

## Региональный информационно-обрабатывающий центр “Петропавловск” в Системе предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России: результаты эксплуатации в 2010–2018 гг.\*

Д. В. ЧЕБРОВ

Камчатский филиал ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН”,

Петропавловск-Камчатский, Россия

Контактный e-mail: danila@emsd.ru

На основе накопленного эмпирического материала исследуется вопрос о реальных характеристиках сейсмической подсистемы Системы предупреждения о цунами (СП СПЦ), созданной на Дальнем Востоке России в 2006–2010 гг. Детальный анализ реакции системы и точности оценок координат землетрясений проведен на примере Камчатки как регионе с самой высокой сейсмической активностью на Дальнем Востоке, который приемлемо обеспечен сейсмическими наблюдениями. Установлено, что СП СПЦ демонстрирует стабильно высокие характеристики на протяжении всего периода эксплуатации, они удовлетворяют требованиям, заложенным при проектировании СП СПЦ. Кроме того, выделены районы, для которых качество оценок параметров землетрясений находится вблизи предельных значений — Северные Курилы и сегмент Алеутской дуги восточнее Командорских островов. Основная причина пониженного качества работы СП СПЦ при обработке землетрясений в этих районах — недостаточная обеспеченность наблюдениями Курильских и Алеутских островов.

*Ключевые слова:* цунами, землетрясение, очаг землетрясения, сейсмическая станция, сейсмическая сеть, система предупреждения о цунами.

*Библиографическая ссылка:* Чебров Д.В. Региональный информационно-обрабатывающий центр “Петропавловск” в Системе предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России: результаты эксплуатации в 2010–2018 гг. // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 1. С. 120–135. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.009.

### Введение

Действующая сейсмическая подсистема Системы предупреждения о цунами (СП СПЦ) запущена в эксплуатацию в 2010 г. Работы по ее созданию проводились Геофизической службой РАН (ГС РАН, в настоящее время — 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-й Федеральной целевой программы “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных

\*Title translation and abstract in English can be found on page 135.

© ИВТ СО РАН, 2019.

ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.” Руководителем этих работ был Виктор Николаевич Чебров, который долгие годы возглавлял Камчатский филиал ГС РАН. В масштабных работах принимали участие специалисты таких ведущих институтов РАН, как 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. Государственным заказчиком был 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-обработывающие центры (РИОЦ) — в составе соответствующих филиалов исполняют обязанности по ведению сейсмических наблюдений в целях СПЦ и имеют подчиненное положение в этой системе.

Новая СПЦ пришла на смену старой системе, которую начали разрабатывать после разрушительного цунами 4 ноября 1952 г. на Камчатке и Курильских островах. СПЦ-1958 по своим техническим решениям полностью соответствовала возможностям того времени. Ее основой был сейсмический метод, опирающийся на магнитудно-географический критерий.

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

В СПЦ-1958 оценка параметров землетрясений производилась по единственной станции, которая комплектовалась целым рядом специализированных приборов, обеспечивающих надежную регистрацию землетрясений в широком диапазоне частот и в самых сложных условиях. Три таких цунами-станции действовали независимо друг от друга и объявляли тревогу самостоятельно. Подобная организация СПЦ обуславливалась несовершенством средств связи, отсутствием цифровых систем регистрации землетрясений и неразвитостью вычислительной техники. Предпосылки к изменению ситуации и модернизации СПЦ появились к концу 1970-х гг., а в течение 1980-х гг. проводилась подготовка к созданию на Дальнем Востоке Единой автоматизированной системы наблюдения за возникновением и распространением цунами (ЕАСЦ). Предполагалось, что в структуру ЕАСЦ будут входить сейсмическая и гидрофизическая подсистемы, подсистема связи, ряд центров сбора и обработки информации, были проработаны методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами [7]. После резких изменений в стране в конце 1980-х гг. вопрос модернизации СПЦ был полностью снят с повестки.

Суматро-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г. и последующее катастрофическое цунами повысило интерес в мире к проблемам предупреждения о цунами.

Пожалуй, самым масштабным проектом, реализованным после этого события, оказалась Система предупреждения о цунами в Индонезии [8]. В России по поручению Президента РФ работы по развитию СПЦ были включены в соответствующую ФЦП — “Снижение рисков и смягчение последствий . . .”. Работы начались в 2006 г., а в 2010 г. новая СПЦ была принята в эксплуатацию. Новая СПЦ позволила существенно поднять оперативность, надежность и достоверность оценок параметров потенциально цунамигенных землетрясений за счет переоснащения и расширения сети сейсмических станций, развития новых подходов к анализу данных, создания нового программного обеспечения.

В настоящей работе рассмотрены текущее состояние СП СПЦ на Дальнем Востоке России, опыт ее эксплуатации и основные характеристики системы: точность производства оценок параметров землетрясений, а также время реакции — на примере Камчатской сейсмоактивной зоны и по материалам Регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) “Петропавловск”, Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

## 1. Современное состояние сейсмической подсистемы Системы предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России

Сейсмическая подсистема СПЦ сохраняет конфигурацию, принятую после окончания работ и запуска в эксплуатацию в конце 2010 г. Ее основные компоненты — это сеть специализированных сейсмических станций, три региональных информационно-обрабатывающих центра (“Петропавловск”, “Южно-Сахалинск” и “Владивосток”), а также система сбора, обработки и хранения сейсмических данных.

При проектировании СП СПЦ одним из основных принципов было тройное резервирование ИОЦ, каждый из которых имеет полный и равный доступ ко всем данным сейсмических наблюдений. К сожалению, при создании СПЦ по экономическим причинам резервирование на уровне сети сейсмических станций даже не планировалось [4]. Уже в ходе работ удалось увеличить количество опорных станций и обосновать создание сети пунктов сильных движений. Тем не менее одной только сети специализированных станций было недостаточно для безусловной надежной оценки параметров землетрясения. Вообще говоря, их количество для всего Дальнего Востока невелико, и конфигурация этой сети не оптимальна. Поэтому на стадии создания концепции СП СПЦ предполагалось использование существующих сейсмических станций в системе наблюдения Геофизической службы (ФИЦ ЕГС РАН).

