Российский сейсмологический журнал
2021. Т. 3, № 3. С. 28–49. DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.02

УДК 550.3, 550.34

Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке и её развитие. Основные результаты наблюдений в 2016–2020 гг.

© 2021 г. Д.В. Чебров, С.А. Тихонов, Д.В. Дрознин, С.Я. Дрознина, Е.А. Матвеенко, С.В. Митюшкина, В.А. Салтыков, С.Л. Сенюков, Ю.К. Серафимова, В.А. Сергеев, В.В. Ящук

КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

Аннотация. Представлен обзор результатов работы системы сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке за последние пять лет, и приведена ретроспектива её развития. Из-за отсутствия возможностей экстенсивного развития в рассмотренный период основной вектор совершенствования камчатской системы сейсмического мониторинга и прогнозирования был направлен на развитие и модернизацию методов и средств организации наблюдений, сбора и обработки данных. В результате создана основа информационного пространства, в котором сведены все процессы от сбора данных и их обработки до представления результатов обработки и организации обмена данных с внешними потребителями. Глубокой модернизации подвергнута система хранения сейсмических данных, обеспечен высокоскоростной доступ к архиву данных, развёрнуты высокопроизводительные вычислительные кластеры, все сейсмические станции сведены в единую корпоративную сеть. Продолжились работы по разработке и развитию алгоритмов и программных средств для обработки данных и контроля параметров сейсмического режима. Развитие Единой информационной системы позволило обеспечить доступ к основным результатам сейсмических наблюдений широкому кругу исследователей. На основе информационной системы создан первый информационный шлюз, который обеспечивает автоматический и оперативный обмен данными с внешними пользователями. Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке позволила в 2016–2020 гг. зарегистрировать и обработать более 83 тыс. вулканических и тектонических землетрясений и провести комплексные исследования для семи наиболее сильных из них. Детальный анализ показал, что уровень региональной представительности достигает ML_c=2.5, уровень локальной представительности (при сейсмическом мониторинге вулканов) – ML_c=–0.2.

Ключевые слова: сейсмические наблюдения, геофизический мониторинг, информационная система, сейсмология, Камчатка, вулканы, землетрясения, прогноз.

Для цитирования: Чебров Д.В., Тихонов С.А., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я., Матвеенко Е.А., Митюшкина С.В., Салтыков В.А., Сенюков С.Л., Серафимова Ю.К., Сергеев В.А., Ящук В.В. Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке и её развитие. Основные результаты наблюдений в 2016–2020 гг. // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 28–49. DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.02

Введение

Начало детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке датируется 1 ноября 1961 года. С этого момента на постоянной основе на полуострове начала работу сеть стационарных сейсмических станций Камчатской системы сейсмологических наблюдений [*Федотов*, 1987].

В 1979 г. все сейсмические наблюдения были сведены в Опытно-методическую сейсмологическую партию (ОМСП) Института вулканологии ДВНЦ (в 1997–2004 гг. – Камчатская ОМСП Геофизической службы РАН, в 2005–2016 гг. – Камчатский филиал Геофизической службы РАН), ныне – Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН.

В начале XXI в. развитие системы сейсмологических наблюдений определялось задачами, связанными с созданием системы комплексных сейсмологических и геофизических наблюдений для целей оперативного мониторинга сейсмической и вулканической опасности, а также с модернизацией службы предупреждения о цунами [*Чебров и др.*, 2013]. К 2010 г. сеть сейсмологических наблюдений оформилась

как специализированная система сбора, передачи, хранения и обработки сейсмической и геофизической информации. Её дальнейшее развитие проходило в рамках Федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года», финансирование по которой было прекращено к 2014 году. Таким образом, экстенсивное развитие системы, связанное с увеличением количества станций и видов наблюдений, было невозможно. Поэтому после 2015 г. изменения были направлены по пути унификации, оптимизации и модернизации геофизических методов наблюдений, информационных систем, методов обработки информации и программных средств. В настоящее время технологии системы мониторинга в полной мере отвечают требованиям масштабируемости и переносимости. Важным звеном системы стала Единая информационная система сейсмологических данных (ЕИС СД) [*Чеброва и др.*, 2020], которая способствует развитию инструментов доступа к данным и автоматизации процессов обработки и обобщения результатов наблюдений.

Работы последних лет, направленные на комплексное исследование сильнейших землетрясений Камчатки и создание методологий таких исследований, задают одно из направлений дальнейшего развития ЕИС СД – создание инструментов для представления и обобщения результатов комплексных исследований очагов крупнейших землетрясений. В настоящий момент можно констатировать практически полную цифровизацию процедур сбора и обработки сейсмологической информации.

На базе КФ ФИЦ ЕГС РАН с 1998 г. действует Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений и оценке сейсмической опасности – КФ РЭС (до 2005 г. – Камчатское отделение Федерального центра прогнозирования землетрясений – КамО ФЦПЗ). Ряд прогностических методик был разработан или адаптирован для Камчатки непосредственно в КФ ФИЦ ЕГС РАН. В настоящее время продолжается непрерывное прогнозирование по 14 методикам. Дополнительно прогнозы предоставляют сотрудники других организаций, ведущих исследования в области наук о Земле и сейсмического прогноза (в т.ч. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ИВиС ДВО РАН), Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН), Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН, Москва), Физико-технический институт РАН (ФТИ РАН, Санкт-Петербург), Институт проблем передачи информации РАН (ИППИ РАН, Москва), Центр ГМСН и региональных работ ФГБУ «Гидроспецгеология» (Москва, с февраля 2020 г.) – всего шесть методик) [*Чебров и др.*, 2011]. Также ведётся прогнозирование извержений вулканов [*Сенюков*, 2013; *Салтыков*, 2016].

Таким образом, можно говорить о постоянно функционирующей системе сейсмологического мониторинга и прогнозирования землетрясений и извержений вулканов. Успехи КФ ФИЦ ЕГС РАН в области создания единого информационного пространства позволяют ставить задачу цифровизации деятельности КФ РЭС. Эта задача стоит в ряду ключевых на ближайшую перспективу в части развития и модернизации системы мониторинга и прогнозирования.

Этапы развития системы сейсмологических наблюдений ранее подробно описывались в [*Федотов*, 1987; *Гордеев и др.*, 2006; *Чебров и др.*, 2013]. Настоящая работа даёт сведения о пятилетней ретроспективе развития и современном состоянии системы сейсмологического мониторинга и прогнозирования на Камчатке. Кроме того, представлены основные результаты сейсмических наблюдений.

1. Средства сбора, обработки и хранения сейсмических данных и Единая информационная система

Система сбора, обработки и хранения данных. В 2016–2020 гг. проведены работы по модернизации структуры и технического оснащения сети сбора сейсмических и геофизических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН. На ответственных направлениях запущены в работу резервные каналы связи. В настоящее время приёмный центр радиотелеметрической сети сейсмических станций «Козыревск» имеет один основной (FOL) и один резервный (DSL) каналы связи. Приёмный центр радиотелеметрической сети сейсмических станций «Ключи» имеет один основной (FOL) канал связи и два резервных (DSL и спутниковый iDirect). Также введены в работу и активно эксплуатируются Wi-Fi каналы с дальностью более 50 *км* (станции «Налычево», «Русская» и «Карымшина»).

На базе КФ ФИЦ ЕГС РАН создано высокоскоростное ядро корпоративной сети с доступом к первичным данным. В частности, введён в эксплуатацию высокопроизводительный вычислительный кластер (High Performance Computing

Cluster – HPC), тестируются кластер виртуализации на платформе Proxmox и облачное хранилище, включённые в сеть InfiniBand 40 *Gb/s*.

Внедрены серверы уровня доступа, что обеспечило не только буферизацию отдельных потоков данных и оперативный доступ к ним, но и формирование и передачу в сеть «multicast» (группового) потока данных по всей сети наблюдений. При подключении к групповому потоку любой компьютер сети автоматически получает доступ ко всем первичным данным в реальном времени и может их принимать, обрабатывать или визуализировать. Это создаёт условия для массового доступа к первичным данным без существенной нагрузки на сеть и серверы. Также серверы уровня доступа формируют оперативный архив сейсмических данных глубиной 120 дней и предоставляют интерфейс для пользовательского доступа.

В 2016–2020 гг. в КФ ФИЦ ЕГС РАН проведены работы по созданию алгоритмов и программного обеспечения для автоматизации процессов обработки сейсмических сигналов.

Разработан, запущен в эксплуатацию и активно используется специальный автоматизированный сервис, позволяющий проводить оценку инструментальной сейсмической интенсивности по данным станций сильных движений (ССД) в режиме, близком к реальному времени, и наглядно представлять полученные результаты [*Дрознин и др.*, 2017]. Данные представляются в виде карты с положением эпицентра и приведением основных параметров землетрясения, а также таблицы пункт–балл для станций регистрации сильных движений (рис. 1). За время использования технология показала свою высокую информативность и активно применяется в деятельности Службы срочных донесений и Службы предупреждения о цунами в Камчатском и Сахалинском филиалах ФИЦ ЕГС РАН, включающей оперативное оповещение заинтересованных ведомств об интенсивности сотрясений в районах пунктов наблюдений.

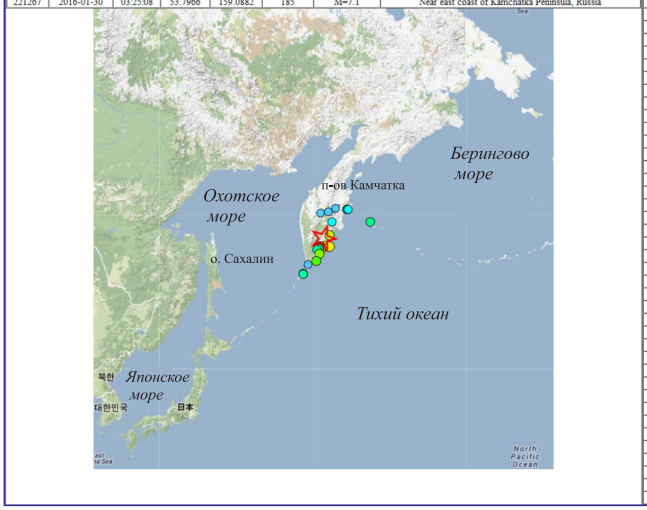
Модернизирована программа автоматического определения гипоцентров землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН, которая позволяет автоматически вычислять основные параметры землетрясения в первые минуты после его возникновения. Алгоритм поиска решения реализован с использованием времён первых вступлений продольных волн. Результат представляется в виде карты с положением эпицентров последних 20 зарегистрированных землетрясений и приведением их основных параметров.

Созданы алгоритм и программное обеспечение для локации источников вулканического дрожания по кросскорреляционным функциям и определения интенсивности вулканического дрожания в автоматическом режиме. Алгоритм основан на суммировании огибающих

Информация о сильном землетрясении

0 - 1 | 1 - 2 | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | 6 - 7 | 7 - 8 | 8 - 9 | 9 - 10 | 10 - 11 | 11 - 12

№ п/п	Дата UTC	Время UTC	Координаты		Глубина км	Магнитуда	Район произошедшего ЗМТ
			Широта	Долгота			
221267	2016-01-30	03:25:08	53.7966	159.0882	185	M=7.1	Near east coast of Kamchatka Peninsula, Russia



Код пункта ССД	Местонахождение пункта ССД	Интенсивность сотрясений в пункте ССД по шкале MSK-64, балл	Примечание
GPN	Жупаново	5-6	67 km
NLC	Напычево	5-6	72 km
NII	НИИГТЦ	5	85 km
GK003	Школа №40	5	86 km
AER	Аэрологическая станция	4-5	87 km
SPZ	Звездный	4-5	87 km
IVS	Институт	5	87 km
DCH	Дачная	5	87 km
PTG	Горького	5	88 km
DAL	Дальний	4	88 km
MSN	Мишенная	6	89 km
GK004	Камчатская краевая больница	5	89 km
VST	Высотная	4	90 km
GK005	МЧС	4-5	91 km
PET	Петропавловск	4	91 km
ADM	Администрация_ПК	4-5	91 km
GK002	Школа №2	4-5	94 km
GK001	Школа №3	4	96 km
NIC	Николаевка	4	97 km
SCH	Школа №17	4-5	97 km
SPN	Шипунский	6	98 km
MPPA	Маяк	6-7	104 km
RIB	Рыбачий	5	105 km
VIL	Вилючинск	4-5	107 km
KRM	Карымшина	4-5	125 km
RUS	Русская	5-6	157 km
TUMD	Тумрок	4	178 km
KDT	Ходутка	5	231 km
ESO	Эссо	3	239 km
KOZ	Козыревск	3	257 km
PAU	Паужетка	3	301 km
KLY	Ключи	3	302 km
UK3	Морской порт	4	348 km
UK4	Автодор	4-5	349 km
UK2	Водозабор	4	354 km
UK1	Администрация_УК	4	354 km
KBG	Усть-Камчатск Крутоберегово	4	359 km
SKR	Северо Курильск	4-5	403 km
SK2	Плато	4-5	407 km
BKI	Никольское о.Беринга	4-5	473 km

Рис. 1. Карта Камчатки с прилегающими территориями, таблица пунктов ССД с инструментальной оценкой интенсивности сотрясений, вызванных землетрясением 30.01.2016 г. в 03^h25^m с K_S=15.7, *ML*=7.1 (показано звездой на карте).

