

РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РОССИИ

Чебров В.Н.¹, Гусев А.А.^{1,2}, Гусяков В.К.³, Чебров Д.В.¹, Абубакиров И.Р.¹, Павлов В.М.¹

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

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

³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Введение

Цунами, – опасные природные явления, которые могут вести к массовой гибели людей, разрушению населенных пунктов, уничтожению экономического потенциала. Наиболее опасны цунами, которые вызываются сильными землетрясениями с очагами в непосредственной близости от морских побережий, когда время добегания разрушительных волн составляет первые десятки минут. Своевременное предупреждение о цунами в таких случаях возможно только по сейсмологическим данным, т.е на основе быстрой оценки параметров очага этого сильного землетрясения. В 2006–2010 гг. Геофизической службой РАН в рамках ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.» была разработана и создана система сейсмологических наблюдений для СПЦ нового поколения – сейсмическая подсистема СПЦ (СП СПЦ). Сейсмическая подсистема для СПЦ нового поколения, оснащенная современными техническими средствами, методами и алгоритмами быстрой оценки признаков цунамигенности землетрясений, спутниковыми информационными технологиями, обеспечивает снижение числа ложных тревог цунами, а также уменьшение времени задержки на оповещение населения о возможности цунами по сейсмологическим данным.

Однако, несмотря на достигнутый высокий уровень автоматизации, используемые методические основы выработки прогноза цунами остаются теми же, что и пятьдесят лет назад, т.е. опасность цунами прогнозируется фактически по единственному критерию – величине магнитуды землетрясения. При таком подходе оправдываемость тревог цунами составляет около 30 %. Это подтверждается итогами работы СПЦ на Дальнем Востоке России, а также на Аляске, Японии и других региональных служб предупреждения.

Целью работы является развитие информационного и научно-методического обеспечения сейсмической составляющей функциональной подсистемы предупреждения о цунами единой системы в Дальневосточном регионе, для повышения надежности и сокращения времени формирования сообщений об угрозе цунами, повышения достоверности принимаемых решений, снижения числа ложных тревог, снижения сейсмических рисков.

Основные результаты работ 2011–2013 гг.

Проанализирован опыт функционирования СПЦ с момента ее создания, оценена реальная эффективность магнитудно-географического критерия цунамигенности, которая оказалась близка к расчетной [2].

Проведен анализ СП СПЦ нового поколения в части оснащения методами и алгоритмами обработки сейсмологических данных, анализа результатов обработки, включая:

- методы и алгоритмы автоматического обнаружения и выделения сейсмических волн от сильных ($M > 6.0$) землетрясений по трехкомпонентной записи, а также оценки направлений прихода волн;
- методы и алгоритмы обнаружения и оценки моментов первых вступлений сейсмических волн, оценки азимута на эпицентр сильных ($M > 6.0$) землетрясений в автоматическом режиме по широкополосной трехкомпонентной записи;
- методы и алгоритмы определения гипоцентра и магнитуды по данным сейсмической станции, группы станций;
- методы и алгоритмы оценки положения эпицентра по первым участкам записей землетрясений и данных об исторической сейсмичности;
- алгоритм объявления тревоги цунами для пункта или участка побережья по наблюдаемой величине макросейсмической интенсивности ($I_{\text{пор}}$) [4, 7];

- новую версию региональной магнитуды по поверхностным волнам $M_S(20R)$ для работы в автоматическом и автоматизированном режиме;
- алгоритм расчета тензора сейсмического момента для протяженного очага сильного землетрясения по широкополосным записям нескольких сейсмических станций на удалении до 3000 км от эпицентра [3].

Рассмотрены направления дальнейшего развития информационного и научно-методического обеспечения СП СПЦ на Дальнем Востоке России. Предложены методы, повышающие точность оценок параметров землетрясений и их устойчивость, что, в свою очередь позволит делать более надежные оценки цунамигенности землетрясений и повысить общую надежность системы.