Совместное использование двух наблюдательных систем позволило создать вполне работоспособную систему. При этом за счет сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН достигается резервирование на уровне системы наблюдений, а конфигурация сети станций становится приемлемой. Вынесенные же максимально близко к сейсмофокальной зоне станции СП СПЦ, оснащенные акселерометрами, обеспечивают надежную регистрацию землетрясений в ближней зоне и понижают время реакции системы. Таким образом, обе эти системы используются как в целях оперативных служб, так для обеспечения фундаментальных исследований и являются взаимодополняющими. Надо отметить, что де-факто эти две системы представляют собой единую систему и их уже совершенно невозможно отделить одну от другой. Дополнительно в обработку вовлекаются станции Мировой сейсмической сети GSN, известной как сеть IRIS, и некоторые другие зарубежные станции. Однако данные этих станций не рассматриваются как основные.

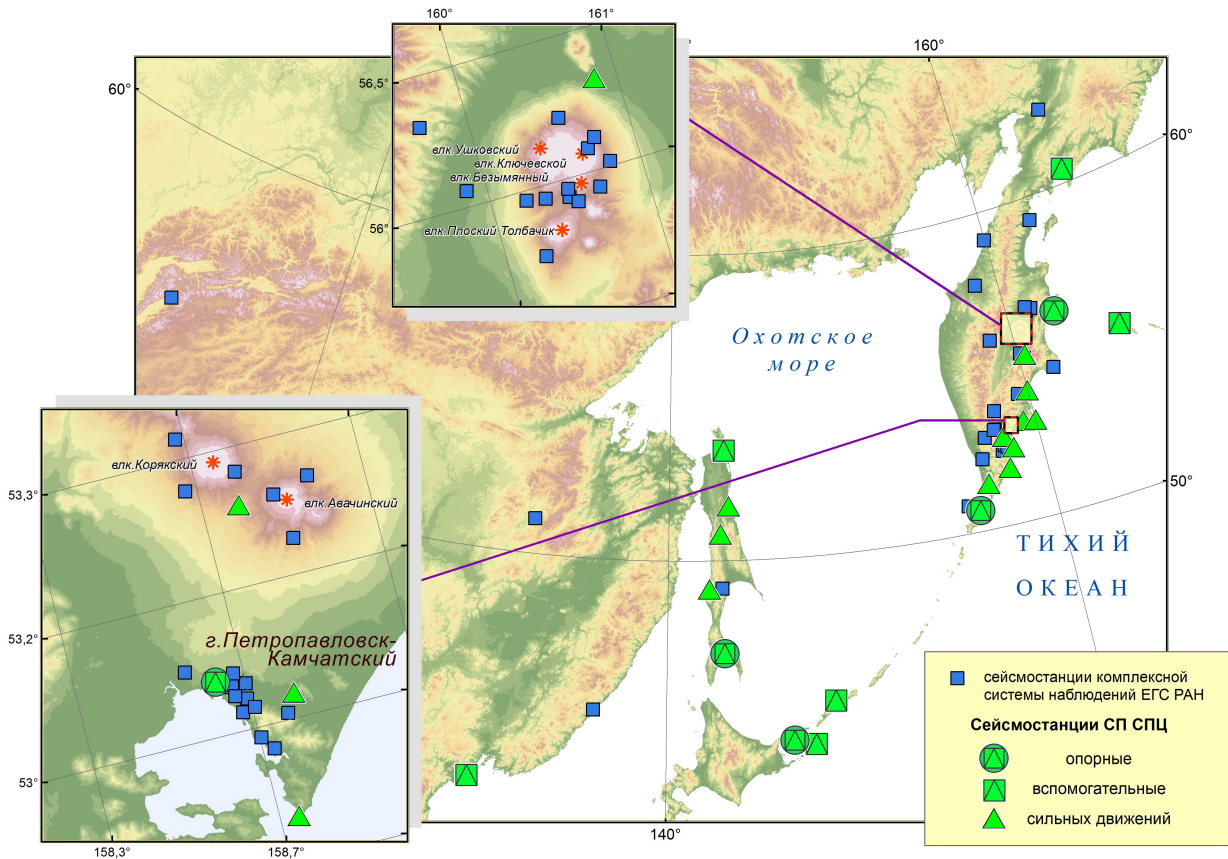


Рис. 1. Сеть специализированных сейсмических станций СП СПЦ, а также цифровые станции, вовлекаемые в Службу срочных донесений и Службу предупреждения о цунами

Сеть СП СПЦ состоит из пяти опорных сейсмических цифровых широкополосных станций, шести вспомогательных и 16 пунктов регистрации сильных движений (рис. 1). Дополнительно привлекаются цифровые станции. В случае необходимости возможно привлечение станций радиотелеметрической сети [9].

В настоящей статье обсуждаются результаты лишь РИОЦ “Петропавловск”, поэтому на рисунках показаны станции, используемые чаще всего именно в этом информационно-обрабатывающем центре. На рис. 2 детально показан камчатский сегмент системы наблюдений, который обслуживается Камчатским филиалом ФИЦ ЕГС РАН.

Сеть сбора данных СП СПЦ реализована на спутниковых (VSAT) каналах связи, выделенных ресурсах сети Internet через оптические и DSL-каналы, специализированных радиосетях Ethernet технологической связи диапазона 5.3 ГГц. Сервер сбора, организованный на серверной платформе под ОС FreeBSD, обеспечивает доступ к данным в двух режимах: реального времени и в режиме доступа к кольцевым буферам данных по запросу [10]. Обработка данных ведется на автоматизированных рабочих местах операторов с использованием пакета программ, разработанного в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: “Дисплея реального времени”, и интерактивной программы обработки сейсмических сигналов DIMAS [11]. Обработка ведется как вручную, так и в автоматическом режиме. Однако главное значение имеет решение, выработанное дежурным оператором в РИОЦ. Дежурства ведутся непрерывно и круглосуточно.