Информация приводится для пунктов, интенсивность в которых превышает 2 балла

кросскорреляционных функций [*Droznin et al.*, 2015].

Разработаны алгоритм и программное обеспечение для автоматического детектирования сейсмических событий в условиях, когда стандартная рутинная обработка затруднена, например, при регистрации роя вулканических землетрясений или многочисленных афтершоковых последовательностей после сильных тектонических событий. Процедура автоматического детектирования землетрясений встроена в разработанную ранее в КФ ФИЦ ЕГС РАН программу обработки DIMAS [*Дрознин*, *Дрознина*, 2010] и внедрена для решения задач сейсмического мониторинга. При использовании автоматической процедуры создаётся станционный бюллетень, который включает время и энергетическую оценку всех событий, зарегистрированных выбранной станцией. Совместно с каталогом землетрясений, созданным после автоматизированной обработки, наличие в оперативном режиме автоматически сформированного станционного бюллетеня даёт более полную информацию о характере развития афтершокового процесса и о сейсмической активности в регионе. Это позволяет в оперативном режиме замечать и прослеживать аномалии сейсмического режима.

Модифицирован алгоритм и разработано программное обеспечение для выделения вулканических событий с помощью согласованного фильтра [*Галина и др.*, 2020]. Процессы, происходящие на вулканах, сопровождаются различными сейсмическими событиями, имеющими подобные волновые формы. Один из эффективных методов обнаружения известного сигнала в шумных временных рядах основан на вычислении функции корреляции шаблонного сигнала с последовательными участками рядов данных. Части сигнала, обладающие высокой степенью сходства с эталоном, приведут к высокому значению корреляционной функции. Такую процедуру принято называть согласованным фильтром [*Van Tress*, 1968]. Процесс детектирования вулканических событий происходит в интерактивном режиме, процедура встроена в программу обработки DIMAS [*Дрознин*, *Дрознина*, 2010] и происходит в два этапа. Во-первых, уточняется эталонный сигнал путём суммирования всех событий, для которых коэффициент корреляции превышает заданный пользователем порог. Во-вторых, выделяются все события, для которых коэффициент корреляции с уточнённым эталоном превышает заданное значение. На рис. 2 приведён пример детектирования событий. Вертикальными красными линиями (рис. 2а) отмечены все события, для которых расчётный коэффициент корреляции (рис. 2б) превышает значение, заданное пользователем. Использование данной автоматизированной процедуры особенно актуально в периоды повышенной сейсмической

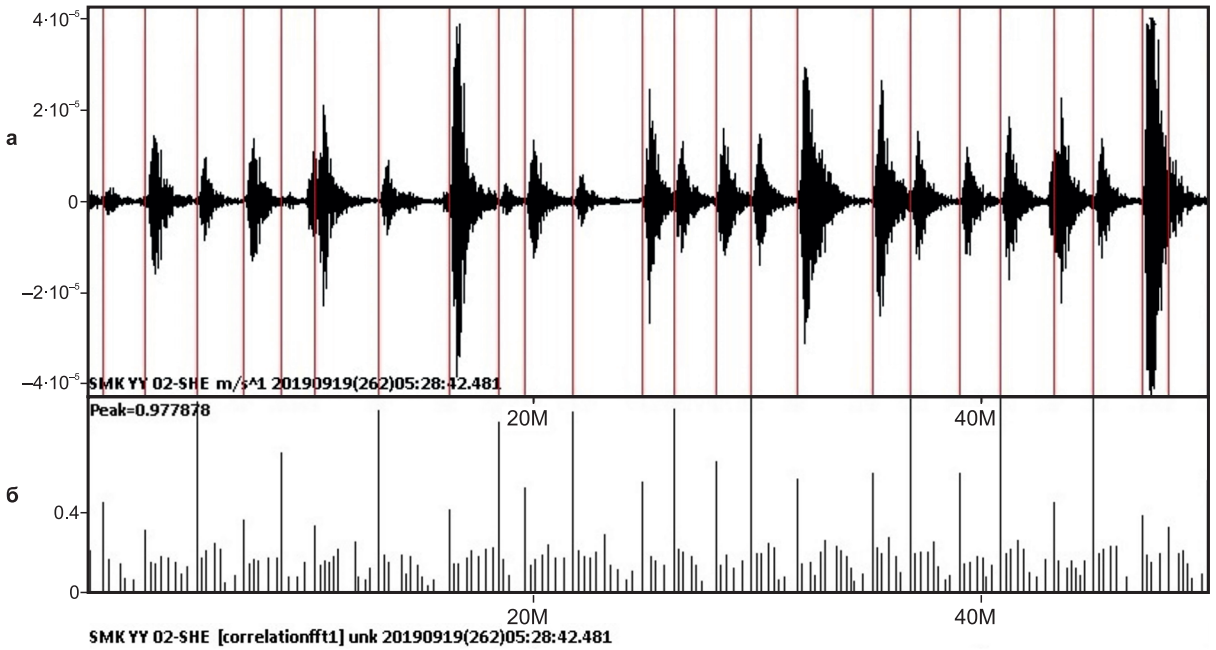


Рис. 2. Окно программы обработки DIMAS – поиск сигналов, принадлежащих кластеру поверхностных событий в постройке вулкана Шивелуч: а – оригинальный сейсмический сигнал с выделенными событиями; б – рассчитанный коэффициент корреляции

активности на вулканах, когда число вулканических землетрясений настолько велико, что определить параметры всех событий в оперативном режиме не представляется возможным.

Для обеспечения надёжного хранения сейсмических данных и организации архива в корпоративной сети КФ ФИЦ ЕГС РАН установлены два новых сервера с RAID массивами ёмкостью 90 *Тб*, которые расположены в разных зданиях и объединены оптоволоконным каналом связи. На этих серверах хранятся две полные копии первичных данных. Третья копия формируется и хранится на магнитных лентах стандарта LTO-6. С целью проведения работ по углублённой обработке сейсмических данных сервер (архив) подключён высокоскоростным каналом InfiniBand 40 *Gb/s* к вычислительному кластеру HPC. Архив сейсмических данных включает записи за период с 1996 г. по настоящее время. На текущий момент размер архива составляет приблизительно 60 *Тб*.

Проведены работы по реорганизации архива непрерывных сейсмических данных, поступивших с сети сбора КФ ФИЦ ЕГС РАН по каналам связи в реальном времени и в отложенном режиме (на съёмных носителях). Способ хранения данных в виде суточных файлов по сетям и группам станций изменён на метод хранения суточных файлов по сейсмическим каналам станций в формате MiniSeed. Это значительно упростило и ускорило доступ к первичным данным.

Кроме того, развёрнуты и модернизированы системы видеонаблюдения за вулканами Авача, Корякская сопка, Эбеко и за вулканами на островах Кунашир (Менделеева и Тятя) и Итуруп (Баранский, Хмельнитский и Грозный). Проведены работы по совершенствованию системы видеонаблюдений, включающие тестирование нового оборудования для съёмки в разных спектрах и создания приложений для работы с ним. В 2016–2020 гг. сотрудниками КФ ФИЦ ЕГС РАН проводились работы по обновлению и модернизации систем сбора непрерывных сейсмических данных в «ИОЦ Южно-Сахалинск» и «ИОЦ Владивосток». В «ИОЦ Владивосток» в сеть сбора включены две новые сейсмические станции «Посьет» и «Полтавка», а также реорганизована программная инфраструктура сервера первичной буферизации сейсмических данных.

Единая информационная система. Одним из самых важных информационных продуктов КФ ФИЦ ЕГС РАН и основным ресурсом, предоставляющим научному сообществу сейсмологические данные, накопленные за период детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке, является Единая информационная система сейсмологических данных (ЕИС СД). Разработка системы началась в 2010 г. с целью максимального внедрения автоматизации: сбора, анализа, систематизации, управления и доступа к сейсмологическим данным. ЕИС СД непрерывно развивается, и за последние пять лет значительно расширены функционал системы и спектр выполняемых задач [*Чеброва и др.*, 2020].

Разработаны дизайн и функциональные возможности главной страницы web-интерфейса ЕИС СД (http://sdis.emsd.ru), обеспечивающие быстрый переход к одному из четырёх информационных разделов, функционирующих в настоящее время: интерактивная карта, макросейсмический опросник, информация о землетрясениях, информация о сейсмических станциях. По данным Google Analytics (https://analytics.google.com/), ежемесячно с ЕИС СД через web-интерфейс работают до 200 активных пользователей. Кроме пользователей из России, сайт активно используют представители Франции, США, Китая, Украины, Германии, Нидерландов, Японии, Польши, Северной Африки и др. Англоязычная аудитория составляет 10% пользователей (рис. 3).

Рис. 3. Активные пользователи ЕССД за период 2019–2020 гг. по данным Google Analytics. Круговая диаграмма по странам

Разработана и введена в эксплуатацию система регистрации пользователей через web-интерфейс ЕИС СД, в которой данные предоставляются в соответствии с уровнем доступа. Внешние незарегистрированные пользователи имеют ограниченные возможности по получению информации как по типу данных: каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов, каталог службы срочных донесений, каталог механизмов и общий список сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН, так и по характеристикам самих данных: период выборки, минимальная магнитуда землетрясений и т.д.

Важной частью ЕИС СД является подсистема для дополнения информации о землетрясениях мировыми данными [*Матвеенко и др.*, 2016]. Подсистема позволяет в автоматическом режиме загружать из бюллетеня Международного сейсмологического центра (ISC) результаты обработки сейсмических событий (РОСС), полученные различными сейсмологическими агентствами, и соотносить их с землетрясениями из базы данных ЕИС СД. Для сопоставления РОСС был разработан алгоритм, позволяющий большую часть РОСС соотносить с землетрясениями без участия оператора. Алгоритм разрабатывался на основе данных Каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов 1962–2009 гг., сопоставленных с землетрясениями сейсмологических агентств (ISC, NEIC и GCMT/HRV) вручную при формировании Банка сейсмологических данных. В настоящее время подсистемой загружена информация о более чем 36 тысячах событий, произошедших за период 1962–2020 гг., из которых 18 тысяч соотнесены с событиями из бюллетеня КФ ФИЦ ЕГС РАН. Для доступа к результатам работы подсистемы в web-интерфейсе ЕИС СД создан раздел «Информация о камчатских землетрясениях по данным различных агентств».

В конце 2017 г. началась разработка нового раздела сайта ЕИС СД – «Интерактивная карта землетрясений Камчатки» (рис. 4, http://glob.emsd.ru/sdis-interactive-map/) [*Чемарев*, *Чеброва*, 2019]. В настоящий момент работают два варианта интерактивной карты: первый для внешних пользователей и второй – для пользователей локальной сети КФ ФИЦ ЕГС РАН, с расширенным функционалом. Интерактивная карта позволяет в наглядном виде получать информацию о землетрясениях из каталога Камчатки и Командорских островов. В этом разделе можно осуществлять поиск землетрясений по основным параметрам, просматривать дополнительные параметры событий, такие как механизмы очагов, макросейсмическая и инструментальная интенсивность, а также сохранять информацию о выбранных землетрясениях в файл. Для внешних пользователей каталог землетрясений ограничен по классу ($K_S \geq 8.5$) и отсутствует возможность просматривать дополнительные параметры землетрясений. Карта спроектирована с возможностью добавления в качестве источников данных различных сейсмологических агентств. Так, на карте, доступной для внешних пользователей, есть возможность выбора следующих источников данных: «КФ ФИЦ ЕГС РАН», «СФ ФИЦ ЕГС РАН» (РИОЦ Сахалин), USGS (NEIC PDE).[1]

В 2017 г. в ЕИС СД внедрена подсистема для формирования и хранения волновых форм (ВФ) землетрясений [*Чеброва и др.*, 2019]. Формирование архива ВФ ведётся автоматически в режиме, близком к реальному времени, с возможностью создания ВФ за предыдущие годы. Подсистема автоматически контролирует полноту данных архива и может восполнять недостающую информацию. На данный момент архив волновых форм камчатских землетрясений содержит ВФ, соответствующие всем землетрясением каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов с $K_S \geq 8.5$ с 2013 года.

С 2018 г. организовано формирование архива спектральной плотности мощности шума на регистрирующих каналах [*Чеброва*, *Матвеенко*, 2015], что стало одним из этапов по внедрению подсистемы для наблюдения за сейсмометрическими каналами сети сейсмических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН. Создана автоматизированная система, с помощью которой ежемесячно обрабатываются непрерывные записи всех сейсмометрических каналов (более 400), работающих на Камчатке и Дальнем Востоке. Кроме того, обрабатываются суточные сейсмические записи за предыдущие годы. В настоящее время архив включает спектры плотности мощности шума за период с 2013 г. по настоящее время минус один месяц. Результаты работы системы представлены в виде графиков функции плотности вероятности по непрерывным суточным записям, суточных и сезонных вариаций сейсмического шума, а также модели шума за весь период расчётов. Эти данные доступны зарегистрированным пользователям с уровнем «специалист» и выше, а также для пользователей локальной сети организации через web-интерфейс ЕИС СД.

