным СМТ составила 6.2, оценка $M_W = 6.3$. Разница в оценке координат, по сравнению с NEIC составила около 0.2 градусов 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, можно считать приемлемыми. 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.

Следует особо подчеркнуть, что на настоящий момент удалось добиться устойчивой работы технической части системы. В частности, система управления данными работает полностью без перебоев. Обеспечение системной устойчивости БЛИЦ потребовало немалых усилий, но такая устойчивость в практически работающей "365/24" системе имеет принципиальное значение, хотя и мало интересна с научной стороны.

Система алгоритмов, используемая в БЛИЦ в настоящее время, обеспечивает приемлемую точность оценки важнейших параметров потенциально цунамигенного землетрясения. Так, можно ожидать ошибку определения эпицентра землетрясения не более одного градуса, а ошибку основной магнитуды M_S – не более 0.2 единицы магнитуды.

Дальнейшее развитие системы будет идти по пути наращивания точности и надежности ключевых оценок, расширения номенклатуры магнитуд и прочих параметров движения грунта в точках наблюдения, а также добавление режима автоматического формирования тревоги цунами с порогом магнитуды, зависящем от эпицентра и глубины.

Литература

- Гусев А.А., Чубарова О.С., Викулина С.А.* Региональная магнитудная шкала по поверхностным волнам M_S (20-reg) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Вторая региональная научно-техническая конференция. Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г.: Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2009. С.167.
- Никифоров И.В., Тихонов И.Н., Михайлова Т.Г.* Оперативная обработка данных автоматизированной сейсмической станции. Теория и практика. Владивосток: ДВО РАН СССР, 1989. 175 с.
- Соловьев С.Л.* Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // Волны цунами: Труды СахКНИИ. Южно-Сахалинск, 1972. Вып. 29. С.7–47.
- Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н.* Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.
- Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К., Мишаткин В.Н., Поплавский А.А.* Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Сейсм. приборы. 2009. Т. 45, № 4. С.41–57.
- Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А* Двадцатисекундная региональная магнитуда $M_S(20R)$ для Дальнего Востока России // Сейсм. приборы. 2010. В печати.
- IASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP) / Ed. P. Bormann.* Potsdam: GeoForschungsZentrum, 2002.
- Japan Meteorological Agency, 1996. Note on the JMA seismic intensity, Gyosei, (in Japanese).
- Kanamori H.* The Energy Release in Great Earthquakes // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P.2981–2987.
- Kanno T., Narita A., Morikawa N., Fujiwara H., Fukushima Y.* A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2006. V. 96, N 3. P.879–897.
- Kuwata Y., Takada Sh.* Instantaneous Instrumental Seismic Intensity and Evacuation // J. Natural Disaster Science. 2002. V. 24, N 1. P.35–42.
- Shabestari K.T., Yanazaki F.* A Proposal of Instrumental Seismic Intensity Scale Compatible with MMI Evaluated from Three-Component Acceleration Records // Earthquake Spectra. 2001. V. 17, N 4. P.711–723.
- Stein S., Wysession M.* An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Blackwell Publishing, 2003. 498 p.
- Talandier J., Okal E.A.* An Algorithm for Automated Tsunami Warning in French Polynesia Based on Mantle Magnitudes // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1989. V. 79, N 4. P.1177–1193.
- Tsuboi S., Abe K., Takano K., Yamanaka Y.* Rapid Determination of M_W from Broadband P Waveforms // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1995. V. 85, N 2. P.606–613.

Сведения об авторах

ГУСЕВ Александр Александрович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; главный научный сотрудник, Камчатский филиал Геофизической службы РАН, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, д. 9. Тел.: (415)243-18-57. E-mail: gusev@emsd.ru

ЧЕБРОВ Данила Викторович – кандидат физико-математических наук, и.о. заведующего лабораторией, Камчатский филиал Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН), 683006, Петропавловск-Камчатский, б-р Пийпа, д. 9. Тел.: 8(415-2)43-18-06. E-mail: danila@emsd.ru

Automatic real-time estimation of tsunamigenic earthquakes parameters in Far East Russia: algorithms and software

D.V. Chebrov¹, A.A. Gusev^{2,1}

¹ Kamchatka Branch of the Geophysical Survey RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

² Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Abstract. Algorithms and software for real-time automatic determination of epicenters and magnitudes of potentially tsunamigenic earthquakes are described. All procedures and specific tools were brought together in the program package called “Fast Tsunami Source Localization” (FTSL; Russian abbreviation BLITZ). FTSL was successfully tested with tens of real digital records of earthquakes. At present, FTSL operates tentatively in real time as a component of the first stage of the Seismic Subsystem of the Russian Far East Tsunami Warning System.

Keywords: tsunami, earthquake, tsunami warning system.