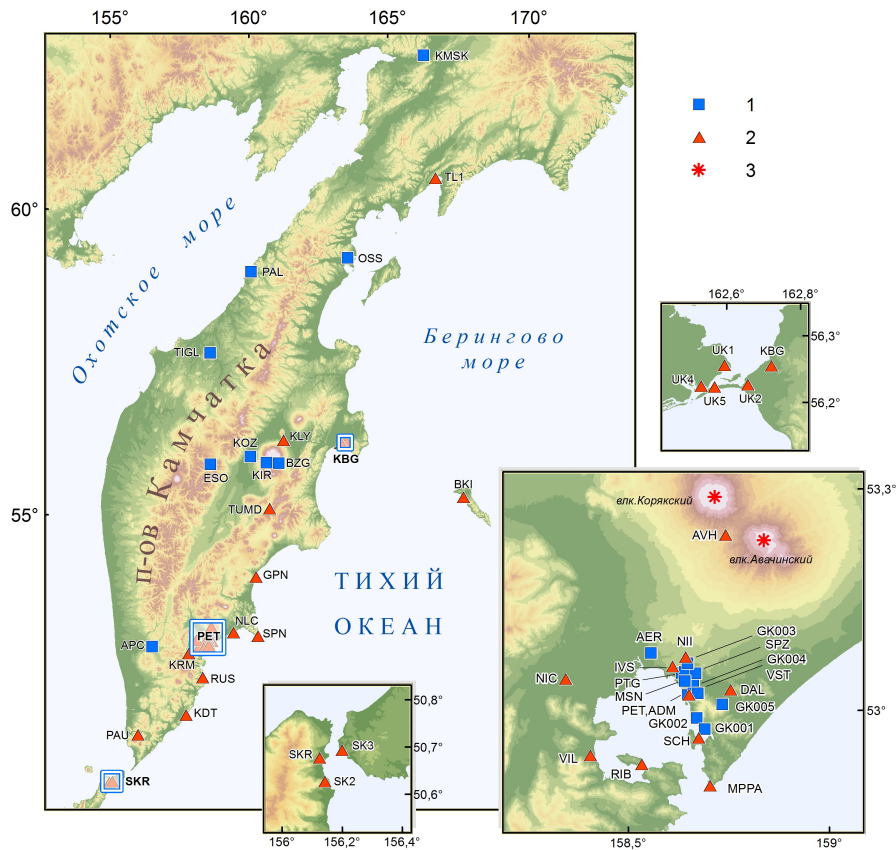


Рис. 2. Цифровые сейсмические широкополосные станции на Камчатке, используемые для оперативных оценок в РИОЦ «Петропавловск»: 1 — сеть цифровых станций Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН; 2 — пункты наблюдений сейсмической подсистемы Системы предупреждения о цунами на Камчатке; 3 — вулканы

При планировании работ по созданию новой СПЦ предполагалось, что регламенты подачи тревоги претерпят некоторые изменения, поскольку возможности системы после обновления существенно возросли в части как точности оценок, так и скорости реагирования. Предлагались следующие нормы регламента на скорость реакции СП СПЦ по всему Дальнему Востоку: до 7 мин для ближней зоны, до 20 мин в зоне ответственности. Более далекие землетрясения планировалось обрабатывать по регламентам службы срочных донесений (ССД). Здесь предполагается, что время реакции отсчитывается с момента начала регистрации землетрясения сетью специализированных станций. Ближняя зона — это область, основанная на 200-километровых расстояниях от станций сети СП СПЦ. Зона ответственности по Дальнему Востоку России охватывает Японское и Охотское моря и акватории Тихого океана до южной оконечности о. Хоккайдо с юга, ограничивается линией перемены дат на востоке и акваториями Берингова моря на севере.

К сожалению, существующая конфигурация сети сейсмических станций СПЦ не позволяет отнести к ближней зоне все области с наивысшей сейсмичностью. Средние Курилы остались не охвачены наблюдениями, и для этого района невозможно систематически производить оценки быстрее семи минут. То же относится к сегменту Алеутского глубоководного желоба восточнее  $169^\circ$  в. д. Остальные сегменты островных дуг

в зоне ответственности РИОЦ “Петропавловск” (10-минутная зона) возможно перевести на более жесткий регламент оценки параметров землетрясений.

Планируемые показатели скорости производства оценок параметров землетрясений были достигнуты, однако из-за организационных проблем введение новых регламентов было остановлено и в настоящий момент действует временной норматив старой СПЦ, который предполагает выпуск тревоги не позднее 10 мин для событий с эпицентральным расстоянием от станции РЕТ (Петропавловск-Камчатский) не более 1000 км. Внутренние правила обрабатывающих центров СП СПЦ обязывают дежурную смену ориентироваться на более жесткие новые требования (7 мин для ближней зоны), которые до сегодняшнего времени не утверждены на уровне всей СПЦ.

В настоящей работе мы будем говорить о детальном оценивании качества работы СП СПЦ на основе результатов эксплуатации и материалов РИОЦ “Петропавловск”, КФ ФИЦ ЕГС РАН. Несмотря на то что фактически три РИОЦ существуют в едином пространстве данных и способны работать по единому регламенту, в реальности это не так. Регламенты СПЦ для каждого из РИОЦ существенно различаются. Кроме того, различны регламенты Службы срочных донесений, по которым ведется обработка умеренных и слабых землетрясений, что объясняется, среди прочего, различным уровнем сейсмической активности разных регионов.

Таким образом, материалы оперативной обработки сложно назвать однородными для всего Дальнего Востока. Поэтому целесообразно для первого опыта детального анализа результатов эксплуатации остановиться на Камчатском сейсмоактивном регионе. Здесь сейсмическая активность остается стабильно высокой, но при этом, в отличие от исключительно труднодоступного Курильского региона, Камчатка гораздо лучше обеспечена сейсмическими наблюдениями, поэтому качество исходного материала выше. Сахалин обеспечен наблюдениями на сходном уровне, однако уровень сейсмичности в этом районе несколько ниже, поэтому меньше объем данных, которые можно использовать [12].