С целью сохранения архивных записей аналоговых сейсмических приборов, работавших с 1962 по 2006 г., в 2019 г. началась работа по формированию базы данных цифровых копий бумажных сейсмограмм [*Ромашева и др.*, 2019]. Для автоматизации работы по загрузке копий сейсмограмм и обеспечению доступа к загруженным данным была разработана и внедрена в работу подсистема «Цифровой архив копий бумажных сейсмограмм», состоящая из базы данных и web-интерфейсов. Внесение и просмотр данных доступен только сотрудникам организации. К настоящему времени в БД загружена информация о более чем

[1] USGS. Latest Earthquakes. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/ (дата обращения: 25.11.2019).

2000 сейсмограммах, объём цифровых копий сейсмограмм превышает 1.5 *Тб*.

В 2020 г. проведена реновация сайта организации (www.emsd.ru и glob.emsd.ru), который функционирует в тестовом режиме с 2019 года. По данным системы Google Analytics (рис. 5), с февраля по декабрь 2020 г. на сайте КФ ФИЦ ЕГС РАН было более 46 тыс. просмотров. Пик использования ресурса – 2098 просмотров в сутки (новость от 6 октября 2020 г. – «Экологическое бедствие на Халактырском пляже и геодинамические явления: есть ли связь?»).

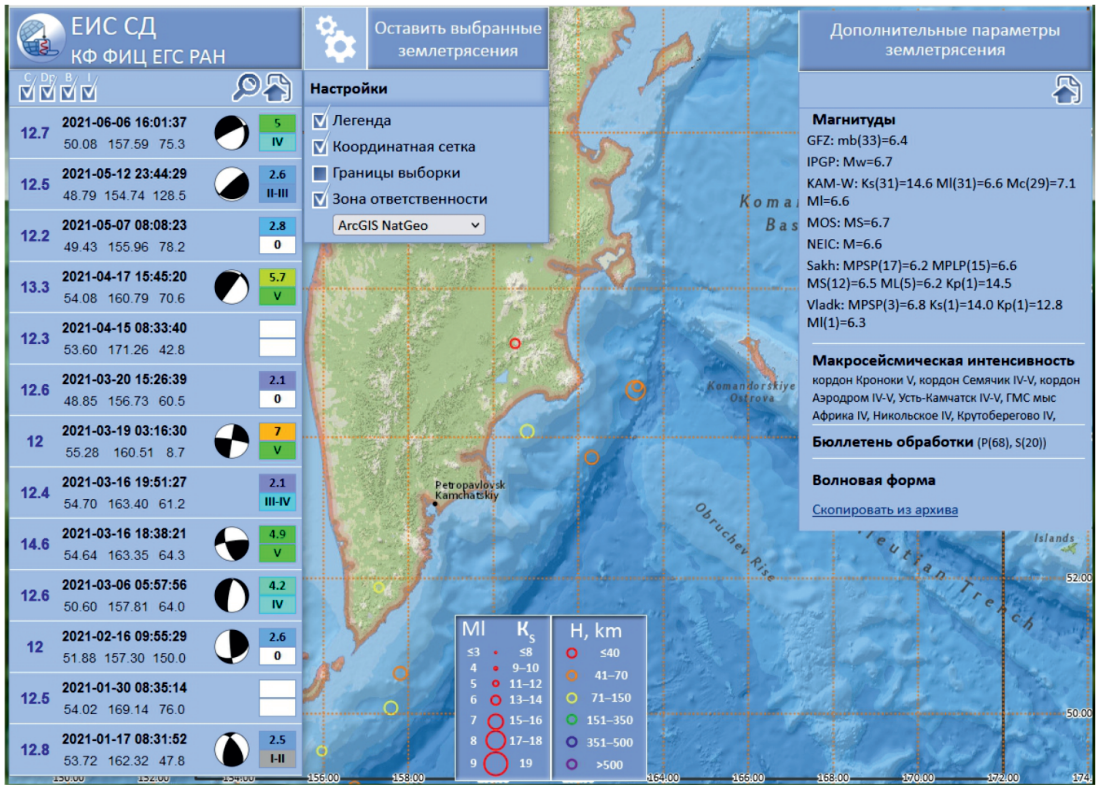


Рис. 4. Интерактивная карта землетрясений Камчатки

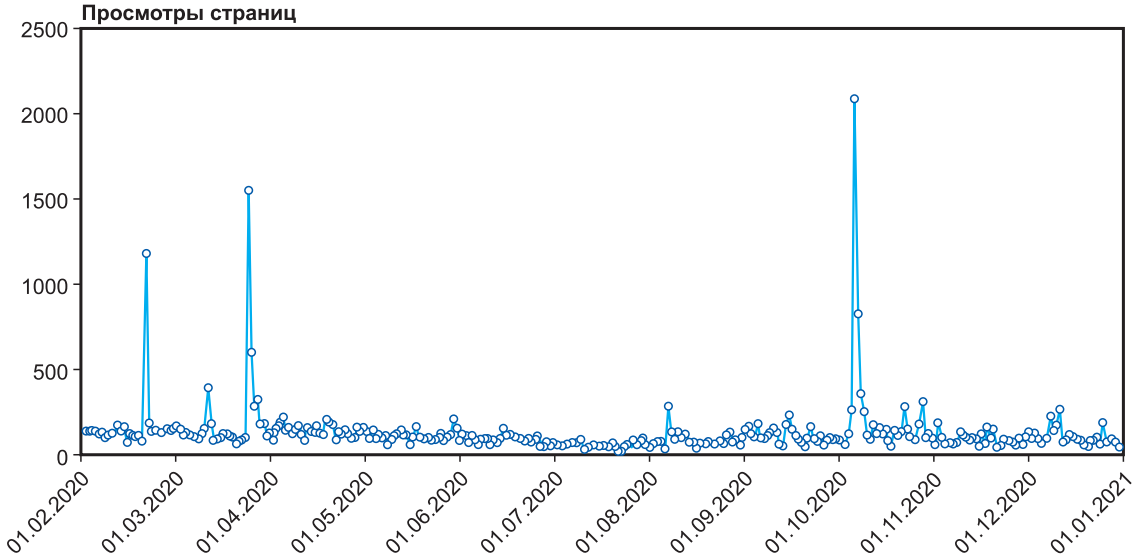


Рис. 5. Просмотры страниц сайта КФ ФИЦ ЕГС РАН
за период с 1 февраля по 31 декабря 2020 г. по данным Google Analytics

2. Результаты сейсмического мониторинга Камчатки в 2016–2020 гг.

Оценка сейсмичности по оперативным данным. С 1 января 2016 г. по 31 декабря 2020 г. определены параметры 38579 тектонических землетрясений (рис. 6а). Из них 37774 события локализовано в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН, а 805 – за её пределами (большинство в полосе 48.0–49.0°N). В их числе 7413 (8113) землетрясений с локальной магнитудой ML≥3.5 (K_S≥8.5), 90 (100) – с ML≥5.5 (K_S≥12.5) и 26 (27) землетрясений – с ML≥6.3 (K_S≥14.0). В скобках указано соответствующее количество для максимальных границ планшета. Диапазон энергетических классов землетрясений каталога K_S=1.8–16.8, интервал глубин от –0.9 до 630 *км*. Значение сейсмической энергии, выделившейся при этих землетрясениях, составляет $1{\cdot}10^{17}$ *Дж*. В целом положение эпицентров является обычным для региона: большая часть землетрясений относится к зоне субдукции Тихоокеанской плиты.

Рассмотрим семь наиболее значительных с K_S≥15.0 (ML≥6.8) землетрясений зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН, зарегистрированных в период 2016–2020 гг., выделенных на карте и обозначенных цифрами в хронологическом порядке (рис. 6б).

Сильнейшее на территории Камчатки и Командорских островов в 2016 г. землетрясение (№ 1 на рис. 6б) с ML=7.1 (K_S=15.7, M_C=7.1) зарегистрировано 30 января в 03^h25^m в районе Жупановской группы вулканов. Гипоцентр землетрясения находился примерно в 100 *км* к северу от Петропавловска-Камчатского на глубине 178 *км* (рис. 6б). Исходя из географического

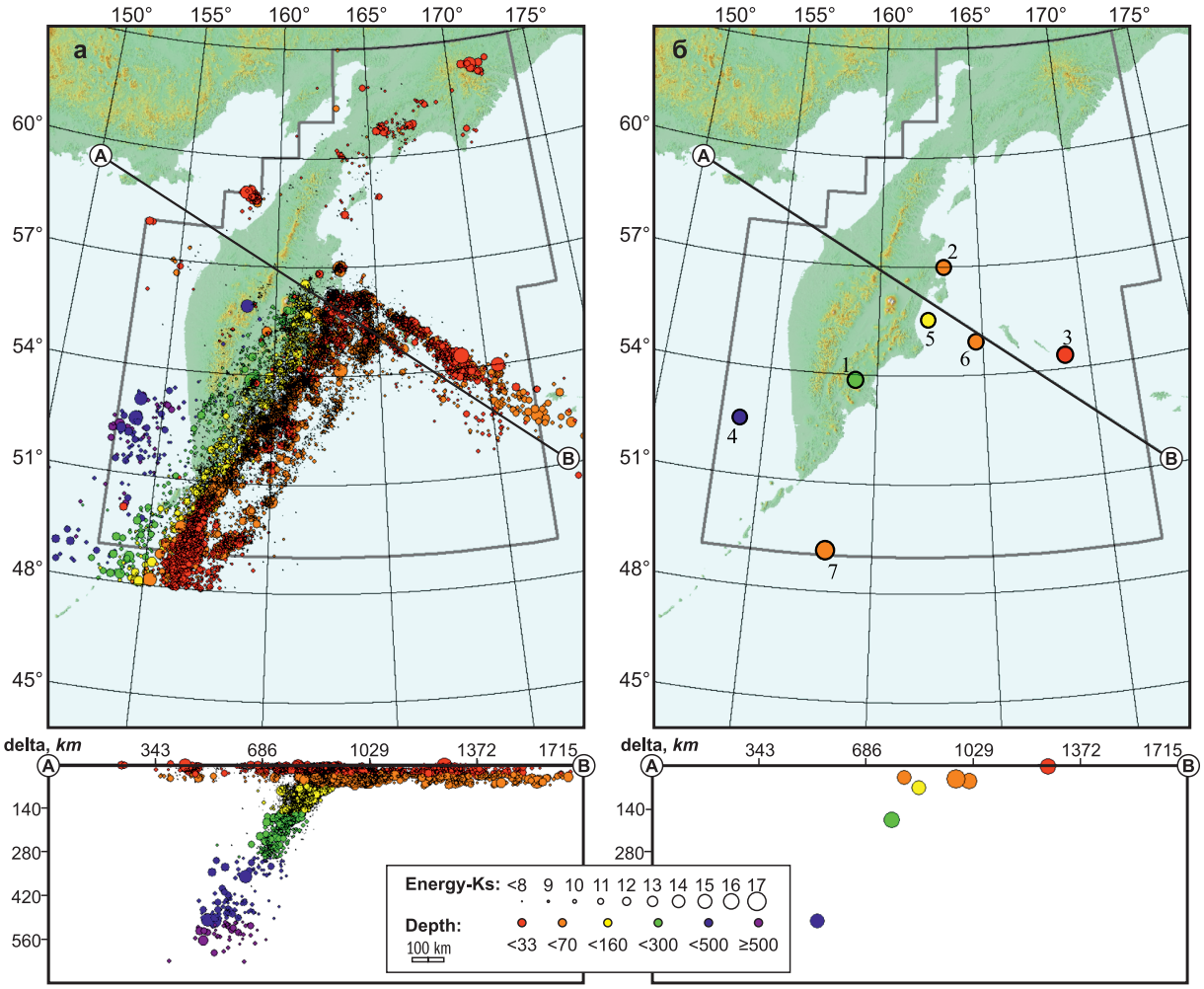


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений и проекция гипоцентров на вертикальную плоскость по линии AB, определённые в оперативном режиме в период 01.01.2016 г. – 31.12.2020 г.: а – все обработанные землетрясения; б – землетрясения с K_S≥15.0 (ML≥6.8).

Диаметр окружности соответствует энергетическому классу землетрясения, заливка – глубине гипоцентра. Серая ломаная линия – граница зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН

положения, сейсмическое событие было названо Жупановским землетрясением [*Чебров и др.*, 2016]. После основного толчка регистрировалась афтершоковая активность. Всего до конца октября помещено в каталог 159 событий из эпицентральной области. Большая часть афтершоков реализовалась в первые десять суток после главного толчка. Самый сильный афтершок с K_S=11.6 произошёл 30 января через 17 *мин* после основного события.

