

УДК 550.34

## **РЕГИОНАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАБАТЫВАЮЩИЙ ЦЕНТР «ПЕТРОПАВЛОВСК» В СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РОССИИ**

**Чебров Д.В.**

*Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский,  
Россия, danila@emsd.ru*

### **Введение**

Действующая в настоящее время сейсмическая подсистема системы предупреждения о цунами (СП СПЦ) была запущена в эксплуатацию в 2010 г. Работы по разработке новой СП СПЦ проводились Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН, в настоящее время – КФ ФИЦ ЕГС РАН) в 2006–2010 гг. [1] в рамках Государственных контрактов на выполнение НИОКР «Развитие сети сейсмологических наблюдений и средств обработки и передачи данных в целях предупреждения о цунами», которые, в свою очередь, относились к мероприятию 18 Федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.» Руководителем этих работ был Виктор Николаевич Чебров, который долгие годы возглавлял КФ ГС РАН. В масштабных работах принимали участие специалисты ведущих институтов РАН (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Институт физики Земли РАН, Институт океанологии РАН, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН). В качестве государственного заказчика выступил Росгидромет, который кроме этого выступил организатором работ по модернизации СПЦ в целом. Организационная схема СПЦ не претерпела изменений, общее руководство функциональной подсистемой предупреждения о цунами единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ФП РСЧС-ЦУНАМИ) осуществляет Росгидромет. Подразделения ФИЦ ЕГС РАН – региональные информационно-обрабатывающие центры (РИОЦ) в составе соответствующих филиалов исполняют обязанности по ведению сейсмических наблюдений в целях СПЦ и имеют подчиненное положение в данной системе.

Новая СПЦ пришла на смену старой системе, которая начала разрабатываться после разрушительного цунами 4 ноября 1952 г. на Камчатке и Курильских островах. СПЦ-1958 по своим техническим решениям полностью соответствовала возможностям того времени. Основой СПЦ тогда был сейсмический метод, опирающийся на магнитудно-географический критерий.

Как известно, более чем в 85% случаев волны цунами вызываются подводными землетрясениями. Поэтому предполагается, что достаточно сильное землетрясение, произошедшее под морским дном должно вызвать цунами. Это соображение и составляет сущность магнитудно-географического критерия, который используется в работе СПЦ и по сей день [2; 3, 4]. Стоит заметить, что связь между магнитудой события и цунамигенностью события вероятностная, а при построении порога цунамигенности в СССР исходили из принципа минимизации пропуска цели [5]. Это привело к тому, что установленный магнитудный порог  $M_5 = 7.0$  приводил к большому количеству ложных тревог. [3; 5; 6] Этот подход сохраняется и в настоящее время. [4]

В данной работе мы детально рассмотрим основные характеристики системы: точность производства оценок параметров землетрясений, и время реакции на примере Камчатской сейсмоактивной зоны и по материалам Регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Петропавловск», КФ ФИЦ ЕГС РАН.

### **Качество оценок координат в СП СПЦ**

Качество оценки координат землетрясения определяется точностью этой оценки, то есть невязкой  $d(\lambda, \varphi)$  от неких «истинных» координат. В данной работе мы будем оперировать набором соответствующих квантилей: 25-, 75-, 90- и 95-процентными. В качестве эффективной средней оценки будем использовать медиану распределения, в качестве оценки стандартного отклонения в этом случае используется межквартильный интервал  $X_{75} - X_{25}$ .

Что касается «истинных» координат, то целесообразно использовать результаты отложенной обработки по камчатским данным. КФ ФИЦ ЕГС РАН в повседневной деятельности использует все возможности Камчатской системы наблюдения, кроме того, в случае необходимости привлекаются данные зарубежных станций, и станций других регионов. Таким образом, в случае сильных землетрясений ситуация с региональной оценкой не хуже, чем с глобальной, в случае же умеренных и слабых событий, оценкам КФ ФИЦ ЕГС РАН следует отдавать предпочтение.

