



UNIQUE LARGE-SCALE RESEARCH FACILITIES "SEISMIC INFRASOUND ARRAY FOR MONITORING ARCTIC CRYOLITOZONE AND CONTINUOUS SEISMIC MONITORING OF THE RUSSIAN FEDERATION, NEIGHBOURING TERRITORIES AND THE WORLD"

R.A. Dyagilev , I.A. Sdelnikova  

Federal Research Center, Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, 189 Lenin Ave, Obninsk 249035, Russia

ABSTRACT. The description of the Unique Large-Scale Research Facilities "Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolithozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world" (URF SIA MAC), its hardware and software components are presented. Methods and principle areas of research carried out using the URF are outlined. The URF SIA MAC includes 364 seismic stations throughout Russia and three infrasound arrays. The data obtained at the URF serve to provide domestic fundamental and applied research in the field of Earth Sciences (seismology, geophysics, geodynamics, geoecology) and to study catastrophic events of a natural induced nature. The modern URF data archive includes digital seismic records since 1993. In addition, there is a significant amount of analogue records (since 1904) available for further digitization. The URF SIA MAC provides seismological data to many Russian scientific, research and design organizations. The article presents the main results of the Federal Research Centre Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences obtained in recent years using the URF data.

KEYWORDS: Large-Scale Research Facilities; seismological monitoring; seismic station; earthquake; explosion (detonation); volcano; seismic catalog; geophysical observations; digital data; Earthquake Early Alert Service

SHORT COMMUNICATION

Received: December 7, 2021

Revised: December 13, 2021

Accepted: December 30, 2021

Correspondence: Irina A. Sdelnikova, sdelnikova@gstras.ru

FOR CITATION: Dyagilev R.A., Sdelnikova I.A., 2022. Large-Scale Research Facilities «Seismic Infrasound Array for Monitoring Arctic Cryolithozone and Continuous Seismic Monitoring of the Russian Federation, Neighbouring Territories and the World». *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0591. doi:10.5800/GT-2022-13-2-0591

УНИКАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ УСТАНОВКА «СЕЙСМОИНФРАЗВУКОВОЙ КОМПЛЕКС МОНИТОРИНГА АРКТИЧЕСКОЙ КРИОЛИТОЗОНЫ И КОМПЛЕКС НЕПРЕРЫВНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ И МИРА»

Р.А. Дягилев, И.А. Сдельникова

ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», 249035, Обнинск, пр-т Ленина, 189, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлено описание уникальной научной установки «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (УНУ СИЗК МАК), ее аппаратной и программной компонент, описаны методы и основные направления исследований, проводимые с ее использованием. В состав установки входит 364 сейсмические станции, расположенные на всей территории России, и три инфразвуковые группы. Данные, получаемые на УНУ, служат для обеспечения отечественных фундаментальных и прикладных исследований в области наук о Земле (сейсмология, геофизика, геодинамика, геоэкология), а также для изучения катастрофических событий природного и техногенного характера. Современный архив данных УНУ включает цифровые сейсмические записи начиная с 1993 г.; кроме того, имеется значительный объем аналоговых записей (с 1904 г.), доступных для дальнейшей оцифровки. Установка обеспечивает сейсмологическими данными многие научные, изыскательские и проектные организации страны. В статье представлены основные результаты собственных исследований Единой геофизической службы РАН, проводимых в последние годы с использованием данных УНУ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: уникальная научная установка; сейсмологический мониторинг; сейсмическая станция; землетрясение; взрыв; вулкан; сейсмический каталог; геофизические наблюдения; цифровые данные; служба срочных донесений

1. ВВЕДЕНИЕ

Уникальная научная установка «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (УНУ СИЗК МАК) создана на базе ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) для обеспечения функционирования Федеральной системы сейсмологических наблюдений (<http://www.gsras.ru/unu/>). Уникальными особенностями научной установки являются период ее непрерывной работы (с 1904 г.) и охватываемая площадь (распределена по территории всей страны). УНУ предназначена для постоянного наблюдения за сейсмическими процессами в Земле, поэтому ее работа продолжается непрерывно практически с момента зарождения инструментальной сейсмологии в мире (начало XX в.), и с каждым годом количество постоянных пунктов наблюдений только растет.

Получаемые с помощью данной УНУ сейсмологические данные обеспечивают проведение широкого комплекса фундаментальных и прикладных исследований, направленных на повышение уровня сейсмической и геодинамической безопасности населения Российской Федерации, а также различных промышленных и гражданских ответственных объектов. Они широко востребованы как отечественными, так и зарубежными учеными и специалистами в области наук о Земле.