В 2017 г. зарегистрировано землетрясение (2) с *ML*=6.8 (K_S=15.0, M_C=7.2), которое произошло 29 марта в 04^h09^m в западной части Берингова моря. Его гипоцентр находился в южной части залива Озерной примерно в 90 *км* к северо-востоку от пос. Усть-Камчатска на глубине ~43 *км*. Сейсмическое событие было названо Южно-Озерновским землетрясением (ЮОЗ) [*Чебров и др.*, 2017б]. С 29 марта по 17 июля в очаговой области ЮОЗ зарегистрировано 440 событий в диапазоне энергетических классов K_S=5.8–12.5. Более 50% афтершоков (226 событий) произошло в первые двое суток после основного толчка, в т.ч. два сильнейших афтершока с магнитудой *ML*=5.5: 29 марта в 05^h27^m и 30 марта в 21^h24^m.

Сильнейшее на территории Камчатки и Командорских островов землетрясение в 2017 г. (3) с *ML*=7.3 (K_S=16.1, M_C=8.2, *Mw*=7.8) произошло 17 июля в 23^h34^m в Командорском сегменте Алеутской островной дуги. Гипоцентр находился в 200 *км* к юго-востоку от села Никольское (о. Беринга) на глубине 7 *км*. Событие было названо Ближне-Алеутским землетрясением (БАЗ) [*Чебров и др.*, 2017а]. За 12.5 часов до основного толчка, начиная с землетрясения с K_S=13.8 в 11^h05^m, регистрировалась форшоковая активность. Всего до главного события в радиусе 250 *км* от местоположения его эпицентра локализовано 32 землетрясения в энергетическом диапазоне $7.5 \le K_S \le 13.8$. БАЗ сопровождалось серией афтершоков. До конца октября в очаговой зоне удалось определить основные параметры 660 событий с энергетическим классом K_S=6.2–13.0. Самый сильный афтершок с K_S=13.0 зарегистрирован 18 июля в 06^h02^m вблизи о. Медный.

13 октября 2018 г. в 11^h10^m произошло землетрясение (4) с *ML*=7.0 (K_S=15.4, M_C=6.3) в акватории Охотского моря. Гипоцентр землетрясения определён на глубине ~500 *км* примерно в 320 *км* к западу от Петропавловска-Камчатского и ~160 *км* от ближайшего населённого пункта – пос. Октябрьский [*Чебров и др.*, 2019в]. Окончательная обработка землетрясения проведена по данным 68 станций, находящихся на Дальнем Востоке России и территориях сопредельных государств. Единственный афтершок с K_S=9.9 зарегистрирован 14 октября в 01^h28^m.

14 ноября 2018 г. в 21^h21^m в Камчатском заливе произошло сильное землетрясение (5) с *ML*=6.8 (K_S=15.0, M_C=6.8). Гипоцентр определён на глубине ~75 *км* примерно в 80 *км* к югу от пос. Усть-Камчатска. В первые двое суток зарегистрировано 130 событий в радиусе 30 *км* от эпицентра сильного землетрясения. Всего до конца года обработано и помещено в каталог 212 событий в энергетическом диапазоне $5.3 \le K_S \le 11.7$. Самый сильный афтершок с K_S=11.7 зарегистрирован через восемь минут после главного события 14 ноября в 21^h29^m.

Сильнейшее в 2018 г. в каталоге Камчатки и Командорских островов землетрясение (6) с *ML*=7.3 (K_S=16.1, M_C=7.7) произошло 20 декабря в 17^h01^m на крайнем северо-западе Тихого океана немного южнее области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской дуг. Гипоцентр определён на глубине ~54 *км* примерно в 90 *км* к западу от ближайшего населённого пункта – села Никольское, расположенного на о. Беринга (Командорские о-ва). Эпицентральная область землетрясения пересекла небольшое Угловое поднятие, возвышающееся на океанической стороне Камчатского и Алеутского желобов над районом их сочленения. Поэтому рассматриваемое сейсмическое событие было названо землетрясением Углового Поднятия (ЗУП) [*Чебров и др.*, 2020].

За основным толчком ЗУП последовала длительная и многочисленная серия афтершоков. С 20 декабря 2018 г. по 31 мая 2019 г. в радиусе 80 *км* от его эпицентра зарегистрировано 3562 афтершока в энергетическом диапазоне $5.1 \le K_S \le 14.6$. Подавляющее число афтершоков (~76%) произошло в течение первого месяца после главного толчка. В связи с ежедневной регистрацией большого количества событий как из эпицентральной области ЗУП, так и в вулканических районах Камчатки, в оперативном режиме удавалось обработать и поместить в каталог только наиболее сильные афтершоки с $K_S \ge 10.5$. Более слабые землетрясения афтершоковой последовательности определялись в отложенном режиме по возможности. Задержку в обработке удалось устранить только к концу апреля 2019 года. Самый сильный афтершок с *ML*=6.6 (K_S=14.6, M_C=6.8) зарегистрирован 24 декабря в 12^h41^m.

В каталоге КФ ФИЦ ЕГС РАН для ЗУП приводятся оценки точности локации гипоцентра ~24 *км* в плане и по глубине, принятые

в настоящее время при рутинной обработке. Использование статистического метода [*Дрознин и др.*, 2019] определения положения гипоцентра и времени в очаге, в котором решением является распределение вероятности этих величин, показывает, что благодаря большому количеству станций, зарегистрировавших основное событие и его сильнейшие афтершоки, а также хорошему окружению станциями эпицентров, удалось получить более точные оценки.

Сильнейшее в 2020 г. в каталоге Камчатки и Командорских островов землетрясение (7) с ML=7.7 (K_S=16.8, M_C=7.5) произошло 25 марта 2020 г. в 02^h49^m. Гипоцентр его определён в Тихом океане на траверсе Четвёртого Курильского пролива на южной границе зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в 220 *км* к юго-востоку от г. Северо-Курильска на глубине ~48 *км*. Окончательная обработка землетрясения проведена по данным 56 станций, находящихся на Камчатке (постоянные станции КФ) и Алеутских о-вах (станции сети GSN), было использовано 56 фаз *P*-волн и 22 фазы *S*-волн. После него стала регистрироваться афтершоковая последовательность. До конца мая 2020 г. в очаговой области сильного землетрясения (в радиусе 70 *км* от его эпицентра) локализовано 516 событий, из них более 80% произошло в первые две недели. Из-за высокой интенсивности процесса на его начальной стадии наиболее слабые афтершоки были обработаны в отложенном режиме. Самый сильный афтершок с ML=5.8 (K_S=13.2) зарегистрирован 14 июня в 21^h23^m.

Представительность каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН. Уровень представительности регистрируемых землетрясений является важным параметром, характеризующим возможности сейсмометрической сети по мониторингу сейсмической обстановки. Под представительностью обычно понимается нижний энергетический уровень землетрясений, которые могут быть зарегистрированы в заданной пространственной области без пропусков. Следует различать теоретическую представительность и фактическую, наблюдающуюся в действительности. Теоретическая представительность может быть оценена исходя из уровня сейсмических шумов на станциях регистрации, чувствительности регистрирующей аппаратуры, задаваемого поглощения сейсмических волн средой и необходимого для локации числа сейсмических станций. Такая представительность является параметром сети сейсмических станций и характеризует возможности этой сети с учётом принятых допущений. Больший интерес представляет оценка фактической представительности, которая будет характеризовать качество получаемого каталога.

Как показано в [*Салтыков*, 2019], оценка региональной представительности по графику Гутенберга-Рихтера для больших пространственных областей некорректна, поэтому реальная представительность каталога землетрясений Камчатки может быть оценена путём сканирования сейсмоактивной области ячейками относительно небольшого размера и последующим объединением полученных результатов. Применяющаяся методика расчёта представительности выборки из каталога землетрясений также описана в [*Салтыков*, 2019].

На рис. 7 представлены карты с различной степенью детализации, которая определяется пространственным масштабом вариаций представительности каталога. В условиях плотной расстановки сейсмостанций вблизи действующих вулканов целесообразно использовать сканирование единичными ячейками с радиусом несколько километров (в представленном варианте R=4 *км*), а для демонстрации региональных эффектов радиус увеличен до нескольких десятков км (в представленном варианте R=50 *км*). Как следует из рис. 7а, представительность Камчатского каталога в целом может быть оценена как K_S=7.7 (ML_c=3.1) (районы Алеутских островов, восточнее Командорских островов и Курильские острова исключаются из рассмотрения).

Статистическая оценка уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09». Для качественной оценки уровня сейсмичности в заданном пространственно-временном интервале используется шкала и методика «СОУС'09» [*Салтыков*, 2011], согласно которой состояние сейсмичности региона оценивается по эмпирической функции распределения сейсмической энергии, выделившейся за определённый временной интервал:

$$F(K)=P(\lg E \le K),$$

где E – суммарная сейсмическая энергия в *Дж*. В соответствии с предложенной шкалой делается заключение о состоянии сейсмичности региона:

– экстремально высокий – $F(\lg E)>0.995$;
– высокий – $0.975<F(\lg E)<0.995$;
– фоновый – $0.025<F(\lg E)<0.975$;
– низкий – $0.005<F(\lg E)<0.025$;
– экстремально низкий – $F(\lg E)<0.005$.

Согласно такой градации, в 95% случаев сейсмичность находится на фоновом уровне. При необходимости его можно разбить на три подуровня:

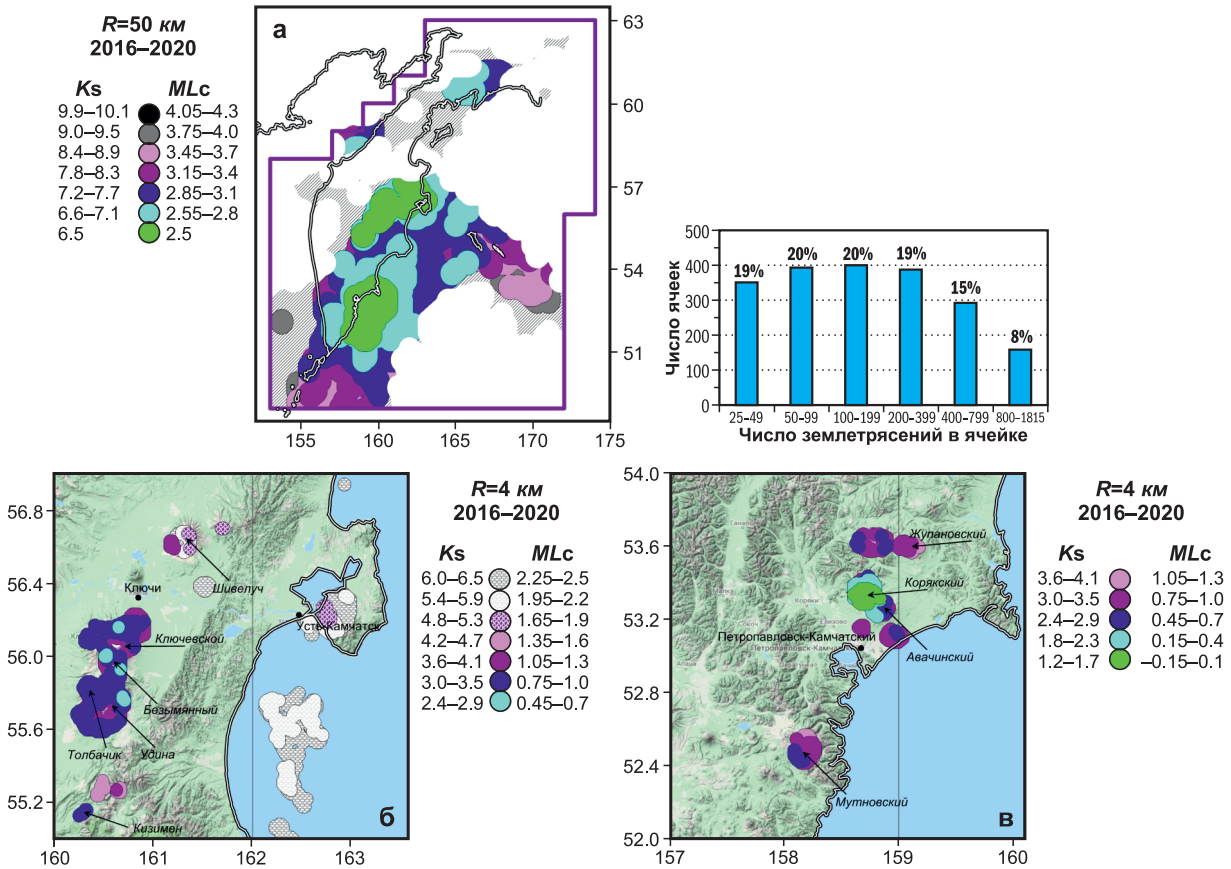


Рис. 7: а – карта региональной представительности каталога землетрясений 2016–2020 гг. в зоне ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН. Не закрашенной области соответствует отсутствие землетрясений в 2016–2020 гг. Светло-серый цвет обозначает территории, где плотность землетрясений представительной магнитуды ML_C не достигла порогового для расчёта уровня N=25 на единичную ячейку (здесь радиусом R=50 *км*); б – карта локальной представительности каталога землетрясений 2016–2020 гг. в районе Северной группы вулканов. Радиус единичной ячейки при сканировании R=4 *км*; в – карта локальной представительности каталога землетрясений 2016–2020 гг. районе г. Петропавловска-Камчатского. Радиус единичной ячейки при сканировании R=4 *км*

– фоновый (пониженный) – $0.025<F(\lg E)<0.15$;
– фоновый (средний) – $0.15<F(\lg E)<0.85$;
– фоновый (повышенный) – $0.85<F(\lg E)<0.975$.