Табл. 1. Параметры распределения невязок (в градусах дуги большого круга) между оперативными и отложенными оценками положения эпицентров землетрясений в разные периоды времени

| Период    | $[X_{75} - X_{25}]$ | $M_e$ | $X_{90}$ | $X_{95}$ | Объем выборки, шт. |
|-----------|---------------------|-------|----------|----------|--------------------|
| 2010–2018 | 0.16                | 0.13  | 0.40     | 0.58     | 2780               |
| 2010      | 0.25                | 0.20  | 0.75     | 1.04     | 85                 |
| 2011      | 0.21                | 0.22  | 0.67     | 0.79     | 76                 |
| 2012      | 0.21                | 0.15  | 0.44     | 0.54     | 139                |
| 2013      | 0.11                | 0.11  | 0.28     | 0.37     | 184                |
| 2014      | 0.12                | 0.10  | 0.29     | 0.42     | 97                 |
| 2015      | 0.14                | 0.11  | 0.33     | 0.53     | 447                |
| 2016      | 0.13                | 0.11  | 0.32     | 0.45     | 622                |
| 2017      | 0.17                | 0.12  | 0.42     | 0.59     | 634                |
| 2018      | 0.18                | 0.16  | 0.41     | 0.58     | 362                |

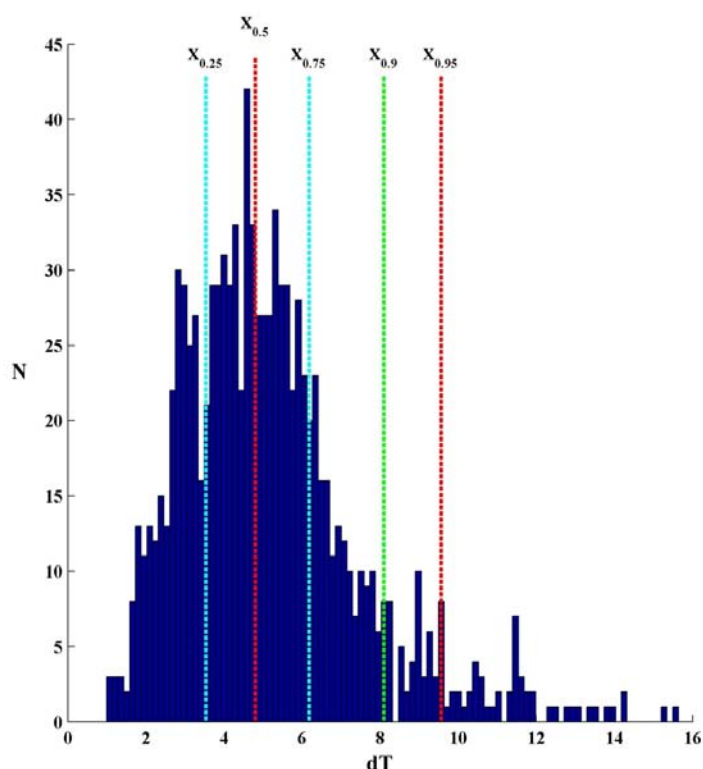


Рис. 1. Гистограмма распределения времени реакции СП СПЦ на землетрясения в ближней зоне (200-км от специализированных сейсмических станций СП СПЦ). На график нанесены квантили распределения: 25%, медиана, 75%, 90% и 95%

Рассмотрим стабильность оценок координат эпицентров во времени. В Табл. 1 сведены параметры распределений невязок координат между оперативной и отложенной обработкой в КФ ФИЦ ЕГС РАН по различным периодам времени.

Следует отметить, что точность оценки координат остается стабильно хорошей на всем протяжении рассматриваемого периода. При этом до 2013 г. качество оценок увеличивалось, а после оставалось на стабильно высоком уровне. Фактически, в среднем ошибка оценки координат составляла порядка 12 км, а 95% эпицентров определены точнее 50 км. Это приемлемый результат, полностью соответствующий задачам СП СПЦ. Некоторое ухудшение наметилось с 2017 г. (произошел скачок значения  $X_{95}$ ), и в 2018 г. медианная точность ухудшилась до 18 км. Возможные причины этого мы рассмотрим ниже.

### Время реакции СП СПЦ

Время реакции – это ещё одна важнейшая характеристика СП СПЦ. В данной работе мы будем говорить о полном времени реакции  $T_r$ , под которым понимается разница между временем публикации параметров обрабатываемого землетрясения в базе данных КФ ФИЦ ЕГС РАН и временем в очаге. Дальнейшие временные затраты относятся к реакции всей СПЦ, и оператор сейсмической подсистемы не в состоянии на них повлиять.