Отдельно рассмотрены методы, которые позволят сократить время выпуска тревоги, а также вопросы разработки и внедрения принципиально новых методов оценки цунамигенности землетрясения и его параметров по неполным данным до завершения основных расчетов гипоцентра и магнитуды землетрясения. Кроме того, проведен анализ специфических параметров записей сейсмических сигналов землетрясений, которые могут иметь связь с особенностями очагового процесса и с его цунамигенным потенциалом.

Предложены способы модернизации магнитудно-географического критерия, что позволит поднять эффективность СПЦ и снизить количество ложных тревог. Это введение нескольких уровней тревоги по энергии землетрясения и разработка методов пространственно-дифференцированной тревоги цунами.

Рассмотрены возможности использования нетрадиционных подходов к определению цунамигенного потенциала землетрясения, заключающиеся в поиске и изучении откликов очаговых процессов землетрясений и процессов генерации цунами в различных геофизических полях, таких как поле деформаций Земли, ионосферные явления, гидроакустическое поле и др.

Рассмотрены и предложены возможные способы увеличения эффективности службы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. Получены следующие выводы:

Главный резерв дальнейшего совершенствования службы кроется в снижении числа ложных тревог (при сохранении на разумно низком уровне риска пропуска сильного цунами). Успех здесь может быть достигнут только на основе привлечения дополнительных критериев и признаков цунамигенности, т.е. развития информационного и научно-методического обеспечения СП СПЦ, а также использования прямой регистрации цунами в открытом океане (в первую очередь, на подходе к наиболее важным защищаемым пунктам). Одним из таких дополнительных критериев является глубина очага.

Существенное улучшение эффективности работы службы может быть достигнуто за счет более точного определения границ зон для объявления тревоги. Положение и протяженность таких зон вдоль побережья должны быть пересмотрены (в большинстве случаев в сторону сокращения). Такой пересмотр должен быть сделан на основе анализа фактических наблюдений высот цунами и численного моделирования распространения цунами внутри каждой из зон при различных положениях и размерах очагов.

Рассмотрены основные направления развития информационного и научно-методического обеспечения СП СПЦ в Дальневосточном регионе, в том числе:

- методы повышения надежности оценок параметров землетрясений, которые могут дополнять используемые в настоящее время в СП СПЦ подходы, включая принципиально новые методы оценки, которые раньше не использовались в мировой практике СПЦ, или использовались ограниченно.
- методы, направленные на уменьшение времени реакции СП СПЦ, основанные на способах обработки сейсмических сигналов по неполным данным, до завершения очагового процесса;
- целесообразность и необходимость привлечения, развития и отработки нетрадиционных методов оценки цунамигенного потенциала события, такие как данные GPS-наблюдений и изучение откликов на землетрясения в различных геофизических полях;
- развитие информационного обеспечения исследований и работы СП СПЦ в оперативном режиме на основе единой базы данных с элементами экспертной системы.

Разработаны предложения по пересмотру регламентов работы СП СПЦ. Основные предлагаемые изменения сводятся к следующим [6]:

- установление единой зоны ответственности для всех РИОЦ ГС РАН;
- введение нескольких уровней тревоги, в зависимости от магнитуды землетрясения;
- введение возможности локализовать выпущенную тревогу.

Выполнен анализ точности энергетических оценок ИОЦ «Петропавловск» по результатам оценки магнитуды $M_S(20R)$ [9] в сравнении с магнитудой M_S , оцененной также в NEIC. Можно заключить, что оценки $M_S(20R)$ в среднем несколько легче, чем оценки M_S . Средняя ошибка оценки $M_S(20R)$, без учета систематической ошибки, составляет менее 0.2 единицы магнитуды [8].

Выполнено сравнение теоретического расчета времени реакции СП СПЦ на сильное землетрясение с результатами реального опыта обработки землетрясений в оперативном режиме в РИОЦ «Петропавловск». Показано, что в 200-км зоне от специализированных сейсмических станций, оператор в большинстве случаев укладывается в 7 минут с момента начала регистрации события сетью. Для землетрясений Дальневосточного региона время реакции оказывается менее 20 минут.