Как уже отмечалось, новая СПЦ введена в эксплуатацию в ноябре 2010 г., с 2008 г. она проходила опытную эксплуатацию. Персонал РИОЦ “Петропавловск” начал освоение новых алгоритмов обработки и программных средств уже в 2006 г. Можно считать, что к середине 2010 г. процедуры обработки данных были вполне освоены и Система (как совокупность технических средств и персонала) начала демонстрировать свою действительную эффективность. Опубликованные ранее результаты эксплуатации, а также оценки качества работы СП СПЦ охватывали небольшие периоды времени (см., например, [13]), но было показано, что в целом СП СПЦ демонстрирует ожидаемые показатели по качеству производства оценок параметров землетрясений. Кроме того, все обрабатывающие центры показывали сходное качество работы.

## 2. Качество оценок координат в СП СПЦ

Качество оценки координат землетрясения определяется точностью этой оценки, т. е. невязкой  $d(\lambda, \phi)$  от неких “истинных” координат. Когда речь идет о качестве расчета координат эпицентров в какой-либо системе наблюдений, следует оперировать статистическими оценками, т. е. параметрами распределений невязок. При этом аналитическое описание полученного распределения не важно, вполне достаточно эмпирически параметризовать его набором соответствующих квантилей: 25-, 75-, 90- и 95-процентным.

В качестве эффективной средней оценки будем использовать медиану распределения, в качестве оценки стандартного отклонения в этом случае — межквартильный интервал  $\chi_{75} - \chi_{25}$ .

Что касается “истинных” координат, то это понятие достаточно условно, поскольку результат решения задачи локации — типичной обратной задачи — в значительной степени зависит от конфигурации сейсмической сети и модели среды. Можно считать, что оценки (особенно для сильных землетрясений), произведенные независимыми крупными глобальными сейсмическими агентствами, близки к истинным — все они широко используют данные мировых сетей, а модели среды могут различаться лишь незначительно. Ими удобно пользоваться на межрегиональном уровне. Региональную оперативную оценку имеет смысл сравнивать с данными отложенной обработки регионального агентства.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН в повседневной деятельности использует все возможности Камчатской системы наблюдения, но в случае необходимости привлекаются данные зарубежных станций и станций других регионов. Таким образом, при сильных землетрясениях ситуация с региональной оценкой не хуже, чем с глобальной, при умеренных и слабых событиях оценкам Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН следует отдавать предпочтение. Это ярко проявилось в случае Южно-Озерновского землетрясения 28 марта 2017 г., когда все решения мировых агентств оказались смещены относительно истинного эпицентра, который был уточнен дополнительными методами [14].

Рассмотрим теперь невязки оценок координат по данным различных агентств. В табл. 1 сведены результаты попарного сравнения данных оперативной обработки Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (РИОЦ “Петропавловск”), отложенной обработки КФ ФИЦ ЕГС РАН, NEIC (США) и данных ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск. Видно, что хорошо согласуются между собой данные КФ ФИЦ ЕГС РАН (сравнение РЕТ — KBGS), а также данные NEIC и ФИЦ ЕГС РАН (сравнение NEIC — OBN). В свою очередь, невязки между данными КФ ФИЦ ЕГС РАН и глобальных агентств довольно велики. Эти результаты подтверждают систематическое смещение глобальных оценок относительно региональных. Вид некоторых гистограмм распределений показан на рис. 3.

Т а б л и ц а 1. Параметры распределения невязок оценок положения эпицентров землетрясений, полученных различными сейсмическими агентствами за весь период наблюдений

Сейсмические агентства*	$[\chi_{75} - \chi_{25}]$	$M_e$	$\chi_{90}$	$\chi_{95}$	Объем выборки, шт.
РЕТ — NEIC	0.30	0.31	0.73	0.89	1120
РЕТ — OBN	0.26	0.23	0.62	0.78	1388
РЕТ — KBGS	0.16	0.13	0.40	0.57	2780
KBGS — NEIC	0.25	0.32	0.71	0.89	1089
KBGS — OBN	0.24	0.21	0.57	0.74	1361
NEIC — OBN	0.13	0.11	0.31	0.40	1088

\*Расшифровка кодов сейсмических агентств: РЕТ — КФ ФИЦ ЕГС РАН, оперативная обработка по регламентам ССД и СПЦ; NEIC — National Earthquake Informational Center, USA; OBN — ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск; KBGS — КФ ФИЦ ЕГС РАН, отложенная обработка.