При анализе скорости производства оценок в СП СПЦ применим такой же подход, как в предыдущем пункте: рассмотрим эмпирическое распределение  $T_r^i$ , и определим его параметры. Далее, изучим стабильность этого распределения во времени. Будем анализировать землетрясения, произошедшие в ближней зоне камчатского сегмента сети СП СПЦ, которая имеет самый жесткий регламент на скорость обработки. Именно такие события наиболее ярко показывают возможности системы. При этом, абсолютное большинство землетрясений Камчатки происходит в ближней зоне.

Параметры распределений времени реакции для разных периодов времени приведены в Табл. 2. Гистограмма распределения времени реакции СП СПЦ за весь период эксплуатации СП СПЦ представлена на Рис. 1. Видно, что за весь рассматриваемый период характерное время реакции (медианная оценка) имеет величину около 5 минут, а 95% всех землетрясений обрабатываются быстрее ~8 минут. Следует заметить, что землетрясения, которые относятся к потенциально цунамигенным, ( $M > 6.0$ ), за очень редким исключением, были обработаны быстрее 7 минут. Существенное увеличение скорости реакции наблюдалось в 2013 г. Худшим периодом в части скорости реакции системы оказывается 2010 г. Уже с 2011 г. установился стабильно высокий уровень скорости реакции СП СПЦ.

Табл. 2. Параметры распределений времени реакции (в минутах) СП СПЦ в разные периоды времени для ближней зоны (Камчатская ближняя зона)

| Период    | $[X_{75} - X_{25}]$ | $M_e$ , мин. | $X_{90}$ , мин. | $X_{95}$ , мин. | Объем выборки, шт. |
|-----------|---------------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 2010–2018 | 2.65                | 4.81         | 8.10            | 9.56            | 1028               |
| 2010      | 5.73                | 5.49         | 17.18           | 19.70           | 87                 |
| 2011      | 1.92                | 4.75         | 6.88            | 7.23            | 77                 |
| 2012      | 2.89                | 4.86         | 7.78            | 9.48            | 143                |
| 2013      | 1.92                | 2.84         | 5.29            | 6.60            | 187                |
| 2014      | 1.86                | 4.77         | 6.81            | 8.57            | 99                 |
| 2015      | 2.13                | 5.27         | 7.76            | 9.33            | 104                |
| 2016      | 1.50                | 4.90         | 6.52            | 7.73            | 90                 |
| 2017      | 1.77                | 5.03         | 6.92            | 7.67            | 101                |
| 2018      | 1.99                | 5.40         | 8.21            | 9.52            | 75                 |

### Пространственный анализ качества работы СП СПЦ

После того, как мы рассмотрели параметры качества работы системы, и установили их стабильность во времени, имеет смысл изучить точность оценок координат и времени реакции системы в зависимости от положения землетрясения.

Для того, чтобы изучить площадное распределение параметров, проведем сканирование зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН цилиндрами с радиусом  $R = 50$  км и для каждого узла координатной сетки рассчитаем медианные значения точности координат и времени реакции системы. Получившиеся распределения показаны на Рис. 2. Видно, что распределения как точности координат (Рис. 2а), так и времени реакции (Рис. 2б) имеют схожие особенности. Наилучшее качество оценок система показывает для землетрясений вблизи восточного побережья Камчатки. Причем распределение точности оценки координат имеет нерегулярную, «пятнистую» структуру, в то время как время реакции постепенно увеличивается к югу Камчатки и Северным Курилам, а также к Камчатскому заливу. Таким образом, наиболее качественно производятся оценки для землетрясений Авачинского и Кроноцкого залива. Наихудшее качество оценок наблюдается для района восточнее Командорских островов и Северных Курил. Времена реакции здесь могут превышать 15 минут, а невязка координат повышается до  $1^\circ$  дуги большого круга.