Регистрируемые в настоящее время большие объемы цифровой сейсмологической информации обеспечивают возможность для создания принципиально новых

и высокоэффективных методов обработки и анализа сейсмологических данных применительно к задачам оперативной оценки параметров землетрясений, прогнозирования сейсмической обстановки, мониторинга состояния различных природных и технических систем, изучения особенностей глубинного строения недр. Кроме того, благодаря развитию технологий сканирования и оцифровки, становится доступным для обработки на современном уровне большой объем данных, накопленных в доцифровую эпоху.

2. АППАРАТНАЯ И ПРОГРАММНАЯ ЧАСТЬ УНУ СИЗК МАК

Аппаратная часть УНУ СИЗК МАК, отвечающая за сбор текущих цифровых данных, включает в себя две подсистемы – инфразвуковую и сейсмическую. Регистрирующая часть сейсмического мониторинга состоит из цифровых широкополосных и короткопериодных станций, позволяющих фиксировать колебания по трем ортогональным направлениям от различных сейсмических источников в диапазоне частот от 0.003 до 100 Гц. Инфразвуковая подсистема представлена инфразвуковыми группами, каждая из которых состоит из трех низкочастотных конденсаторных микрофонов, позволяющих по разности времен прихода когерентного сигнала определять азимут на источник и скорость подхода фронта инфразвуковой волны. Инфразвуковая подсистема имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику в интервале частот от 1 до 16 Гц. Данные сейсмической и инфразвуковой подсистем привязываются к точному мировому времени посредством синхронизации по сигналам спутниковых

систем ГЛОНАСС и GPS, обеспечивая возможность совместной обработки данных и расчета кинематических параметров волн. Состав используемого в УНУ регистрирующего оборудования кратко представлен в табл. 1.

Кроме того, в аппаратную часть УНУ СИЗК МАК входит телекоммуникационное оборудование, обеспечивающее передачу данных в реальном времени, а также высокопроизводительные системы их хранения и обработки.

Работа УНУ СИЗК МАК происходит под управлением специально разработанного программного обеспечения, которое осуществляет сбор и передачу данных в центр обработки. Программное обеспечение состоит из нескольких независимых модулей, осуществляющих сбор сейсмических и инфразвуковых данных, их

временное хранение в промежуточных буферах, передачу и отображение регистрируемых данных вместе с диагностической информацией, автоматический перезапуск систем в случае сбоев, постоянное хранение в центре обработки [Butyrin, Krasilov, 2021; Chebrova et al., 2020].

Пункты, формирующие систему наблюдений УНУ СИЗК МАК, размещены по всей территории РФ, часть из них используется совместно с глобальными сетями мониторинга, такими как IRIS, СТВТО (рис. 1). Отдельные пункты расположены также в Антарктиде и на о. Шпицберген (Норвегия). Информация с пунктов стекается в региональные обрабатывающие центры (11 филиалов и 18 обособленных подразделений ФИЦ ЕГС РАН) и главный центр обработки, расположенный в г. Обнинске Калужской области. Здесь с применением

Таблица 1. Типы и модели регистрирующего оборудования, используемого в УНУ СИЗК МАК
Table 1. Types and models of recording equipment used at the URF SIA MAC

Тип приборов	Модели
Велосиметры короткопериодные	GS-1, K34000, L4-C, LE-3Dlite, MkIII, MiniSeisMonitor, SeisMonitor, GS-13, S-500, VE-53, CM3-KB, СПВ-3К
Велосиметры широкополосные	CMG-3ESPC, CMG-3ESPCDE, CMG-3, CMG-3TDE, CMG-40T, CMG-40TDE, CMG-6T, CMG-6TD, KS-2000M, KS-54000, STS1-VBB, STS-2.5, STS-2, TC-120, TC-20, TH-120, CM3-OC, CME-4311, CME-6011
Акселерометры	AC-73, CMG-5TDE, CMG-5TC, FBA 131A, FBA-3, JEP-6A3, TSA-100S, A16, A17, ОСП-2М
Сейсмические регистраторы	Reftek 130S, Centaur, CMG-CD24S6EAM, CMG-DM24S3EAMU, D24, DAT-4, DAT-5A, Datamark LS-7000XT, GMSplus, GSR-24, PAR-4CH, Q330HRS, SDAS, SMART-24, Байкал-7HR, Байкал-8, Байкал-11, Байкал-112, Байкал-ACN, Байкал-AMC, Байкал-МС, Дельта-03М, Ермак-5, УГПА
Инфразвуковые микрофоны	BSWA
Микробарографы	60 UHP