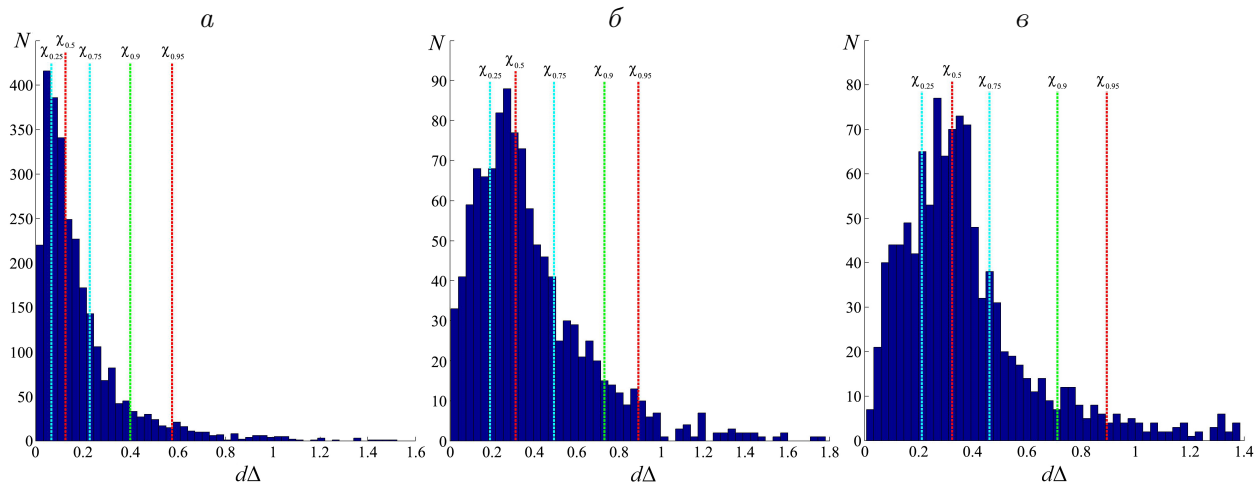


Рис. 3. Гистограммы распределения невязок оценок положения эпицентров землетрясений, полученных различными сейсмическими агентствами за весь период наблюдений: *а* — невязки между оперативными и отложенными оценками РИОЦ “Петропавловск”; *б* — между оперативными оценками РИОЦ “Петропавловск” и агентством NEIC; *в* — между отложенными оценками РИОЦ “Петропавловск” и агентством NEIC

Т а б л и ц а 2. Параметры распределения невязок (в градусах дуги большого круга) между оперативными и отложенными оценками положения эпицентров землетрясений в разные периоды времени

Период	$[\chi_{75} - \chi_{25}]$	$M_e$	$\chi_{90}$	$\chi_{95}$	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

Далее рассмотрим стабильность оценок координат эпицентров во времени. В табл. 2 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 повышалось, 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  $\chi_{95}$ ), и в 2018 г. медианная точность ухудшилась до 18 км. Возможные причины этого рассмотрены ниже.



### 3. Время реакции СП СПЦ

Время реакции — еще одна важнейшая характеристика СП СПЦ. В настоящей работе под полным временем реакции  $T_r$  понимаем разницу 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 и в предыдущем разделе: рассмотрим эмпирическое распределение  $T_r^i$  и определим его параметры. 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. 3. Гистограмма распределения времени реакции СП СПЦ за весь период эксплуатации СП СПЦ представлена на рис. 4. Видно, что за весь рассматриваемый период характерное время реакции (медианная оценка) имеет величину около 5 мин, а 95% всех землетрясений обрабатываются быстрее  $\sim 8$  мин. Следует заметить, что землетрясения, которые относятся к потенциально цунамигенным ( $M > 6.0$ ), за очень редким исключением, были обработаны быстрее 7 мин. Существенное увеличение скорости реакции наблюдалось в 2013 г.

Худший период в части скорости реакции системы — это 2010 г. Несмотря на то что медиана остается на приемлемом уровне (5 мин 30 с), межквартильное расстояние оказывается увеличенным, также сильно завышены квантили 90 и 95%.

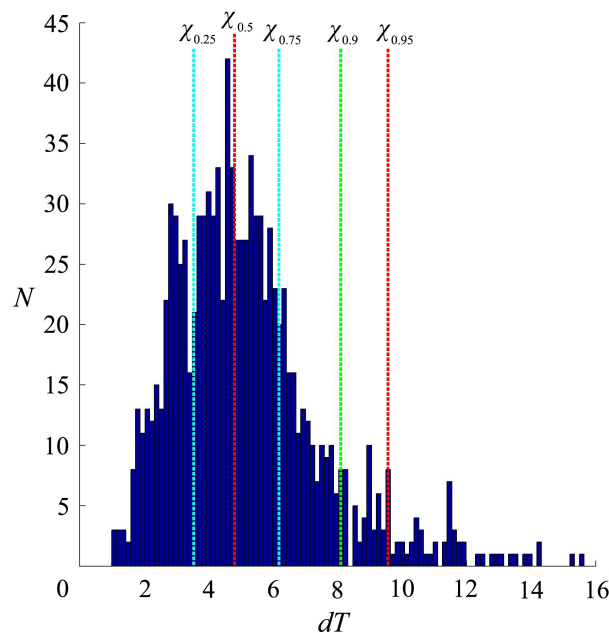


Рис. 4. Гистограмма распределения времени реакции СП СПЦ на землетрясения в ближней зоне (200 км от специализированных сейсмических станций СП СПЦ). На график нанесены квантили распределения: 25%, медиана, 75, 90 и 95%

Т а б л и ц а 3. Параметры распределений времени реакции СП СПЦ в разные периоды времени для ближней зоны (Камчатская ближняя зона)

Период	$[\chi_{75} - \chi_{25}]$	$M_e$ , мин	$\chi_{90}$ , мин	$\chi_{95}$ , 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

Это, вероятно, объясняется недостаточной адаптацией персонала РИОЦ “Петропавловск” к новым условиям работы. Уже с 2011 г. установился стабильно высокий уровень скорости реакции СП СПЦ.

#### 4. Пространственный анализ качества работы СП СПЦ

Наконец, имеет смысл исследовать 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. Полученные распределения показаны на рис. 5. Видно, что распределения как точности координат (рис. 5, а), так и времени реакции (рис. 5, б) 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 мин, а невязка координат повышается до  $1^\circ$  дуги большого круга. Очевидно, что эти особенности объясняются конфигурацией сети наблюдений.

Как видно из рис. 2, наибольшая плотность сейсмических станций достигается на побережье Авачинского залива. Помимо пунктов регистрации опорной станции “Петропавловск” [15], здесь имеется развитая 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 — только пунктами наблюдений опорной станции “Усть-Камчатск”.