До недавнего времени оценки уровня сейсмичности по шкале «СОУС'09» в КФ ФИЦ ЕГС РАН делались лишь для заранее выбранных полигонов. В настоящее время разработана, протестирована и введена в практику (в экспериментальном режиме) методика построения карт (площадного распределения) этого параметра в заданном временном интервале при заданной детальности. Детальность определяется размером единичной ячейки при поверхностном сканировании. Это позволяет получать оценки уровня сейсмичности как в региональном (при радиусе ячейки R=200–300 *км*), так и в локальном (при радиусе R=50 *км* и менее) масштабах. Примеры таких карт приведены на рис. 8. Крупномасштабные карты позволяют выявить локальные особенности сейсмичности типа затишья, а мелкомасштабные – дать оценку сейсмичности для региона в целом.

При выделении объекта (полигона, ячейки), представляющего интерес с какой-либо точки зрения, для него строится СОУС-грамма, позволяющая анализировать развитие сейсмического процесса во времени (рис. 9). В соответствующем цвете на диаграмме отображается временной ход уровня сейсмичности (ось абсцисс) в зависимости от величины скользящего временного окна (ось ординат) для выбранной пространственной области.

Как правило, высокие уровни сейсмичности связываются с возникновением сильных землетрясений (рис. 9а). Соответственно, области с низким уровнем сейсмичности могут быть связаны с появлением сейсмических затиший. На рис. 9б показан пример такой сейсмической

аномалии. Следует иметь в виду, что пороговые значения шкалы «СОУС'09» являются уникальными для каждой пространственной области и выбранной величины временного окна. Например (рис. 9а), землетрясение 20.12.2018 г. с магнитудой *ML*=7.3 определяет экстремально высокий уровень сейсмичности для Камчатки в целом на временном интервале до четырёх месяцев, а для больших интервалов – высокий. Отметим, что землетрясение 06.07.2018 г. с *ML*=6.7 (рис. 9а) предварялось снижением уровня сейсмичности Камчатки в целом до низкого и даже экстремально низкого уровня во временных окнах 5–16 суток. Этот эффект не единичен, он выявлен многократно, что свидетельствует о перспективах использования методики «СОУС'09» в исследованиях предвестников сильных землетрясений.

Макросейсмические наблюдения. Вся информация об ощутимых землетрясениях в круглосуточном режиме поступает в макросейсмическую БД (МБД) [*Митюшкина, Раевская и др.,* 2015] либо с помощью интернет-опросника (http://www.emsd.ru/lsopool/poll.php) [*Митюшкина, Токарев и др.*, 2011], который заполняется респондентами согласно своим ощущениям, либо с помощью локальной web-страницы, разработанной для специалиста, проводящего опрос респондентов. Обработка поступающей информации и доступ к данным МБД осуществляются с помощью специального приложения «The Power» (The Poll Viewer) [*Митюшкина и др.*, 2013; *Токарев и др.*, 2015], позволяющего комплексно работать с макросейсмическими данными. Настоящая система сбора, обработки и доступа к макросейсмической информации подробно представлена в работах [*Митюшкина*, *Раевская*, 2015; *Чеброва и др.*, 2019].

На территории Камчатского края, Северных Курил и Командорских островов в 2016–2020 гг. ощущалось 516 землетрясений (K_S=7.4–16.8) с интенсивностью сотрясений от 2 до 6–7 баллов, из них 218 землетрясений с K_S≥11.5 (рис. 10). По этим событиям были собраны 3808 сообщений об ощутимости землетрясений в 162 пунктах, включая 1809 сообщений независимых респондентов, которые воспользовались Интернет-опросником. За 2016–2020 гг. в МБД добавлено 95 макросейсмических пунктов. В настоящее время МБД содержит информацию о 4227 ощутимых землетрясениях (K_S=6.1–17.0) за период наблюдений 1962–2020 гг., количество макросейсмических пунктов – 675. Следует отметить, что в 2020 г. количество сообщений от независимых респондентов существенно повысилось, что совпадает по времени с появлением новой версии сайта КФ ФИЦ ЕГС РАН (http://glob.emsd.ru) и создания страниц в соцсетях: https://www.youtube.com/c/kbgsras и https://www.instagram.com/kbgsras.

В период наблюдений 2016–2020 гг. максимальная интенсивность сотрясений и большая площадь макросейсмических проявлений наблюдалась в 2018 и 2020 гг. Самые сильные сотрясения 6–7 баллов были зафиксированы при землетрясении 6 июля 2018 г. в 01^h40^m (K_S=14.9, сиреневый кружок на рис. 10) в ближайших пунктах на ГМС Водопадная (Δ=54 *км*) и маяке Круглый (Δ=84 *км*), расположенных на юге восточного побережья полуострова Камчатка севернее эпицентра (на рис. 10 – сиреневые крестики). Землетрясение вызвало слабые повреждения зданий. Недалеко от ГМС был обнаружен обвал скалы в значительном объёме. По данным станции сильных движений KDT, расположенной вблизи ГМС, инструментальная интенсивность составила 7.3 балла. Это землетрясение вызвало сотрясения от 2 до 5 баллов ещё в 32 населённых пунктах (Δ=54–332 *км*).

Интенсивность сотрясений 6–7 баллов была зафиксирована и во время сильного землетрясения 25 марта 2020 г. в 02^h49^m (K_S=16.8, красный кружок на рис. 10) на о. Парамушир в г. Северо-Курильске (Δ=223 *км*, на рис. 10 – красный крестик). В помещениях центральной районной больницы (шлакоблочное здание) и полиции (деревянное здание) произошёл механический разрыв труб отопления от места ввода в радиатор отопления (11 и один случай соответственно). В деревянных многоквартирных зданиях (класса сейсмостойкости 9 баллов) появились свежие трещины в оштукатуренных стенах, откололись небольшие куски штукатурки, зафиксирован случай отхождения кафеля с цементом от деревянной стены. На крышах 15 зданий с печным отоплением зафиксировано повреждение 60 кирпичных дымовых труб: трещины в кладке, выпадение частей кладки и полное падение. По данным станции сильных движений SKR инструментальная интенсивность составила 7.0 балла. С интенсивностью сотрясений от 2 до 6 баллов землетрясение проявилось ещё в 46 населённых пунктах (Δ=215–1801 *км*).

Событие 25 марта 2020 г. имеет максимальную площадь макросейсмического проявления. Землетрясение ощущалось в населённых пунктах на п-ове Камчатка (Δ=220–850 *км*) и островах Северных и Южных Курил (Δ=215–1100 *км*), Беринга (Δ=865 *км*), Хоккайдо (Δ=1230 *км*, Япония) и Адак (Δ=1800 *км*, США).

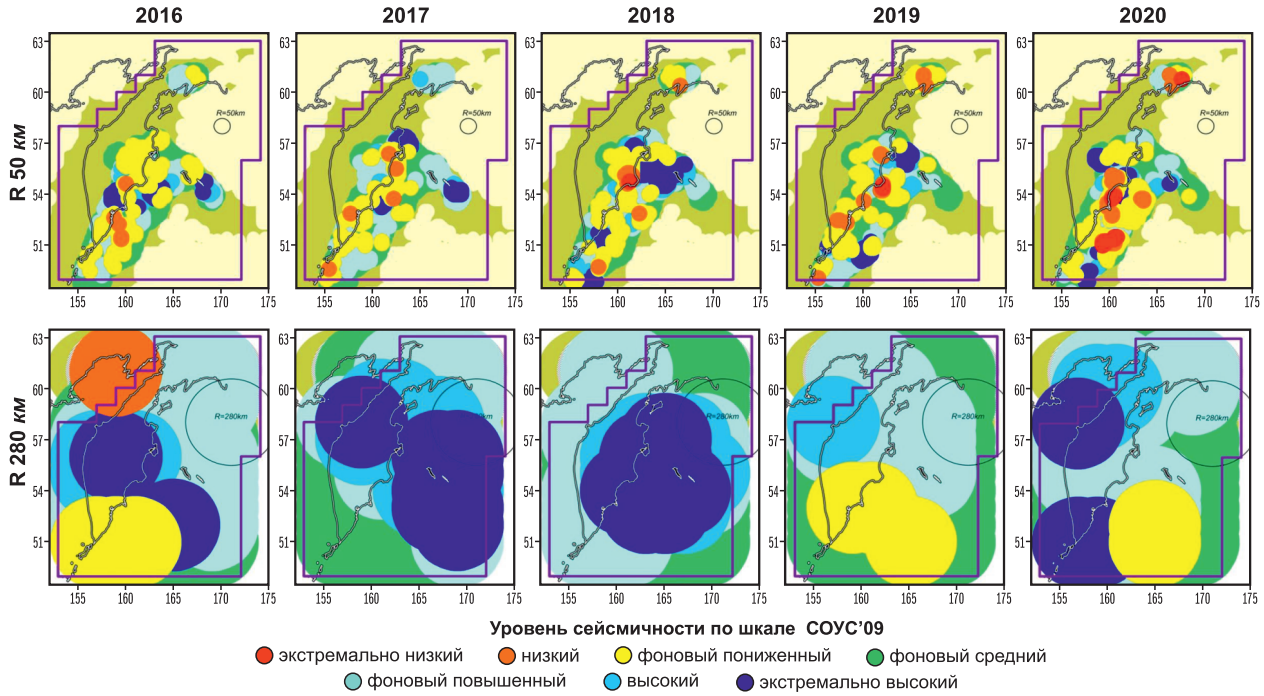


Рис. 8. Карты уровня сейсмичности Камчатки в 2016–2020 гг., построенные с различным разрешением (в различном масштабе), определяемым радиусом единичной круговой ячейки

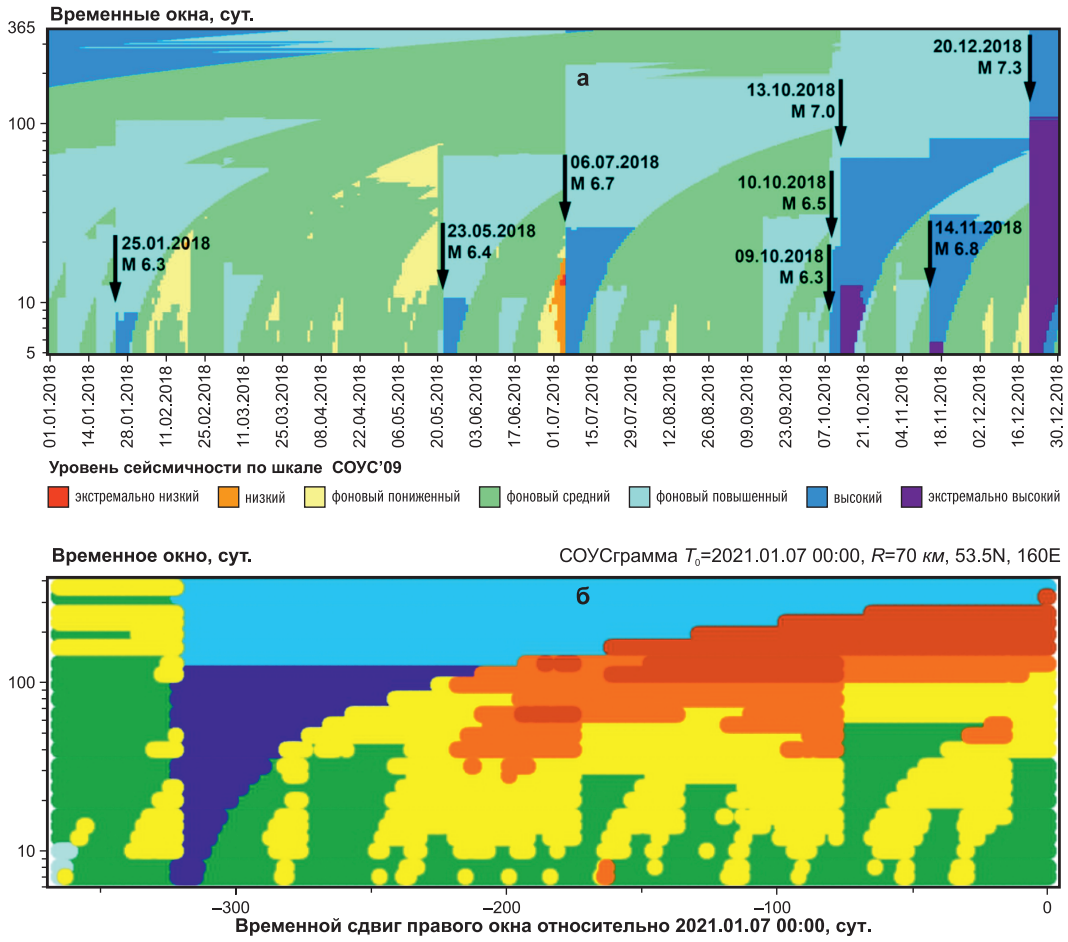


Рис. 9. СОУС-граммы для зоны ответственности КФ ФИЦ ЕГС РАН в 2018 г. (а) и для ячейки радиуса R=70 *км* с центром φ=53.5°N, λ=160.0°E в 2020 г. (б)

Большую площадь макросейсмического проявления имело и глубокое землетрясение 13 октября 2018 г. в 11^h10^m (K_S=15.4, зелёный кружок в Охотском море на рис. 10) [*Чебров и др.*, 2019в]. Ощущения зафиксированы на расстоянии Δ=260–1120 *км* от эпицентра в населённых пунктах, расположенных на восточном побережье п-ова Камчатка (Δ=320–740 *км*) и на островах Беринга (с. Никольское, Δ=850 *км*), Парамушир (г. Северо-Курильск, Δ=260 *км*) и Кунашир (пос. Южно-Курильск и Горячий Пляж, Δ=1110 и 1120 *км*). Землетрясение проявилось слабо – самые сильные сотрясения до 4 баллов зафиксированы на двух кордонах Кроноцкого заповедника (Кроноки и Узон, Δ=530 и 460 *км*) и в Северо-Курильске.