Очевидно, что эти особенности объясняются конфигурацией сети наблюдений. Наибольшая плотность сейсмических станций достигается на побережье Авачинского залива. Помимо пунктов регистрации опорной станции «Петропавловск», здесь имеется группа станций сильных движений, а также несколько станций, вынесенных на самое побережье, максимально близко к сейсмофокальной зоне: «Ходутка» (KDT), «Русская» (RUS), «Налычево» (NLC) и «Шипунский» (SPN). Кроноцкий залив обеспечивается на побережье лишь станцией «Жупаново» (GPN), а Камчатский залив – лишь пунктами наблюдений опорной станции «Усть-Камчатск».

Если рассматривать точность оценки координат, то для восточного побережья Камчатки она остается, на приемлемом уровне – до 20 км. Но для времени реакции картина более неоднородная. Время реакции колеблется от отличных значений – 3 мин. 40 с., до значений, близких к предельным – около 7 минут. Таким образом, район Камчатского залива остается наименее защищенным от угрозы цунами на восточном побережье Камчатки. При этом, крупнейший населенный пункт этого района, пос. Усть-Камчатск, подвергался сильнейшим воздействиям цунами как в исторический период, в 1923 г., так и в прошлом.

К проблемным регионам можно отнести и Командорские острова. Точность оценки координат здесь остается на приемлемом уровне, хотя и наблюдается постепенное закономерное ухудшение ситуации при движении на восток, при удалении от основной группировки сейсмических станций. Что касается времени реакции, то уже в районе о. Медный мы видим значения на уровне 9 минут, что не удовлетворяет 7-минутному регламенту, и находится вблизи предельных значений по действующему регламенту (схема 1000 км. – 10 мин.). В этой области ситуация осложняется нестабильной работой станции «Беринг» (BKI), которая прекратила свою работу сразу после Ближне-Алеутского землетрясения 17 июля 2017 г. ( $M_w = 7.8$ ), и была полностью восстановлена только в ноябре 2018 г. Это привело к тому, что большая часть афтершоков этого землетрясения обрабатывалось без привлечения BKI, что не могло не отразиться на качестве произведенных оценок. Поскольку афтершоки Ближне-Алеутского землетрясения составляют большую часть событий из этого района, то именно они имеют наибольший вес при любых статистических оценках.

Теперь рассмотрим район Северных Курил – южную оконечность зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН и ближней зоны камчатского сегмента СП СПЦ. Здесь наблюдается самая худшая точность оценок координат, а также довольно медленная скорость реакции системы. Даже в пределах 200-км зоны от станции SKR наблюдаются обширные области, для которых характерны невязки около 100 км, и времена реакции системы на уровне 9–10 минут, что является предельным значением