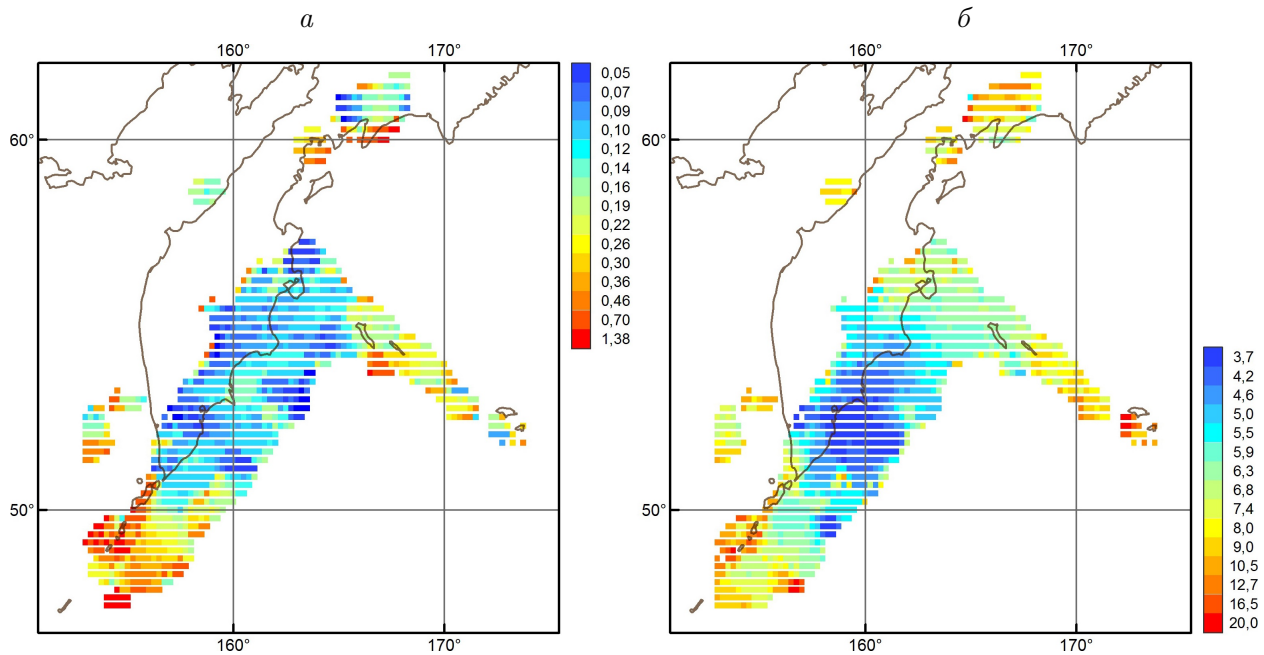


Рис. 5. Распределение основных параметров качества работы СП СПЦ в зависимости от положения эпицентра землетрясения: *а* — невязки оценок положения координат между оперативными и отложенными оценками РИОЦ «Петропавловск»; *б* — время реакции СП СПЦ

Если рассматривать точность оценки координат, то для восточного побережья Камчатки она остается в целом 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 мин. 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. [16], так и в далеком прошлом [17].

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 и удалении от основной группировки сейсмических станций. Что касается времени реакции, то уже в районе о. Медный мы видим значения на уровне 9 мин, 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» (ВКИ), которая прекратила свою работу сразу после Ближне-Алеутского землетрясения 17 июля 2017 г. ( $M_W = 7.8$ ) [18] и была полностью восстановлена только в ноябре 2018 г. Это привело к тому, что значительная часть афтершоков этого землетрясения обрабатывалась без привлечения ВКИ, что не могло не отразиться на качестве произведенных оценок. Поскольку афтершоки Ближне-Алеутского землетрясения составляют большую часть событий из этого района, именно они имеют наибольший вес при любых статистических оценках. Это позволяет с высокой степенью уверенности предполагать, что при исправной станции ВКИ ситуация могла бы быть несколько лучше.

В районе Северных Курил — южной оконечности зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН и ближней зоны камчатского сегмента СП СПЦ — отмечается самая худшая

точность оценок координат, а также довольно медленная скорость реакции системы. Даже в пределах 200-километровой зоны от станции SKR имеются обширные области, для которых характерны невязки около 100 км и времена реакции системы на уровне 9–10 мин, что является предельным значением для действующего регламента. Эти проблемы с качеством работы системы здесь нельзя объяснить нестабильной работой опорной станции “Северо-Курильск”. Несмотря на то что выносные пункты SK2 и SK3, оснащенные акселерометрами, долгое время были неисправны, основной пункт наблюдений SKR большую часть рассматриваемого периода оставался работоспособным. Решающее значение для этого района имеет крайне неблагоприятная конфигурация сети. По отношению к очагу землетрясения, расположенному 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, полученных по всему региону. Например, значительное уменьшение времени реакции системы в 2013 г. 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

Работы по созданию СП СПЦ дали толчок развитию всей системы наблюдений на Дальнем Востоке России. Здесь не только возникла сеть современных цифровых сейсмических станций, но и была глубоко перестроена система сбора, хранения и обработки сейсмических данных. В настоящее время сеть специализированных сейсмических станций СПЦ используется не только в целях предупреждения о цунами, но и при проведении многочисленных фундаментальных исследований в области наук о Земле. А интеграция с системой сейсмических наблюдений ФИЦ ЕГС РАН позволяет поднять точность и скорость оценок параметров землетрясений, повысить их надежность, а также обеспечить дополнительное резервирование наблюдательной системы СП СПЦ.

За время эксплуатации СП СПЦ успешно в оперативном режиме обработала все сильные землетрясения, уложившись при этом в требования регламента. Для землетрясения в Тохоку в 2011 г. состоятельные оценки магнитуды события были получены наиболее оперативно [19]. Точно и в срок обработано и сильнейшее на Камчатке за всю инструментальную эпоху глубокое Охотоморское землетрясение [20].

Результаты эксплуатации СП СПЦ в 2010–2018 гг. свидетельствуют о 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 работы 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 наиболее опасный участок восточного побережья Камчатки. В северной части Камчатского залива имеется зона с повышенным временем реакции системы, что уменьшает степень цунамизационности 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, Кроноцком полуострове, Северных Курилах и Командорских островах.