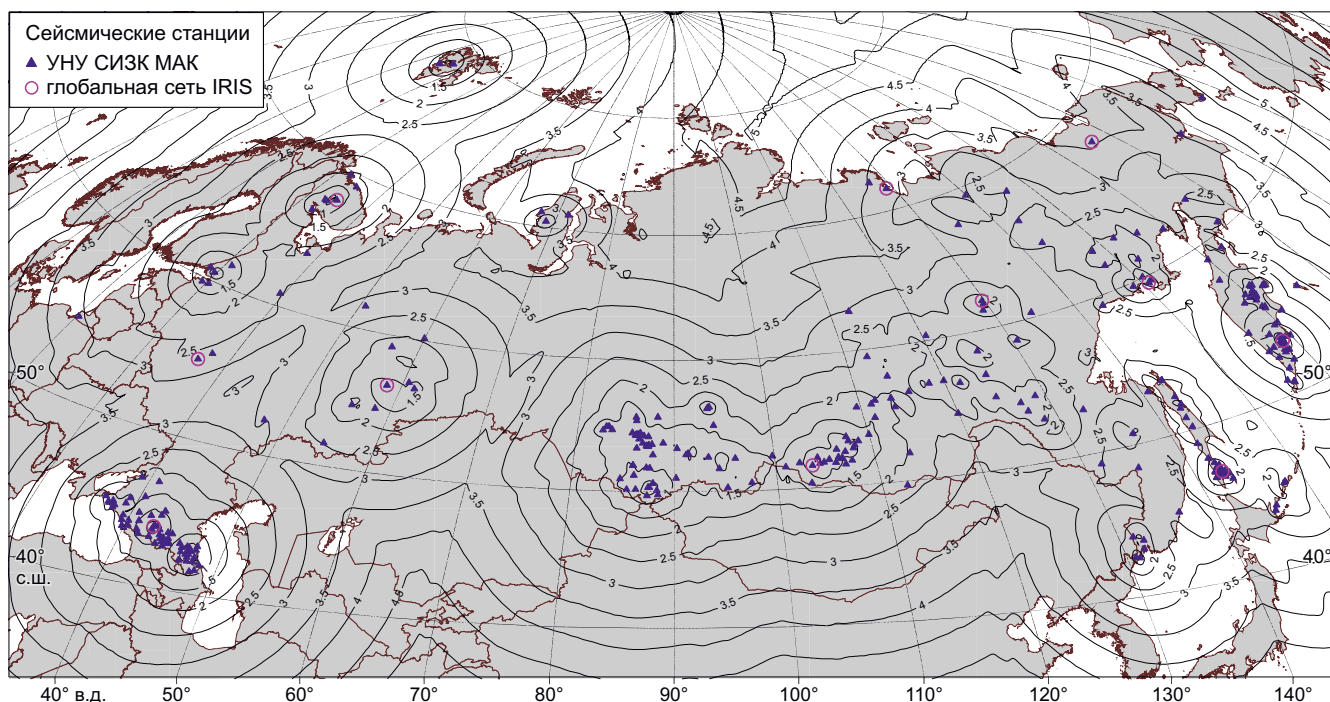


Рис.1. Карта расположения пунктов наблюдения УНУ СИЗК МАК на территории РФ и обеспечиваемого с ее помощью минимального порога магнитуды регистрируемых землетрясений.

Fig.1. The URF SIA MAC observation points and provided magnitude threshold for recorded earthquakes.

специализированного программного обеспечения [Aki-mov, Krasilov, 2020; Droznin, Droznina, 2010; Asming et al., 2021] осуществляется оперативная обработка данных. В дальнейшем результаты обработки уточняются и составляют основу подавляющего большинства информационных продуктов УНУ [Krasilov et al., 2020a, 2020b; Petrova et al., 2019; Database..., 2015].

Система наблюдений является открытой, что дает возможность интегрирования в ее состав сейсмических станций сторонних организаций. С одной стороны, это позволяет поддерживать высокие стандарты качества исходных данных, с другой – предоставляет способ надежно сохранить сейсмические данные для использования их в будущем, в том числе с применением перспективных методов, не доступных на момент сбора.

3. РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УНУ

Основными направлениями современных исследований, проводимых с использованием УНУ СИЗК МАК, являются:

- катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий;

- научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика: инфраструктура пространственных данных и ГИС-технологии;

- разработка и создание новых методов анализа и обработки больших объемов сейсмологической и геофизической информации, в том числе и в режиме реального времени, для надежной и оперативной оценки параметров землетрясений, мониторинга состояния различных природных и технических объектов, изучения особенностей глубинного строения недр;

- разработка и развитие новых методов анализа и прогнозирования сейсмической обстановки в сейсмоопасных и сейсмоактивных регионах;

- разработка и создание новых методов анализа и обработки сейсмологических и инфразвуковых данных в целях повышения эффективности мониторинга различных природных катастрофических процессов (цунамигенные землетрясения, извержения вулканов, опасные геодинамические явления в Арктическом регионе);

- мониторинг состояния ледников в связи с изменением климата, а также наблюдения за их активностью и образованием крупных айсбергов, опасных для шельфовой инфраструктуры объектов добычи углеводородов и судоходства в Арктике.

Основную часть методического обеспечения УНУ составляют традиционные подходы и методы выполнения измерений и обработки сейсмологических данных, превратившиеся за годы их применения фактически в стандарт. Среди них:

- определение типа сейсмических волн (фаз);
- определение расстояния до источника через времена вступлений волн;
- определение местоположения сейсмического источника;
- определение природы (типа источника) сейсмического события;
- определение магнитуды (энергии) сейсмического события;
- определение механизма очага;
- определение тензора сейсмического момента источника.

Кроме того, методический фонд постоянно пополняется новыми подходами, применимыми не только на первом, но и на следующих уровнях обработки данных, например:

- методика статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 [Saltykov, 2011];

- метод стоячих волн [Emanov et al., 1998; Seleznev et al., 1998].

УНУ СИЗК МАК позволяет выполнять широкий перечень работ и исследований, основанных на использовании сейсмологических данных, в связи с чем для пользователей и потребителей данных УНУ сформирован целый ряд услуг:

- предоставление сейсмического бюллетеня и каталога сейсмических событий в заданном районе (по всей территории РФ);

- предоставление цифровых записей сейсмических событий;

- предоставление сведений о произошедших землетрясениях и их макросейсмических проявлениях в заданном районе;

- оперативное информирование о сильных землетрясениях и их макросейсмических проявлениях, о сходе лавин, о цунами, об извержении вулканов в заданном районе;

- предоставление сведений об уровнях сейсмической опасности в заданном районе по данным общего сейсмического районирования;

- детальное сейсмическое районирование, уточнение исходной сейсмичности, сейсмическое микрорайонирование;

- определение степени опасности взрывных работ, проводимых вблизи населенных территорий;

- определение степени опасности сильных сейсмических воздействий, оказываемых строительной техникой и прочими вибрационными источниками, на существующие строительные конструкции.

Несмотря на то, что инструментальный мониторинг землетрясений продолжается более одного века, люди до сих пор знают о них недостаточно много, чтобы полностью обезопасить себя от связанных с ними катастрофических последствий, поэтому с каждым годом интерес к сейсмичности, а следовательно, и к данным УНУ СИЗК МАК, нарастает, а непрерывный мониторинг землетрясений, позволяющий «взглянуть» на глубинные процессы в Земле, будет продолжаться еще

долгое время, пока человека волнуют проблемы безопасного проживания на планете.

Все данные, получаемые с использованием УНУ СИЗК МАК, накапливаются, а их обработка осуществляется только теми методами, которые доступны исследователям и востребованы на момент их получения. Вполне вероятно, что в будущем с развитием сейсмологии и появлением новых методов обработки и интерпретации из полученных сейсмических данных можно будет извлечь гораздо больше информации и человечество сможет понимать сейсмические процессы гораздо лучше, чем сейчас. Так, например, уже сегодня современные методы цифровой обработки данных позволяют получить из старых сейсмограмм объем информации, который в несколько раз превышает тот, что был получен более 50 лет назад. Очевидно, что эта тенденция будет сохраняться.