Все самые сильные землетрясения года периода 2016–2020 гг. имели макросейсмические проявления. Глубокое Жупановское землетрясение 30 января 2016 г. в 03^h25^m (K_S=15.7, синий кружок с крестом на рис. 10) [*Чебров и др.*, 2016] ощущалось с интенсивностью сотрясений от 2 до 6 баллов в 64 пунктах Камчатского края и Северных Курил (Δ=70–500 *км*). Самые сильные проявления зафиксированы на восточном побережье п-ова Камчатка, что характерно для глубоких событий камчатской зоны субдукции. Это событие имеет и максимальную площадь макросейсмического проявления в 2016 году.

Ближне-Алеутское землетрясение (БАЗ) 17 июля 2017 г. в 23^h34^m (K_S=16.1, фиолетовый кружок с крестом на рис. 10) [*Чебров и др.*, 2019а] и землетрясение Углового поднятия (ЗУП) 20 декабря 2018 г. в 17^h01^m (K_S=16.1, жёлтый кружок с крестом на рис. 10) [*Чебров и др.*, 2019б; *Чебров и др.*, 2020] вызвали сотрясения 5–6 баллов в ближайшем к эпицентрам с. Никольское (о. Беринга, Δ=210 *км* и Δ=90 *км* соответственно; жёлтый крестик на рис. 10). БАЗ слабо ощущалось в шести пунктах п-ова Камчатка (Δ=445–690 *км*) – самые сильные сотрясения не превышали 4 баллов. ЗУП ощущалось в 35 пунктах п-ова Камчатка (Δ=165–500 *км*) с интенсивностью сотрясений от 2 до 5 баллов.

Самое сильное землетрясение 2019 г. – событие 26 июня в 02^h18^m (K_S=14.4, оранжевый кружок с крестом на рис. 10) – является вторым событием дуплета, зафиксированного в Камчатском проливе. Первое землетрясение дуплета 25 июня 2019 г. в 09^h55^m (K_S=14.3) вызвало сотрясения интенсивностью 5 баллов (максимальная интенсивность в году) в пос. Усть-Камчатске (Δ=120 *км*), с. Крутоберегово (Δ=110 *км*) и на ГМС мыс Африка (Δ=65 *км*, оранжевые крестики на рис. 10). Второе событие дуплета (26 июня) ощущалось в вышеупомянутых пунктах с интенсивностью сотрясений 4 балла (Δ=60–110 *км*).

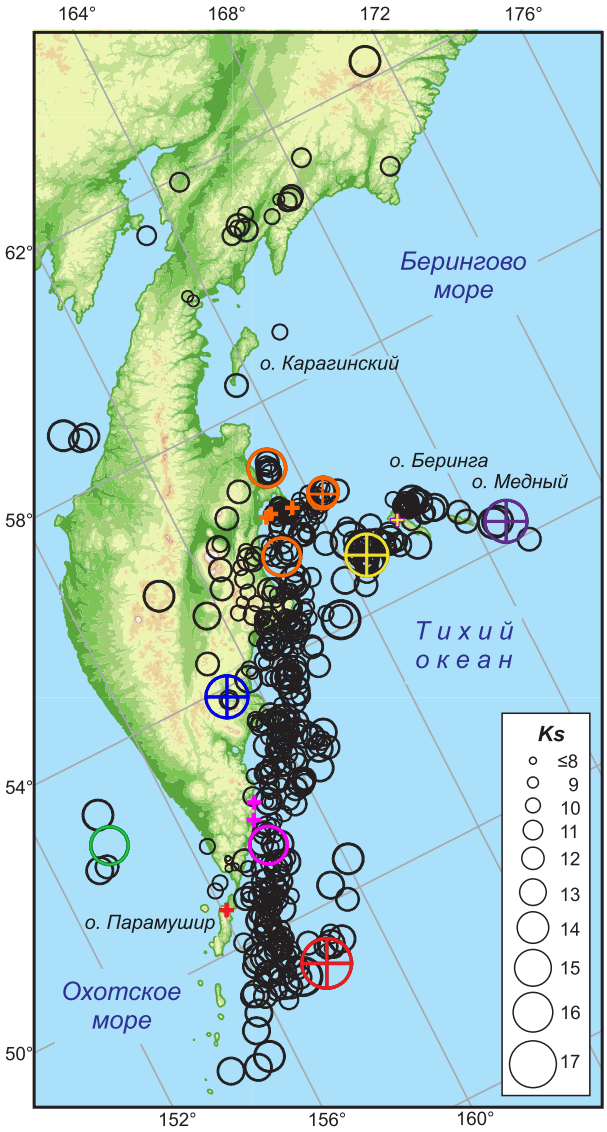


Рис. 10. Карты эпицентров ощутимых землетрясений за 2016–2020 гг. (516 событий).

Эпицентры изображены кружками с градацией размера по энергетическому классу. Кружок с крестом – самое сильное землетрясение года

Следует отметить, что в период 2016–2020 гг. произошло ещё два события, вызвавших сильные сотрясения от 5 до 6 баллов в Усть-Камчатском сельском поселении (оранжевые кружки на рис. 10): Южно-Озерновское землетрясение 29 марта 2017 г. в 04^h09^m (K_S=15.0) [*Чебров и др.*, 2017б] и землетрясение в Камчатском заливе 14 ноября 2018 г. в 21^h21^m (K_S=15.7).

В Петропавловске-Камчатском с интенсивностью от 2 до 4–5 баллов ощущалось 105 землетрясений (K_S=9.7–16.8).

3. Камчатский филиал Российского экспертного совета

Основная функция Камчатского филиала Российского экспертного совета (КФ РЭС) – оперативная оценка сейсмической опасности, прогноз землетрясений и извержений вулканов, возможных последствий их воздействий. Заседания КФ РЭС проводятся еженедельно. При нештатной обстановке (усиление сейсмической и вулканической активности или прогнозы сильных землетрясений от других организаций и физических лиц) заседания проводятся так часто, как это необходимо. В 2016–2020 гг. КФ РЭС проведено 286 еженедельных заседаний, из которых 26 – внеочередных.

Заключения о сейсмической и вулканической опасности в Камчатском крае передаются в РЭС, Координационный прогностический центр (КПЦ) ИФЗ РАН, Правительство Камчатского края, Главное Управление МЧС России по Камчатскому краю, ФИЦ ЕГС РАН, центр «Антистихия» МЧС РФ, управление ФСБ по Камчатскому краю, командующему войсками и силами на северо-востоке РФ, главному федеральному инспектору по Камчатскому краю, в Минспецпрограмм Камчатского края, в ГКП «Единый ситуационно-мониторинговый центр». Передача заключений в средства массовой информации осуществляется через пресс-центр ГУ МЧС по Камчатскому краю. В 2016–2020 гг. КФ РЭС передано 286 сообщений о сейсмической и вулканической опасности в Камчатском крае.

При еженедельной оценке сейсмической опасности рассматриваются заключения о сейсмической обстановке по данным наблюдений за предвестниками сильных землетрясений, которые можно разделить на несколько групп в соответствии с природой используемых полей: сейсмологические, геофизические, геохимические, геодезические. Большинство методик подробно рассмотрено в [*Чебров и др.*, 2011], там же приведены примеры их применения. В 2016–2020 гг. в работе КФ РЭС на регулярной основе принимали участие девять научно-исследовательских организаций.

По Положению о КФ РЭС рассматриваются любые прогнозы и оценки, подаваемые другими организациями и частными лицами, а также прогнозы, касающиеся других регионов мира. При оценке сейсмической опасности на регулярной основе использовались следующие методы наблюдений за предвестниками сильных землетрясений: сейсмологические, геофизические, геохимические и геодезические.

Текущий уровень сейсмичности в Камчатском крае оценивается по шкале «СОУС'09» [*Салтыков*, 2011]. Регулярные (еженедельные) оценки проводятся как для района, захватывающего наиболее сейсмоактивную часть Камчатки, так и для меньших по размеру областей. С июля 2020 г. в КФ РЭС регулярно представляются карты уровня сейсмичности за последнюю неделю и за последний месяц различного масштаба по шкале «СОУС'09».

В 2016–2020 гг. в Камчатском регионе (район с координатами φ=49–62°N, λ=152–169°E) произошло 28 землетрясений с $ML \geq 6.0$. Для 24 событий были даны прогнозы, либо выявлены предвестники как в реальном времени, так и ретроспективно.

При оценке вулканической обстановки до апреля 2017 г. КФ РЭС использовал результаты наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН (http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm) [*Сенюков*, 2013] и заключения KVERT – (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) [*Гирина и др.*, 2018]. С апреля 2017 г. используются лишь материалы о сейсмической активности вулканов, полученные в КФ ФИЦ ЕГС РАН [*Сенюков*, 2013; *Салтыко*в, 2016]. В 2017–2020 гг. произошло семь эксплозивных извержений вулкана Безымянный с высотой пепловых выбросов от 6 до 15 *км* над уровнем моря. Все извержения были успешно спрогнозированы без пропусков и ложных тревог [*Сенюков и др.*, 2018; *Сенюков и др.*, 2019]. Также сотрудниками КФ ФИЦ ЕГС РАН переданы прогнозы нескольких эпизодов активизации вулкана Ключевской. Прогнозы оправдались по основным параметрам и признаны успешными. С марта 2018 г. в КФ РЭС регулярно поступают заключения о состоянии сейсмичности вулканов Ключевской группы (вулканы Ключевской, Безымянный, Удина, Зимина, Толбачик, включая Толбачинский дол и Толудскую зону) и Авачинской группы (вулканы Авачинский и Корякский) по методике «СОУС'09» [*Салтыков*, 2016].

Заключение

Система сейсмологических наблюдений на Камчатке получила значительный импульс в ходе работ по модернизации службы предупреждения о цунами (СПЦ), которые выполнялись в рамках Федеральной целевой программы «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года». В этот период были развёрнуты сеть

специализированных цифровых сейсмических станций и сеть станций сильных движений, модернизирована система сбора, хранения и обработки информации. К сожалению, следующая целевая программа, которая стартовала в 2011 г., была свёрнута к 2014 г. и финансирование по ней было прекращено.

В отсутствие специального финансирования стали невозможными дальнейшее наращивание и модернизация наблюдательной сети, и усилия в последние пять лет были сосредоточены на поддержании существующей структуры, а также на развитии программно-аппаратного комплекса системы хранения данных, создании новых алгоритмов для обработки сейсмических данных, новых сервисов и информационной системы. Основной результат в этой части – устойчивая, надёжная система, обладающая свойствами масштабируемости и переносимости. Разработанные и введённые в эксплуатацию программные средства обработки и анализа данных позволяют получать надёжные результаты и осуществлять надлежащий контроль параметров сейсмического режима. В настоящее время ставятся задачи следующего уровня, связанные с цифровизацией и автоматизацией процессов прогнозирования землетрясений, что позволит де-факто завершить цифровизацию всей системы мониторинга и прогнозирования землетрясений.

Система сейсмологических наблюдений за последние пять лет показала высокую эффективность, скорость и точность оценок параметров сейсмических событий. Были определены параметры около 83 тыс. тектонических и вулканических землетрясений. За последние пять лет зарегистрировано семь сильных землетрясений и организована оперативная обработка афтершоковых последовательностей. Контролировались параметры сейсмического режима, в том числе представительность и статистически обоснованный уровень сейсмичности.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/, http://www.gsras.ru/unu/).

Литература

Галина Н.А., *Шапиро Н.М.*, *Дрознин Д.В.*, *Дрознина С.Я.*, *Сенюков С.Л.*, *Чебров Д.В.* Повторяемость глубоких длиннопериодных землетрясений под Ключевской группой вулканов на Камчатке // Физика Земли. – 2020. – № 6. – С. 24–37. doi: 10.31857/S0002333720060022

Гирина О.А., *Лупян Е.А.*, *Сорокин А.А.*, *Мельников Д.В.*, *Романова И.М.*, *Кашнирский А.В.*, *Уваров И.А.*, *Мальковский С.И.*, *Королев С.П.*, *Маневич А.Г.*, *Крамарева Л.С.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. – 192 с.