Результаты эксплуатации СП СПЦ свидетельствуют о стабильно высоких точности и скорости оценок параметров очагов землетрясений, получаемых в оперативном режиме. Оказалось, что спроектированная и созданная в 2006–2010 гг. сейсмическая подсистема СПЦ имеет большой запас прочности и способна функционировать даже при значительных потерях данных. В то же время дальнейшее недофинансирование приведет к обвальной деградации СП СПЦ, что оставит население не только Камчатки, но и всего Дальнего Востока наедине с угрозой цунами.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Госзадания КФ ФИЦ ЕГС РАН по теме НИР № АААА-А16-116070550063-8 “Развитие методов цунамигенного потенциала сильных землетрясений на основе анализа параметров их очагов и волновых полей для системы предупреждения о цунами” при частичной поддержке РФФИ (грант № 17-55-50005).

## Список литературы / References

- [1] **Чебров В.Н.** Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Вестн. КРАУНЦ. Сер.: Науки о Земле. 2007. № 1, вып. 9. С. 27–36.  
**Chebrov, V.N.** Expansion of the system of the seismological observations for tsunami warning in Far East of Russia // Bull. of KRAESC. Earth Sciences. 2007. Vol. 9, No. 1. P. 27–36. (In Russ.)
- [2] **Саваренский Е.Ф.** Проблема цунами // Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР: Сб. статей по цунами. 1956. № 2. С. 3–7.  
**Savarenskiy, E.F.** Problem of tsunami // Byuletin' Soveta po Seysmologii AN SSSR: Sbornik Statey po Tsunami. 1956. No. 2. P. 3–7. (In Russ.)
- [3] Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России / А.А. Поплавский, В.Н. Храмушин, К.И. Непоп, Ю.П. Королев. Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 273 с.  
Operative prediction of tsunami on the sea coastline of Far East of Russia / A.A. Poplavskiy, V.N. Khramushin, K.I. Nepop, Yu.P. Korolev. Yuzhno-Sakhalinsk: DVO RAN, 1997. 273 p. (In Russ.)
- [4] **Чебров В.Н., Гусев А.А., Гусяков В.К. и др.** Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45, № 4. С. 41–57.

- Chebrov, V.N., Gusev, A.A., Gusiakov, V.K.** A concept of development of a system for seismological observations with the purpose of tsunami warning in the Far East of Russia // *Seismic Instruments*. 2009. Vol. 45, No. 4. P. 41–57. (In Russ.)
- [5] **Соловьев С.Л.** Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // *Труды СахКНИИ*. 1972. Вып. 29. С. 7–47.  
**Soloviev, S.L.** The repeatability of earthquakes and tsunamis in Pacific ocean // *Proc. of SakhCRI*. 1972. Iss. 29. P. 7–47. (In Russ.)
- [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.  
**Gusiakov, V.K.** Magnitude-geographical criterion for operational tsunami prognosis: analysis of application in 1958–2009 // *Seismic Instruments*. 2010. Vol. 46, No. 3. P. 5–21. (In Russ.)
- [7] **Поплавский А.А., Куликов Е.А., Поплавская Л.Н.** Методы и алгоритмы автоматизированного прогноза цунами. М.: Наука, 1988. 128 с.  
**Poplavskiy, A.A., Kulikov, E.A., Poplavskaya, L.N.** Methods and algorithms of automatic prediction of tsunamis. Moscow: Nauka, 1988. 128 с. (In Russ.)
- [8] **Wächter J., Babeyko A., Fleischer J. et al.** Development of tsunami early warning systems and future challenges // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012. Vol. 12, iss. 6. P. 1923–1935. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1923-2012>
- [9] **Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.** Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // *Вулканология и сейсмология*. 2013. № 1. С. 18–40. DOI: 10.7868/S0203030613010021.  
**Chebrov, V.N., Droznin, D.V., Kugaenko, Yu.A.** The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011 // *J. of Volcanology and Seismology*, 2013. Vol. 7, No. 1. P. 16–36.
- [10] **Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Сергеев В.А., Пантюхин Е.А.** Система сбора, обработки, хранения и представления сейсмологических данных и результатов их обработки в СП СПЦ, технические средства, алгоритмы и программное обеспечение // 50 лет сейсмологических наблюдений на Камчатке 1961–2011: Тр. III Науч.-техн. конф. “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2011. С. 332–336.  
**Chebrov, V.N., Droznin, D.V., Sergeev, V.A., Pantyukhin, E.A.** System of acquisition, processing, storage and representation of seismological data and results of its processing in Seismic Subsystem of Tsunami Warning System. Hardware, algorithms and software // 50 years of Seismological Observations in Kamchatka, 1961–2011. Proc. of III Conf. “Problems of Complex Geophysical Monitoring of Far East of Russia”. Petropavlovsk-Kamchatsky: KF GS RAN, 2011. P. 332–336. (In Russ.)
- [11] **Дрознин Д.В., Дрознина С.Я.** Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // *Сейсмические приборы*. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34.  
**Droznin, D.V., Droznina, S.Ya.** Program for seismic signal processing DIMAS // *Seismic Instruments*. 2010. Vol. 46, No. 3. P. 22–34. (In Russ.)
- [12] Землетрясения Северной Евразии, 2011 год. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. 540 с.  
*Earthquakes of the Northern Eurasia*, 2011. Obninsk: FITs EGS RAN, 2017. 540 p. (In Russ.)
- [13] **Ототюк Д.А., Чебров Д.В., Викулина С.А.** Результаты работы РИОЦ “Петропавловск” в рамках Службы предупреждения о цунами и Службы срочных донесений в 2012–2013 // *Пробл. комплексного геофиз. мониторинга Дальнего Востока России*: Тр. IV науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский, 30 сент. — 6 окт. 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 279–282.