Проведена ревизия магнитудной поправки для оценок M_S на станции РЕТ. Установлено, что данная величина заметно менялась со временем, начиная с 1957 года. Большой скачок произошел в 2001 году в связи с переходом на цифровую обработку данных. Данное явление, скорее всего, связано с формализацией процедур обработки, более эффективными автоматическими и полуавтоматическими замерами, а также полным переходом на прибор СКД (режим эмуляции). Поскольку dM после 2001 года не показывает резких изменений, можно рекомендовать рассмотреть возможность изменения поправки для оценок магнитуд, полученных на станции «Петропавловск» с -0.5 на -0.3 [8].

На основе данных о землетрясениях вызвавших цунами до 2010 года предложена верхняя оценка порога по глубине для объявления тревоги цунами. Эта величина оказалась равной $H_{th} = 120$ км. Ее использование в рамках СП СПЦ повысит эффективность Службы за счет уменьшения количества ложных тревог от глубоких землетрясений. При этом, даже с учетом достаточно больших ошибок в оценке глубин, вероятность пропуска опасного события остается чрезвычайно низкой.

Разработан метод получения надежных оценок магнитуды M_{WP} для умеренных и сильных дальневосточных землетрясений с глубиной гипоцентра до 300 км по широкополосным сейсмограммам не более чем 5 станций в диапазоне эпицентральных расстояний от 6 до 22 градусов [1].

Разработан системный проект развития сейсмической составляющей функциональной подсистемы предупреждения о цунами единой системы в Дальневосточном регионе.

Опыт эксплуатации сейсмической подсистемы, созданной в рамках ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в РФ до 2010 года», показал, что разработанная структура сети сейсмологических наблюдений [5] удовлетворяет поставленным задачам и может использоваться при дальнейшем развитии СП СПЦ. Основные характеристики СП СПЦ на ДВ РФ по результатам эксплуатации в 2010–2013 гг. рассмотрены выше.

Основные характеристики системы определяются количеством станций, геометрической конфигурацией сети, грунтовыми условиями мест размещения отдельных станций и способом установки датчиков, частотными характеристиками сейсмометрических каналов, их динамическим диапазоном, коэффициентом преобразования, уровнем и спектром сейсмических и аппаратурных шумов. Выполненные расчеты по точности оценок координат и глубины землетрясений в зависимости от конфигурации сети сейсмических станций, по оценке времени реакции и результаты эксплуатации СП СПЦ в 2010–2013 гг. позволяют сделать следующие выводы:

- сеть специализированных сейсмических станций обеспечивает удовлетворительные точности оценок параметров землетрясений в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне и не удовлетворительные по районам Японского и Охотского морей;
- необходимо развитие сетей сейсмических станций на Курильских островах и в материковой части Приморского и Хабаровского краев.

Проект сети сейсмологических наблюдений для СПЦ, обеспечивающей повышение точности оценок параметров землетрясений и снижение времени реакции сейсмической подсистемы на сильные землетрясения, показан на рис. 1.



Рис. 1 Карта (проект) с сетью специализированных сейсмологических и GPS наблюдений для СПЦ Дальнего Востока России к 2015г. Специализированные сейсмические станции, созданные в 2006–2010: 1. ВЦС; 2. ОЦС; 3. ПР СД. Новые станции: 4. ВЦС; 5. ОЦС; 6. ПРСД; 7. другие станции

Для реализации проекта необходимо обеспечить техническое и технологическое оснащение 3-х новых опорных сейсмических станций (ОЦС) и 9 вспомогательных станций (ВЦС), локальных сетей, автоматических телеметрических пунктов, расширение возможностей аппаратно-программных средств информационно-обрабатывающих сейсмологических центров (ИОЦ). Для снижения времени реакции сейсмической подсистемы СПЦ на сильные землетрясения, включая время оценки параметров землетрясений и время на принятие решения о возможности цунами, необходимо как можно раньше начинать регистрацию землетрясения. Это возможно только при приближении пунктов регистрации землетрясений к районам, где могут быть потенциальные очаги, т.е. при увеличении числа пунктов сейсмических наблюдений. Для решения этой задачи в сети создаются дополнительные станции, оснащаемые приборами регистрации сильных движений – акселерометрами. Основное назначение состоит в регистрации сильных и сильнейших землетрясений без искажений, включая ближнюю зону и сам очаг землетрясения.