Гордеев Е.И., *Чебров В.Н.*, *Левина В.И.*, *Сенюков С.Л.*, *Шевченко Ю.В.*, *Ящук В.В.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 3. – С. 6–27.

Дрознин Д.В., *Дрознина С.Я.* Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22–34.

Дрознин Д.В., *Дрознина С.Я.*, *Сенюков С.Л.*, *Чебров Д.В.*, *Шапиро Н.М.*, *Шебалин П.Н.* Вероятностные оценки гипоцентров по данным Камчатской сети сейсмических станций // Физика Земли. – 2019. – № 4. – С. 153–165. doi: 10.31857/S0002-333720194153-165

Дрознин Д.В., *Чебров Д.В.*, *Дрознина С.Я.*, *Ототюк Д.А.* Автоматизированная оценка интенсивности сейсмических сотрясений по инструментальным данным в режиме, близком к реальному времени, и её использование в рамках Службы срочных сейсмических донесений на Камчатке // Сейсмические приборы. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 5–19. doi: 10.21455/si2017.3-1

Матвеенко Е.А., *Чеброва А.Ю.*, *Токарев А.В.*, *Чемарёв А.С.* Подсистема ЕИС СД для дополнения информации о землетрясениях мировыми данными // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. – С. 199–203.

Митюшкина С.В., *Раевская А.А.* Макросейсмический каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов за период наблюдений 1962–2015 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой научно-технической конференции / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2015. – С. 76–80.

Митюшкина С.В., Раевская А.А., Токарев А.В., Чеброва А.Ю. База данных «Макросейсмический каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов» / Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620410 от 2 марта 2015 г.

Митюшкина С.В., *Раевская А.А.*, *Токарев А.В.*, *Чеброва А.Ю.*, *Чемарёв А.С.* Программа для автоматизированной обработки макросейсмической информации: возможности и результаты использования // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвёртой научно-технической конференции / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2013. – С. 347–351.

Митюшкина С.В., *Токарев А.В.*, *Раевская А.А.*, *Чеброва А.Ю.* Автоматическая обработка макросейсмической информации по камчатским землетрясениям на базе Интернет-опросника // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2011. – С. 376–380.

Ромашева Е.И., *Матвеенко Е.А.*, *Чеброва А.Ю.* Создание цифрового архива бумажных сейсмограмм: первые результаты // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 476–479.

Салтыков В.А. О возможных проблемах оценки пространственно-временных особенностей представительности каталога землетрясений (на примере Камчатского каталога Единой геофизической службы РАН) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2019. – № 43. – С. 66–74. doi: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-66-74

Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 2011. – № 2. – С. 53–59.

Салтыков В.А. Формализованная методика прогноза извержений вулкана Безымянный (Камчатка) на основе статистической оценки уровня сейсмичности // Геофизические исследования. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 45–59. doi: 10.21455/gr2016.3-4

Сенюков С.Л. Мониторинг и прогноз активности вулканов Камчатки по сейсмологическим данным в 2000–2010 гг. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 96–108. doi: 10.7868/S0203030613010070

Сенюков С.Л., *Нуждина И.Н.*, *Чебров Д.В.* Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2016 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. – С. 88–95.

Сенюков С.Л., *Нуждина И.Н.*, *Чебров Д.В.* Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2017 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 93–103.

Токарев А.В., *Митюшкина С.В.*, *Раевская А.А.* Программа для ЭВМ «The Poll Viewer» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613075 от 03.03.2015 г.

Федотов С.А. К 25-летию детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке и Командорских островах, XI.1961–X.1986: история, развитие и задачи // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 6. – С. 3–10.

Чебров В.Н., *Дрознин Д.В.*, *Кугаенко Ю.А.*, *Левина В.И.*, *Сенюков С.Л.*, *Сергеев В.А.*, *Шевченко Ю.В.*, *Ящук В.В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 1. – С. 18–40. doi: 10.7868/S0203030613010021

Чебров В.Н., *Кугаенко Ю.А.*, *Абубакиров И.Р.*, *Дрознина С.Я.*, *Иванова Е.И.*, *Матвеенко Е.А.*, *Митюшкина С.В.*, *Ототюк Д.А.*, *Павлов В.М.*, *Раевская А.А.*, *Салтыков В.А.*, *Сенюков С.Л.*, *Серафимова Ю.К.*, *Скоркина А.А.*, *Титков Н.Н.*, *Чебров Д.В.* Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с K_S=15.7, *Mw*=7.2, *I*=6 (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2016. – Т. 29, № 1. – С. 5–16.

Чебров В.Н., *Салтыков В.А.*, *Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. – М.: Светоч Плюс, 2011. – 304 с.

Чебров Д.В., *Кугаенко Ю.А.*, *Абубакиров И.Р.*, *Ландер А.В.*, *Павлов В.М.*, *Салтыков В.А.*, *Титков Н.Н.* Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с *Mw*=7.8 на границе Командорской сейсмической бреши // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2017а. – № 35. – С. 22–25.

Чебров Д.В., *Кугаенко Ю.А.*, *Ландер А.В.*, *Абубакиров И.Р.*, *Воропаев П.В.*, *Гусев А.А.*, *Дрознин Д.В.*, *Дрознина С.Я.*, *Иванова Е.И.*, *Кравченко Н.М.*, *Матвеенко Е.А.*, *Митюшкина С.В.*, *Ототюк Д.А.*, *Павлов В.М.*, *Раевская А.А.*, *Салтыков В.А.*, *Сенюков С.Л.*, *Скоркина А.А.*, *Серафимова Ю.К.* Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с *Mw*=6.6, K_S=15.0, *I*=6 (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2017б. – № 35. – С. 7–21.

Чебров Д.В., *Кугаенко Ю.А.*, *Ландер А.В.*, *Абубакиров И.Р.*, *Гусев А.А.*, *Дрознина С.Я.*, *Митюшкина С.В.*, *Ототюк Д.А.*, *Павлов В.М.*, *Титков Н.Н.* Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с *Mw*=7.8. I. Протяжённый разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. – 2019а. – № 4. – С. 48–71. doi: 10.31857/S0002-33372019448-71

Чебров Д.В., *Кугаенко Ю.А.*, *Ландер А.В.*, *Абубакиров И.Р.*, *Дрознина С.Я.*, *Митюшкина С.В.*, *Павлов В.М.*, *Салтыков В.А.*, *Серафимова Ю.К.*, *Титков Н.Н.* Землетрясение Углового поднятия 20 декабря 2018 г. *Mw*=7.3 в зоне сочленения Камчатского и Алеутского океанических желобов // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2020. – № 45. – С. 100–117. doi: 10.31431/1816-5524-2020-1-45-100-117

Чебров Д.В., *Ландер А.В.*, *Кугаенко Ю.А.*, *Абубакиров И.Р.*, *Дрознина С.Я.*, *Митюшкина С.В.*, *Павлов В.М.*, *Салтыков В.А.*, *Титков Н.Н.*, *Чеброва А.Ю.* Землетрясение Углового поднятия и условия тектонического растяжения на северо-западе Тихоокеанской плиты // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019б. – С. 228–232.

Чебров Д.В., *Чеброва А.Ю.*, *Абубакиров И.Р.*, *Дрознина С.Я.*, *Митюшкина С.В.*, *Копылова Г.Н.*, *Ототюк Д.А.*, *Павлов В.М.*, *Сенюков С.Л.* Глубокое (*H*≈500 *км*) землетрясение 13.10.2018 г. с *Mw*=6.7 в Камчатской зоне субдукции с эпицентром в Охотском море // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. –

2019в. – № 41. – С. 5–11. doi: 10.31431/1816-5524-2019-1-41-5-11

Чеброва А.Ю., *Матвеенко Е.А.* Исследование вариаций сейсмического шума на станциях КФ ГС РАН в 2014 году // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой научно-технической конференции / Отв. ред. В.Н. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2015. – С. 111–116.

Чеброва А.Ю., *Чемарёв А.С.*, *Матвеенко Е.А.* Единая информационная система сейсмологических данных КФ ФИЦ ЕГС РАН в 2019 г. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 495–499.

Чеброва А.Ю., *Чемарёв А.С.*, *Матвеенко Е.А.*, *Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. – 2020. – Т. 21, № 3. – С. 66–91. doi: 10.21455/gr2020.3-5

Чемарёв А.С., *Чеброва А.Ю.* Интерактивная карта землетрясений как интерфейс доступа к сейсмологическим данным // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 500–503.

Droznin D.V., *Shapiro N.M.*, *Droznina S.Ya.*, *Senyukov S.L.*, *Chebrov V.N.*, *Gordeev E.I.* Detecting and locating volcanic tremors on the Klyuchevskoy group of volcanoes (Kamchatka) based on correlations of continuous seismic records // Geophysical Journal International. – 2015. – V. 203, Is. 2. – P. 1001–1010.

Van Tress H.L. Detection, Estimation and Modulation Theory. Part I. – New York, USA: Wiley, 1968. – 697 p.

Сведения об авторах

Чебров Данила Викторович, канд. физ.-мат. наук, директор Камчатского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: danila@emsd.ru

Тихонов Сергей Александрович, канд. физ.-мат. наук, уч. секр. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: tsa@emsd.ru

Дрознин Дмитрий Валериевич, ст. науч. сотр. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: ddv@emsd.ru

Дрознина Светлана Ярославовна, науч. сотр. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: sva07@emsd.ru

Матвеенко Евгений Александрович, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., зав. лаб. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: van@mail.ru

Митюшкина Светлана Владимировна, науч. сотр. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: mitik@emsd.ru

Салтыков Вадим Александрович, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр., зав. лаб. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: saltkam@mail.ru

Сенюков Сергей Львович, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр., зав. лаб. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: ssl@emsd.ru

Серафимова Юлия Константиновна, ст. науч. сотр. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: yulka@emsd.ru

Сергеев Василий Александрович, зав. отд. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: basil@emsd.ru

Ящук Василий Васильевич, зав. отд. КФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия. E-mail: yvv@emsd.ru

Kamchatka seismic monitoring and Earthquake prediction system and its evolution. Main results of observations in 2016–2020

© 2021 D.V. Chebrov, S.A. Tikhonov, D.V. Droznin, S.Ya. Droznina, E.A. Matveenko, S.V. Mityushkina, V.A. Saltykov, S.L. Senyukov, Yu.K. Serafimova, V.A. Sergeev, V.V. Yashchuk

KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Received March 25, 2021

Abstract In this paper we present brief review of results of Kamchatka Seismic Monitoring and Earthquake Prediction System operations in the last five years. In addition, the retrospective of development of hardware, equipment and software of the System performed. The main direction in the System evolution in this period concerned the creation and modernization of data acquiring and processing methods. One of main results is creation basic informational space, that includes all processes if seismic observations, from data acquiring till exchange (including external users) of data processing results. In particular, the system of data storage was deeply modernized, high-speed access to the data archive was provides, high-performance computing clusters were deployed, all seismic stations were combined in the unified network. Development algorithms and software for data processing and seismic regime controlling was continued. Creation and development of the Seismological Data Informational System (SDIS) provide the access to seismic observations results for research community. The service of automatic data exchange with external users was created and incorporated in SDIS. Kamchatka Seismic Monitoring and Earthquake Prediction System in 2016-2020 allowed registering and processing over 83 thousand tectonic and volcanic earthquakes. The complex studies for seven the strongest ones were conducted. Detailed analysis showed, that magnitude of completeness for regional scale is ML_C=2.5, and for local scale (for example – volcano seismic monitoring) – ML_C=–0.2.

Keywords seismic observations, geophysical monitoring, informational system, seismology, Kamchatka, volcano, earthquake, earthquake prediction.

For citation Chebrov, D.V., Tikhonov, S.A., Droznin, D.V., Droznina, S.Ya., Matveenko, E.A., Mityushkina, S.V., Saltykov, V.A., Senyukov, S.L., Serafimova, Yu.K., Sergeev, V.A., & Yashchuk, V.V. (2021). [Kamchatka seismic monitoring and Earthquake prediction system and its evolution. Main results of observations in 2016-2020]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], *3*(3), 28-49. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.02

References

Chebrov, D.V., Chebrova, A.Yu, Abubakirov, I.R., Droz-nina, S.Y., Mityushkina, S.V., Kopilova, G.N., Ototyuk, D.A., Pavlov, V.M., & Senyukov, S.L. (2019c). [The October 13, 2018 deep earthquake with Mw=6.7 in the Kamchatka subduction zone with the epicenter in the Sea of Okhotsk]. *Vestnik KRAUNTs. Seriia: Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], *41*, 5-11. (In Russ.).

