

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Чебров Д.В.¹, Гусев А.А.²

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

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

Введение

Одной из основных тенденций в науках о Земле в настоящее время стало расширение масштабов наблюдений за геофизическими полями. Более полные и точные данные позволяют вести исследования на новом качественном уровне. В то же время, резко возросшее количество данных требует новых подходов к методам их обработки и интерпретации. Современные технологии позволяют возложить существенную часть этих задач автоматические и автоматизированные системы. [2]

Новая Система предупреждения о цунами (СПЦ) на Дальнем Востоке России спроектирована с учетом современных технических возможностей. Коренное отличие от действовавшей до недавнего времени СПЦ-1958 заключается в получении параметров цунамигенного землетрясения по записям сети сейсмических станций. Созданные автоматизированные средства [1] позволяют дежурным операторам вести обработку огромного массива информации действующую в режиме жесткого временного лимита. Так, по нормам предполагаемого регламента, события, произошедшие в так называемой «ближней зоне» ответственности (200–250 км от специализированных станций СПЦ) должны быть обработаны не позднее чем за семь минут с начала регистрации землетрясения сетью специализированных сейсмических станций. Как показывает практика опытной и регулярной эксплуатации Сейсмической подсистемы (СП) СПЦ [4], в абсолютном большинстве случаев операторы успевают справиться с обработкой в указанный срок.

Не смотря на то, что оператор остается ключевым звеном в СП СПЦ, важнейшей ее компонентой является также и система автоматической оценки параметров очагов землетрясений. В качестве таковой используется программный комплекс БЛИЦ (Быстрая Локализация Источника Цунами), специально разработанный в КФ ГС РАН для нужд СП СПЦ. В настоящее время он несет, в основном, информационную функцию, предоставляя оператору детали и общую картину хода автоматической оценки в реальном времени. Произведенные оценки БЛИЦ отсылает на сервер КФ ГС РАН, и они наряду с оценками оператора публикуются в базе данных. В будущем, предполагается поднять важность автоматических оценок, поэтому их точности уделяется повышенное внимание.

Условия эксплуатации БЛИЦ и полученные данные

До запуска СП СПЦ в эксплуатацию, БЛИЦ не имел возможности набрать внушительную статистику по реальным событиям – время непрерывной работы программного комплекса было не слишком велико из-за частых остановок на технические работы. Алгоритмы проходили обучение на записях архивных землетрясений. По результатам обработки сильных землетрясений дальневосточного региона последних лет оказалось, что БЛИЦ удовлетворяет условиям технического задания, справляясь с обработкой землетрясений со средней невязкой определения координат (по отношению к данным независимых сейсмических агентств) менее 100 километров.

С осени 2010 года БЛИЦ начал непрерывную работу в режиме постоянной эксплуатации на РИОЦ. С этого момента, на сервер КФ ГС РАН было отправлено 56 сообщений о достаточно сильных землетрясениях. Отметим, что такой высокий уровень сейсмичности связан с Большим землетрясением в Тохоку в марте 2011 года и с его афтершоковым процессом.

Для того чтобы сведения об обработанном землетрясении были опубликованы, должны быть выполнены два условия: магнитуда события $M_S(20R)$ [6] должна быть более 5.5, событие должно было регистрироваться более чем на одной станции. Заметим, что условие двух и более станций не гарантирует достаточной точности оценок: при обработке по трем и менее станциям используется только информация об азимутах на событие. Как уже было показано [5], оценки

азимутов на событие не отличаются точностью, а кроме того, имеются систематические отклонения для некоторых взаимных положений очага-приемника в условиях Камчатки. Поэтому, при оценке качества работы БЛИЦ, такие события из рассмотрения исключались. Кроме того, исключены все события, произошедшие вне зоны ответственности СПЦ. Исключение сделано для землетрясений, относящихся к очаговой зоне Большого землетрясения в Тохоку в марте 2011 года, поскольку этот регион вплотную примыкает к границам предполагаемой зоны ответственности СПЦ. Заметим, что сейсмичность очаговой зоны Тохоку позволила набрать неплохую статистику всего за один год.

Результаты работы БЛИЦ

Обсуждая в данной работе результаты работы системы автоматического определения параметров очагов, следует коснуться нескольких вопросов, которые определяют пригодность системы для эксплуатации.

К важнейшим характеристикам систем такого рода относится их техническая надежность. К моменту запуска Регионального Информационно-Обрабатывающего Центра (РИОЦ) «Петропавловск», удалось обеспечить надежность БЛИЦ, достаточную для функционирования в круглосуточном непрерывном режиме. Система показала свою способность непрерывно работать месяцами, с нечастыми принудительными остановками на техническое обслуживание (например, добавление новых станций, перенастройка параметров).

Поскольку система предназначена для быстрых оценок параметров, то первостепенную важность имеет время реакции системы. Норматив на время реакции системы t_r устанавливается регламентами СПЦ. В данном случае, под t_r понимается время, затраченное системой на производство и публикацию оценки параметров очага землетрясения с момента начала регистрации на одной из сейсмических станций из сети специализированных станций СП СПЦ. В случае БЛИЦ установлен принудительный лимит времени: программа должна отправить результат обработки не позднее, чем через 5 минут 30 секунд после начала регистрации землетрясения. Как показала практика, этого времени достаточно, чтобы оценить параметры достаточно сильного землетрясения в условиях Дальнего Востока. При этом, даже учитывая дополнительные временные затраты, не зависящие от алгоритмов и архитектуры БЛИЦ, публикация решения в базе КФ ГС РАН происходит менее чем за 7 минут с начала регистрации землетрясения. Именно таким предполагается норматив на выдачу сообщения о землетрясении в 200-км зоне в новом регламенте СП СПЦ по версии ГС РАН. Этими соображениями и определяется такое жесткое ограничение. Тем не менее, БЛИЦ продолжает работу и после отправки быстрого сообщения и, после окончания землетрясения, формирует окончательную оценку. Добавим, что окончательные оценки БЛИЦ не являются предметом данной работы.