Территориально распределенные сети акселерометров широко используются в японской системе предупреждения о цунами. Только в специализированной сети JMA таких приборов около 700. Всего же для ускорения оценки параметров землетрясения и выдачи сигналов опасности цунами в японской системе используется более 3000 акселерометров.

Создание территориально распределенной сети акселерометров на территории Камчатского, Хабаровского и Приморского краев, Сахалинской и Магаданской областей позволит:

- снизить время реакции системы за счет более быстрого обнаружения факта происходящего землетрясения, чем это возможно в рамках сегодняшней сейсмической подсистемы СПЦ на ДВ РФ;

- повысить надежность и точность оценок параметров землетрясения (в частности по глубине очага) за счет вовлечения в процесс оценки большего числа станций (пунктов наблюдений).

Для отладки и внедрения новых алгоритмов оценки цунамигенного потенциала землетрясений по данным GPS наблюдений предлагается все сейсмические станции СП СПЦ оснастить дополнительно оборудованием GPS-ГЛОНАСС. Преимущество GPS-ГЛОНАСС измерений по отношению к сети сеймостанций: принципиальная возможность регистрировать сигналы без искажений в неограниченном снизу частотным диапазоном и без ограничений на максимальные движения пунктов при сильном землетрясении в ближней зоне (на расстоянии $r = 200\text{--}400$ км), когда сейсмические записи клиппированы и используются только вступления P -волн. В этой ситуации имеется возможность снятия вступлений S -волн с GPS записей. GPS записи также позволяют определить косейсмические скачки, по которым при известном гипоцентре может быть рассчитана моментная магнитуда и механизм землетрясения.

Заключение.

Внедрение результатов НИР в Геофизической службе РАН и в автоматизированной информационно-управляющей системе ФП РСЧС-ЦУНАМИ в рамках единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций обеспечит: сокращение времени формирования сообщений об угрозе цунами; снижение числа ложных тревог цунами для защищаемых населенных пунктов.

Список литературы

1. Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Федосеева Е.Н. Оперативная оценка магнитуды M_{WP} умеренных и сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам // IV научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». г. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября — 5 октября 2013 г.
2. Гусяков В.К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958–2009 гг. // Сейсмические приборы, Том 46, № 3, 2010. С. 5–21.
3. Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. С. 149–158.
4. Петухин А.Г., Гусев А.А., Чебров В.Н. Корреляционные зависимости между высотой цунами и параметрами сильных движений грунта по данным землетрясений Японии. // IV научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». г. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября — 5 октября 2013 г.
5. 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.
6. Чебров В.Н. О новых регламентах работы системы сейсмологических наблюдений в СПЦ // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды III региональной научно-технической конференции 9–15 октября 2011 г. – Петропавловск-Камчатский, 2011. С. 463–467
7. Чебров В.Н., Гусев А.А., Чебров Д.В. Методика, алгоритмы и программное обеспечение для подачи немедленной тревоги цунами до завершения расчетов магнитуды и эпицентра землетрясения // Труды III Научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2011. С. 468–471.
8. Чебров Д.В., Чебров В.Н., Викулина С.А., Ототюк Д.А. Опыт оценки магнитуд сильных землетрясений в РИОЦ «Петропавловск» в рамках службы цунами // IV научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». г. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября — 5 октября 2013 г.
9. Чубарова О.С., Гусев А.А., Викулина С.А. Двадцатисекундная региональная магнитуда $M_S(20R)$ для Дальнего Востока России. // Сейсмические приборы. 2010. Т.46. № 3. С. 58–63.