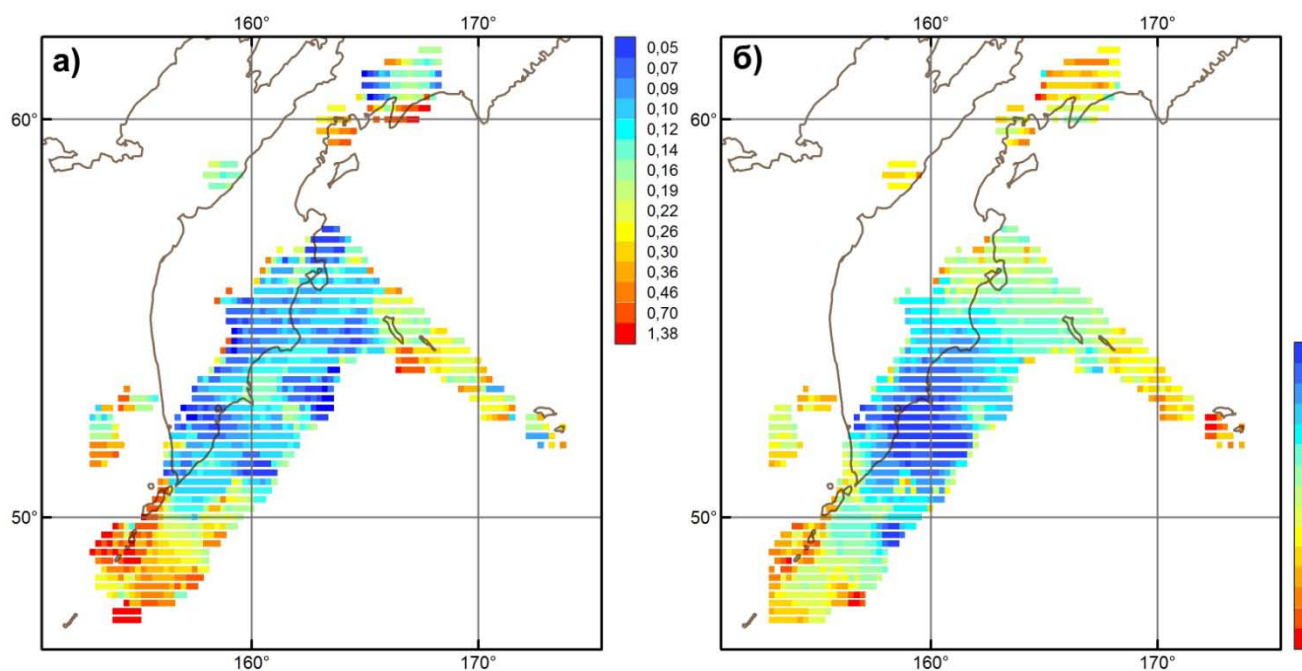


Рис. 2. Распределение основных параметров качества работы СП СПЦ в зависимости от положения эпицентра:  
а) невязки оценок положения координат между оперативными и отложенными оценками РИОЦ «Петропавловск»; б) время реакции СП СПЦ

для действующего регламента. Решающее значение для этого района играет крайне неблагоприятная конфигурация сети. По отношению к очагу землетрясения, расположенного южнее о. Парамушир, сеть сейсмических станций Камчатки занимает очень узкий азимутальный угол. Расширение азимутального угла за счет ожидания вступлений на станциях Сахалина, Магадана и Южных Курил занимает довольно много времени, и зачастую неприемлемо при оперативной обработке. Коренным образом ситуация могла бы быть улучшена за счет развития системы наблюдений на средней части Курильской гряды, которая совершенно не охвачена наблюдениями.

Добавим, что представленные карты распределения точности и скорости оценок могут помочь объяснить отклонения во временном ходе этих параметров, оцененных по всему региону. Например, значительное уменьшение времени реакции системы в 2013 г., например, было вызвано мощной роевой активностью в Авачинском заливе, для которого скорость реакции максимальна. Афтершоковый процесс Ближне-Алеутского события внес заметный вклад в ухудшение точности оценок координат в период 2017–2018 гг.

### **Заключение**

Результаты эксплуатации СП СПЦ в 2010–2018 гг. свидетельствуют об общем высоком уровне производства оценок параметров землетрясений в оперативном режиме, отвечающем требованиям, которые предъявлялись к СП СПЦ при ее проектировании и создании. Время реакции СП СПЦ  $T_r$  остается стабильно низким на протяжении всего периода эксплуатации, и удовлетворяет как требованиям действующего регламента, так и более жестким требованиям нового регламента. Точность оценок координат эпицентров оказывается довольно высокой на протяжении всего рассматриваемого периода.

Вместе с тем, при анализе площадных распределений времени реакции и точности координат землетрясений, выявлены области, в которых наблюдается пониженное качество оценок параметров землетрясений. К таковым относится сегмент Алеутского желоба восточнее Командорских островов, а также южная часть ближней зоны камчатского сегмента СП СПЦ. Выделен также наиболее опасный участок восточного побережья Камчатки. В северной части Камчатского залива наблюдается зона с повышенным временем реакции системы, что уменьшает степень цунами-защищенности близлежащих участков побережья и пос. Усть-Камчатск. Эти проблемы могут быть решены за счет увеличения плотности сети наблюдений, в первую очередь на побережье Камчатского залива, на Кроноцком полуострове, на Северных Курилах и на Командорских островах.

### **Список литературы**

1. 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.
2. Саваренский Е.Ф. Проблема цунами // Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. Сборник статей по цунами. 1956. № 2. С.3–7.
3. Поплавский А.А. Храмушин В.Н., Непон К.И., Королев Ю.П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 273 с.
4. 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 // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. №4. С. 41–57.
5. Соловьев С. Л. Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // Труды СахКНИИ, Вып.29, 1972, С.7–47.
6. Гусяков В. К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958–2009 гг. // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. №3. С. 5–21.