Не меньшую важность имеют также точность оценок, производимых системой. Особый интерес представляет точность оценки координат $d(\lambda, \varphi)$. Под точностью оценок координат землетрясений здесь мы будем понимать невязки оценок БЛИЦ относительно неких «истинных» координат. Это понятие достаточно условно, поскольку результат расчета сильно зависит от множества факторов, таких как конфигурация сейсмической сети и модель среды. Тем не менее, оценки, произведенные независимыми крупными сейсмическими агентствами можно считать близким к истинным. В качестве таких опорных данных выбран каталог агентства NEIC.

Для анализа из всех сообщений, опубликованных на сервере КФ ГС РАН, было отобрано 38, которые удовлетворяли условиям, описанным в предыдущем пункте. Для всего этого набора данных (без двух крайних точек) средняя ошибка определения координат составила $d(\lambda, \varphi) = 1.46$ градуса дуги большого круга, медианное значение оказалось равным $d(\lambda, \varphi)_x^{0.5} = 0.8713$.

Отметим, что в полном наборе данных оказалось достаточно много событий, обработанных с большой ошибкой координат эпицентра. Заметим, что большинство этих сообщений имеют внутреннюю ошибку метода, превышающую невязку координат. Поскольку оператор может наблюдать эти данные на информационных панелях, то он не может быть введен в заблуждение работой БЛИЦ в этих случаях. Так как в настоящее время функция БЛИЦ в основном сводится к информационной поддержке оператора, эти ситуации можно трактовать как выброс «белого флага» системой. То есть, программа информирует пользователя о том, что она не в состоянии оценить координаты с приемлемой точностью. Формально эти решения являются неудачными, но по существу, это «пропуск цели». Если исключить такие события из рассмотрения, то средняя ошибка определения координат окажется равной $d(\lambda, \varphi) = 1.03$, а

медиана $d(\lambda, \varphi)_x^{0.5} = 0.8$. При этом, более 80 процентов событий было обработано с точностью лучшей, чем 1.3 градуса дуги большого круга.

Заметим, что эти результаты близки к тем, которые были показаны при обработке архивных данных [5].

Заключение

Система БЛИЦ, введенная в эксплуатацию в составе СП СПЦ показала хорошую техническую надежность, что было достигнуто удачным решением архитектуры приложения и выбранными устойчивыми и робастными алгоритмами. Продемонстрирована принципиальная возможность многомесячного непрерывного функционирования, не требующего дополнительного обслуживания.

Кроме того, БЛИЦ достойно справляется с быстрыми оценками параметров землетрясения в реальном времени. Качество оценок оказалось близко к ожидаемому, которое оценивалось по результатам обработки архивных записей.

Эксплуатация системы в реальных условиях позволила получить неоценимый опыт, который поможет существенно улучшить обсуждаемый программный комплекс. Это касается как деталей функционирования отдельных алгоритмов в штатном режиме, так и обработки исключительных случаев, моделирование которых оказывается очень сложным. Речь идет о таких явлениях, как маскирование землетрясения другим, более слабым, параллельная обработка нескольких событий, борьба с аппаратными помехами и ложными сигналами.

Пожалуй, наиболее полезным для дальнейшего развития системы оказался опыт обработки сильнейшего землетрясения в Тохоку и его афтершоковой последовательности. Заметим, что несмотря на сравнительно неблагоприятные условия (плохой охват очаговой зоны сейсмической сетью), БЛИЦ успешно обработал как основной толчок, так и его сильнейшие афтершоки. Так, например, невязка определения координат Большого землетрясения в Тохоку составила чуть больше градуса дуги большого круга, а оценка магнитуды оказалась лишь слегка заниженной. Это произошло вследствие превышения динамического диапазона в группе поверхностных волн на ближайших к очаговой зоне специализированных станциях СП СПЦ. Тем не менее, из всех быстрых оперативных энергетических оценок этого землетрясения, оценка БЛИЦ (наряду с оценками, полученными в автоматизированном режиме операторами СПЦ на Дальнем Востоке России) оказалась наиболее близка к реальности.

Список литературы

1. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS. // Сейсмические приборы. 2010. Т.46. №3. С. 22–34.
2. Чебров В.Н. Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. // Вестник КРАУНЦ, Серия Науки о Земле. 2007. №1. Вып. №9. С. 27–36.
3. Чебров В.Н., Гусев А.А., В.К. Гусяков В.К., Мишаткин В.Н., Поплавский А.А. Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. // Сейсмические приборы. 2009. Т.45. № 4. С. 41–57.
4. Чебров В.Н., Левин Ю.Н., Чебров Д.В., Ототюк Д.А., Викулина С.А. Работа сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами нового поколения по землетрясению в Японии 11 марта 2011 г., $M_w = 9.1$ // Наука и технологические разработки. 2011. Т. 90. №1. С. 13–26.
5. Чебров Д.В., Гусев А.А. Автоматическое определение параметров цунамигенных землетрясений на Дальнем Востоке России в режиме реального времени: алгоритмы и программное обеспечение. // Сейсмические приборы. 2010. Т.46. № 4. С. 35–57.
6. Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двадцатисекундная региональная магнитуда $M_s(20R)$ для Дальнего Востока России // Сейсмические приборы. 2010. Т.46. N3. С. 58–63.