Chebrov, D.V., Kugaenko, Yu.A., Lander, A.V., Abubakirov, I.R., Gusev, A.A., Droznina, S.Y., Mityushkina, S.V., Ototyuk, D.A., Pavlov, V.M., & Titkov, N.N. (2019a). Near islands Aleutian earthquake with Mw=7.8 on July 17, 2017: I. Extended rupture along the Commander block of the Aleutian island arc from observations in Kamchatka. *Izvestiya*, *Physics of the Solid Earth*, *55*(4), 576-599. doi: 10.1134/S1069351319040037

Chebrov, D.V., Kugaenko, Yu.A., Abubakirov, I.R., Lander, A.V., Pavlov, V.M., Saltykov, V.A., & Titkov, N.N. (2017a). [The July 17, 2017 Near-Aleutian earthquake with Mw=7.8 on the border of the Komandor seismic gap (western part of the Aleutian Arc)]. *Vestnik KRAUNTs. Seriia: Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], *35*, 22-25. (In Russ.).

Chebrov, D.V., Kugaenko, Yu.A., Lander, A.V., Abubakirov, I.R., Droznina, S.Y., Mityushkina, S.V., Pavlov, V.M., Saltykov, V.A., Serafimova, Yu.K., & Titkov, N.N. (2020). [The Uglovoye Podnyatiye earthquake on December 20, 2018 (Mw=7.3) in the junction zone between Kamchatka and Aleutian oceanic trenches]. *Vestnik KRAUNTs. Seriia: Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], *45*, 100-117. (In Russ.).

Chebrov, D.V., Kugayenko, Yu.A., Lander, A.V., Abubakirov, I.R., Voropayev, P.V., Gusev, A.A., Droznin, D.V.,

Droznina, S.Y., Ivanova, E.I., Kravchenko, N.M., Matveenko, E.A., Mityushkina, S.V., Ototyuk, D.A., Pavlov, V.M., Rayevskaya, A.A., Saltykov, V.A., Senyukov, S.L., Skorkina, A.A., & Serafimova, Yu.K. (2017b). [The March 29th, 2017 earthquake with K_S=15.0, Mw=6.6, I=6 in Ozernoy gulf (Kamchatka)]. *Vestnik KRAUNTs. Seriia: Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], *35*, 7-21. (In Russ.).

Chebrov, D.V., Lander, A.V., Kugaenko, Yu.A., Abubakirov, I.R., Droznina, S.Ya., Mityushkina, S.V., Pavlov, V.M., Saltykov, V.A., Titkov, N.N., & Chebrova, A.Yu. (2019b). [The Uglovoye Podnyatiye earthquake and tectonic extension conditions in the northwest Pacific plate]. In *Problemi compleksnogo geophizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii. Trudy Sed'moi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (*Otv. red. D.V. Chebrov*) [Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of VII science conference (Ed. D.V. Chebrov)] (pp. 228-232). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Chebrov, V.N., Droznin, D.V., Kugaenko, Y.A., Levina, V.I., Senyukov, S.L., Sergeev, V.A., Shevchenko, Y.V., & Yashchuk, V.V. (2013). The system of detailed seismological observations in Kamchatka in 2011. *Journal of Volcanology and Seismology*, *7*(1), 16-36. doi: 10.1134/S0742046313010028

Chebrov, V.N., Kugaenko, Yu.A., Abubakirov, I.R., Droznina, S.Ya., Ivanova, E.I., Matveenko, E.A., Mityushkina, S.V., Ototyuk, D.A., Pavlov, V.M., Raevskaya, A.A., Saltykov, V.A., Senyukov, S.L., Serafimova, Yu.K., Skorkina, A.A., Titkov, N.N., & Chebrov, D.V. (2016). [The January 30, 2016 earthquake with K_S=15.7, Mw=7.2, I=6 in Zhupanovsky region (Kamchatka)]. *Vestnik KRAUNTs. Seriia: Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], 29(1), 5-16. (In Russ.).

Chebrov, V.N., Saltykov, V.A., & Serafimova, Yu.K. (2011). *Po materialam raboty Kamchatskogo filiala Rossiiskogo ekspertnogo soveta po prognozu zemletriasenii, otsenke seismicheskoi opasnosti i riska v 1998-2009 gg.* [Earthquake prediction in Kamchatka. Based on the materials of the Kamchatka branch of the Russian Expert Council on earthquake prediction, seismic hazard and risk assessment in 1998-2009]. Moscow, Russia: Svetoch Plus Publ., 304 p. (In Russ.).

Chebrova, A.Yu., & Matveenko, E.A. (2015). [Study of seismic noise variations at the stations of Kamchatka branch of GS RAS in 2014]. In *Problemi compleksnogo geophizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii. Trudy Piatoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (*Otv. red. V.N. Chebrov*) [Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of V science conference (Ed. V.N. Chebrov)] (pp. 111-116). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Chebrova, A.Yu., Chemarev, A.S., & Matveenko, E.A. (2019). [Seismological data information system in Kamchatka branch of GS RAS in 2019]. In *Problemi compleksnogo geophizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii. Trudy Sed'moi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (*Otv. red. D.V. Chebrov*) [Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of VII science conference (Ed. D.V. Chebrov)] (pp. 495-499). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Chebrova, A.Yu., Chemarev, A.S., Matveenko, E.A., & Chebrov, D.V. (2020). [Seismological data information system in Kamchatka Branch of GS RAS: organization principles, main elements and key functions]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], *21*(3), 66-91. (In Russ.). doi: 10.21455/gr2020.3-5

Chemarev, A.S., & Chebrova, A.Yu. (2019). [Interactive earthquake map as an interface for accessing seismological data]. In *Problemi compleksnogo geophizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii. Trudy Sed'moi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (*Otv. red. D.V. Chebrov*) [Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of VII science conference (Ed. D.V. Chebrov)] (pp. 500-503). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Droznin, D.V., & Droznina, S.Ya. (2011). Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, *47*, 215.

Droznin, D.V., Chebrov, D.V., Droznina, S.Ya., & Ototyuk, D.A. (2018). Automated estimation of seismic shaking intensity from instrumental data in quasi-real-time mode and its use in the operation of the seismic early warning service in the Kamchatka Region. *Seismic Instruments*, *54*(3), 239-246. doi: 10.3103/S0747923918030088

Droznin, D.V., Droznina, S.Ya., Senyukov, S.L., Chebrov, D.V., Shapiro, N.M., & Shebalin, P.N. (2019). Probabilistic estimates of hypocenters from the data of Kamchatka seismic network stations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, *55*(4), 677-687. doi: 10.1134/S1069351319040049

Droznin, D.V., Shapiro, N.M., Droznina, S.Ya., Senyukov, S.L., Chebrov, V.N., & Gordeev, E.I. (2015). Detecting and locating volcanic tremors on the Klyuchevskoy group of volcanoes (Kamchatka), based on correlations of continuous seismic records. *Geophysical Journal International*, *203*(2), 1001-1010.

Fedotov, S.A. (1987). [To the 25th anniversary of detailed seismological observations in Kamchatka and the Commander Islands, XI.1961 - X.1986: history, development and tasks]. *Vulkanologiia i seismologiia* [Journal of Volcanology and Seismology], *6*, 3-10. (In Russ.).

Galina, N.A., Shapiro, N.M., Droznin, D.V., Droznina, S.Ya., Senyukov, S.L., & Chebrov, D.V. (2020). Reccurence of deep long-period earthquakes beneath the Klyuchevskoi volcano group, Kamchatka. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, *56*(6), 749-761. doi: 10.1134/S1069351320060026

Girina, O.A., Lupyan, E.A., Sorokin, A.A., Melikov, D.V., Romanova, I.M., Kashnirsky, A.V., Uvarov, I.A., Malkovsky, S.I., Korolev, S.P., Manevich, A.G., & Kramareva, L.S. (2018). *Kompleksnyi monitoring eksplozivnykh izverzhenii vulkanov Kamchatki* [Comprehensive monitoring of explosive volcanic eruptions in Kamchatka]. Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: IVS FEB RAS Publ., 192 p. (In Russ.).

Gordeev, E.I., Chebrov, V.N., Levina, V.I., Senyukov, S.L., Shevchenko, Yu.V., & Yashchuk, V.V. (2006). [The seismological observation system in Kamchatka]. *Vulkanologiia i seismologiia* [Journal of Volcanology and Seismology], *3*, 6-27. (In Russ.).

Matveenko, E.A., Chebrova, A.Yu., Tokarev, A.V., & Chemarev, A.S. (2016). [Supplementing earthquake information with world data SDIS subsystem]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XI Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly* (*Otv. red. A.A. Malovichko*) [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proceedings of the XI International Seismological Workshop (Ed. A.A. Malovichko)] (pp. 199-203). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Mityushkina, S.V., & Raevskaya, A.A. (2015). [Macroseismic catalog of earthquakes in Kamchatka and the Commander Islands for the observation period 1962-2015]. In *Problemi compleksnogo geophizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii. Trudy Piatoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (*Otv. red. V.N. Chebrov*) [Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of V science conference (Ed. V.N. Chebrov)] (pp. 76-80). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Mityushkina, S.V., Raevskaya, A.A., Tokarev, A.V., & Chebrova, A.Yu. (2015). [Macroseismic catalog of earthquakes in Kamchatka and the Commander Islands]. Certificate of state registration of the database No. 2015620410. (In Russ.).

Mityushkina, S.V., Raevskaya, A.A., Tokarev, A.V., Chebrova, A.Yu., & Chemarev, A.S. (2013). [Program for automatic processing of macroseismic information: possibilities and results of use]. In *Problemi compleksnogo geophizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii. Trudy chetvertoi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (*Otv. red. V.N. Chebrov*) [Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of IV science conference (Ed. V.N. Chebrov)] (pp. 347-351). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Mityushkina, S.V., Tokarev, A.V., Raevskaya, A.A., & Chebrova, A.Yu. (2011). [Automatic processing of macroseismic information on Kamchatka earthquakes based on an Internet questionnaire]. In *Problemi compleksnogo geophizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii. Trudy tret'ei nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (*Otv. red. V.N. Chebrov*) [Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of III science conference (Ed. V.N. Chebrov)] (pp. 376-380). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Romasheva, E.I., Matveenko, E.A., & Chebrova, A.Yu. (2019). [Creation of a digital archive of paper seismograms: first results]. In *Problemi compleksnogo geophizicheskogo monitoringa Dalnego Vostoka Rossii. Trudy Sed'moi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (*Otv. red. D.V. Chebrov*) [Problems of complex geophysical monitoring of Far East of Russia. Proceedings of VII science conference (Ed. D.V. Chebrov)] (pp. 476-479). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Saltykov, V.A. (2016). [Formalized technique of Bezymianny Volcano (Kamchatka) eruption forecasting based on the statistical estimation of seismicity level]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], *3*, 45-59. (In Russ.). doi: 10.21455/gr2016.3-4

Saltykov, V.A. (2019). [Possible problems of evaluation of spatial-temporal features of earthquake catalog representatively: case study for the Kamchatka catalog of Geophysical Survey of RAS]. *Vestnik KRAUNTs. Seriia: Nauki o Zemle* [Bulletin of KRAESC. Earth sciences], *43*, 66-74. (In Russ.).

Saltykov, V.A. (2011). A statistical estimate of seismicity level: The method and results of application to Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology*, *5*(2), 123-128.

Senyukov, S.L. (2013). Monitoring and prediction of volcanic activity in Kamchatka from seismological data: 2000-2010. *Journal of Volcanology and Seismology*, *7*(1), 86-97. doi: 10.1134/S0742046313010077

Senyukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, D.V. (2018). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2016 godu* [Earthquakes in Russia in 2016] (pp. 88-95). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Senyukov, S.L., Nuzhdina, I.N., & Chebrov, D.V. (2019). [Volcanoes of Kamchatka]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2017 godu* [Earthquakes in Russia in 2017] (pp. 93-103). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).

Tokarev, A.V., Mityushkina, S.V., & Raevskaya, A.A. (2015). [The Poll Viewer]. Certificate of state registration of a computer program No. 2015613075. (In Russ.).

Van Tress, H.L. (1968). *Detection, Estimation and Modulation Theory, Part I.* New York, USA: Wiley, 697 p.

Information about authors

Chebrov Danila Viktorovich, PhD, Director of the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KB GS RAS), Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: danila@emsd.ru

Tikhonov Sergey Alexandrovich, PhD, Scientific Secretary of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: tsa@emsd.ru

Droznin Dmitry Valerievich, Senior Researcher of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: ddv@emsd.ru

Droznina Svetlana Yaroslavovna, Researcher of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: sva07@emsd.ru

Matveenko Evgeny Alexandrovich, PhD, Senior Researcher, Head of Laboratory of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: van@mail.ru

Mityushkina Svetlana Vladimirovna, Researcher of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: mitik@emsd.ru

Saltykov Vadim Alexandrovich, Dr., Chief Researcher, Head of Laboratory of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: saltkam@mail.ru

Senyukov Sergey Lvovich, PhD, Leading Researcher, Head of Laboratory of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: ssl@emsd.ru

Serafimova Yulia Konstantinovna, Senior Researcher of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: yulka@emsd.ru

Sergeev Vasily Alexandrovich, Head of Department of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: basil@emsd.ru

Yashchuk Vasily Vasilievich, Head of Department of the KB GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. E-mail: yvv@emsd.ru