- Ototyuk, D.A., Chebrov, D.V., Vikulina, S.A. Results of proceedings of information in the processing center “Petropavlovsk” based on regulations of Tsunami Warning System and Urgent Seismic Messages service in 2012–2013 // “Problems of Complex Geophysical Monitoring of Far East of Russia”. Proc. of IV Sci. Conf. Petropavlovsk-Kamchatsky. Sept. 30 — Oct. 6, 2013. Obninsk: GS RAS, 2013. P. 279–282. (In Russ.)
- [14] **Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В. и др.** Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с  $M_W = 6.6$ ,  $K_S = 15.0$ ,  $I = 6$  (Камчатка) // Вестн. КРАУНЦ. 2017. № 3, вып. 35. С. 7–21.  
**Chebrov, D.V., Kugaenko, Yu.A., Lander, A.V. et al.** The March 29th, 2017 earthquake with  $M_W = 6.6$ ,  $K_S = 15.0$ ,  $I = 6$  in Ozerney gulf (Kamchatka) // Bull. of KRAESC. Earth Sciences. 2017. Vol. 35, No. 3. P. 7–21. (In Russ.)
- [15] **Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Захарченко Н.З. и др.** Опорная сейсмическая станция “Петропавловск” для службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2010. № 46(1). С. 5–15.  
**Chebrov, V.N., Droznin, D.V., Zakharchenko, N.Z. et al.** Base seismic station “Petropavlovsk” for the tsunami warning survey // Seismic Instruments. 2010. Vol. 46, No. 46(1). P. 5–15. (In Russ.)
- [16] **Заякин Ю.Я., Лучинина А.А.** Каталог цунами на Камчатке. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1987. 50 с.  
**Zayakin, Yu.Ya., Luchinina, A.A.** Kamchatka tsunami catalogue. Obninsk: RINMI-WDC, 1987. 50 p. (In Russ.)
- [17] **Пинегина Т.К., Кожурин А.И., Пономарева В.В.** Оценка сейсмической и цунамиопасности для поселка Усть-Камчатск (Камчатка) по данным палеосейсмологических исследований // Вестн. КРАУНЦ. 2012. № 1, вып. 19. С. 138–159.  
**Pinegina, T.K., Kozhurin, A.I., Ponomareva, V.V.** Seismic and tsunami hazard assessment for Ust-Kamchatsk settlement, Kamchatka, based on paleoseismological data // Bull. of KRAESC. Earth Sciences. 2012. Vol. 19, No. 1. P. 138–159. (In Russ.)
- [18] **Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др.** Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с  $M_W = 7.8$  на границе Командорской сейсмической брешии // Вестн. КРАУНЦ. 2017. № 3, вып. 35. С. 22–25.  
**Chebrov, D.V., Kugaenko, Yu.A., Abubakirov, I.R. et al.** The July 17th, 2017 Near-Aleutian earthquake with  $M_W = 7.8$  on the border of the Komandor seismic gap (western part of the Aleutian Arc) // Bull. of KRAESC. Earth Sciences. 2017. Vol. 35, No. 3. P. 22–25. (In Russ.)
- [19] **Чебров В.Н., Левин Ю.Н., Чебров Д.В. и др.** 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.  
**Chebrov, V.N., Levin, Yu.N., Chebrov, D.V. et al.** The new generation seismic subsystem of tsunami warning system and processing of the great earthquake in the Japan of March 11, 2011,  $M_W = 9.1$  // Science and Technological Developments. 2011. Vol. 90, No. 1. P. 13–26. (In Russ.)
- [20] Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Холд. комп. “Новая книга”, 2014. 252 с.  
 Strong earthquakes in Kamchatka in 2013 / Ed. V.N. Chebrov. Petropavlovsk-Kamchatsky: Hold. Comp. “Novaya kniga”, 2014. 252 c. (In Russ.)

## Processing center “Petropavlovsk” in seismic subsystem of Tsunami Warning System in Russian Far East in 2010–2018

CHEBROV, DANILA V.

Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia

Corresponding author: Chebrov Danila V., e-mail: danila@emsd.ru

The new Tsunami Warning System in Russian Far East was created in 2006–2010, and it is on duty for more than eight years. The TWS-2010 replaced the old TWS-1958 that had been developed in 1950s after the Great Kamchatka earthquake in 1952. The main method in TWS is still the seismic method, based on the magnitude-geographical criterion. Therefore, the seismic subsystem of TWS can be called a key component that affects the characteristics of entire system.

In this paper the problem of real characteristics of seismic subsystem of TWS is examined. The main characteristics that affect the entire TWS efficiency are the system reaction time and coordinate estimates accuracy.

A detailed analysis of these characteristics is carried out on the example of Kamchatka. This region was chosen because of the highest seismicity and rather good system of seismic observations. Empirical distributions of system reaction times and coordinate accuracy are considered. Parameters of these distributions describe the quality of TWS processing. The detailed analysis of spatial distribution of reaction times and coordinate estimates accuracy made it possible to reveal “good” and “bad” areas for TWS processing.

It was found out, that seismic subsystem of TWS shows consistently high performance throughout the entire period of operation. Reaction times and coordinate estimates accuracy satisfy the regulation requirements of TWS. The detailed analysis for spatial distribution of reaction times and coordinate estimates accuracy made it possible to conclude that most part of the Kamchatka region is covered by accurate and rapid TWS estimates. In the same time, low performance regions were revealed. Reaction times and coordinate accuracy in these regions are near the limit values, according to regulations of TWS. These low performance areas include North Kuril and Aleutian trench area (east of the Commander islands). The main reason for the reduced quality of TWS processing of earthquakes occurring in these areas is the lack of seismic observations of the Kuril and Aleutian Islands.

*Keywords:* tsunami, earthquake, earthquake source, seismic station, seismic network, tsunami warning system.

*Cite:* Chebrov, D.V. Processing center “Petropavlovsk” in seismic subsystem of Tsunami Warning System in Russian Far East in 2010–2018 // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 1. P. 120–135. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.009. (In Russ.)

**Acknowledgements.** This study was supported by the Russian state research project No. AAAA-A16-116070550063-8 and partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 17-55-50005).

*Received 25 December 2018*