Вся полученная с помощью УНУ СИЗК МАК информация (волновые формы, параметры сейсмических фаз, параметры сейсмических очагов и макросейсмических проявлений на поверхности) хранится в Центре обработки (г. Обнинск) в исходном виде и частично преобразована в современные форматы, поэтому может использоваться одновременно различными группами исследователей, что исключает необходимость делить ресурсы УНУ СИЗК МАК между задачами и исследователями. В исходном виде они доступны всегда, всем и полностью. Текущая работа персонала, обслуживающего УНУ СИЗК МАК, направлена на поддержание работоспособности оборудования, обеспечение непрерывности наблюдений, а также на предоставление современных форм доступа как к новым, так и к историческим данным.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УНУ В 2018–2020 ГГ.

С момента регистрации УНУ СИЗК МАК в 2010 г. ее технические характеристики менялись в сторону улучшения главным образом за счет замены ряда старых моделей приборов новыми. Также увеличивалось и количество пунктов наблюдения, что благоприятно сказалось на регистрационных возможностях сети в отдельных районах страны. Все это вкуче с большим объемом первичных данных позволило получить целый ряд новых научных результатов, имеющих большое значение для фундаментальных исследований и для решения сугубо прикладных задач. Ниже приведем лишь те из них, что были отмечены в последние три года (2018–2020 гг.).

Результат № 1. На базе решений, разработанных при использовании сейсмоинфразвуковой компоненты УНУ СИЗК МАК, созданы первые в России экспериментальные инфразвуковые комплексы мониторинга лавинной активности [Fedorov et al., 2021]. Одна инфразвуковая группа из трех микробарографов расположена в Хибинском горном массиве, вторая – в туристической зоне долины реки Паратунка на Камчатке. Новые программно-аппаратные комплексы позволяют

регистрировать низкочастотные акустические колебания от лавинного очага, порождаемые движением снежной массы по склону, на расстояниях до 5 км [Asming et al., 2021]. В ходе опытной эксплуатации оба комплекса подтвердили высокую эффективность оперативного обнаружения фактов схода снежных лавин и в настоящее время готовы к практическому применению и тиражированию. Одним из перспективных мест разворачивания такого комплекса являются горнолыжные курорты Приэльбрусья, отличающиеся высокой лавинной опасностью.

Результат № 2. Разработана методика дистанционного контроля состояния оборудования и сооружений крупных промышленных объектов, позволяющая по непрерывным записям сейсмометрических и сейсмологических систем решать следующие задачи: определять критический характер вибраций работающих механизмов на большом удалении от них; выполнять мониторинг технического состояния сооружений по изменениям их собственных частот; получать дополнительную объективную информацию, необходимую для расследования причин возникновения нештатных ситуаций на крупных промышленных объектах [Emanov et al., 1998; Seleznev et al., 1998; Emanov, Bakh, 2019].

В 2019 г. на базе данной методики разработана технология диагностики физического состояния оборудования, зданий и сооружений ГЭС, позволяющая осуществлять дистанционный вибрационный контроль работающих гидроагрегатов, плотины и других сооружений гидроузлов. Приемы диагностики состояния плотины по изменениям собственных частот внедрены на Саяно-Шушенской ГЭС и готовятся к внедрению на Чиркейской ГЭС [Liseikin et al., 2020; Hsu et al., 2020]. Созданная технология отличается от известных разработок высокой степенью детальности и точности анализа.

Результат № 3. Использование возможностей УНУ в зонах развития вулканических процессов на Камчатке привело к разработке и внедрению в эксплуатацию алгоритма и технологии автоматического выделения сейсмических сигналов, сопровождающих пепловую эмиссию на активных вулканах, и расчета высоты подъема пепла в режиме реального времени. Программные средства, входящие в состав разработки, не имеют аналогов в мировой практике и представляют собой альтернативный, не зависящий от погодных условий инструмент для оценки высоты подъема пепла (в отличие от видеонаблюдений). Они же отвечают за автоматическую адресную рассылку информации об обнаруженных опасных пепловых выбросах с использованием современных средств связи (электронная почта, sms-сообщения). Достоверность прогноза высоты пепловых выбросов в условиях ограниченной видимости оценивается на уровне 70 % (коэффициент корреляции по оценке высоты составляет $R=0.85$), при этом удается обнаруживать практически все выбросы без пропусков [Senyukov, 2013; Bliznetsov, Senyukov, 2016].

Результат № 4. Технические средства, используемые в УНУ, отличаются высокими эксплуатационными характеристиками, что позволяет не только проводить сейсмологические наблюдения непрерывно и качественно, но при необходимости локально усиливать их в самые кратчайшие сроки. Ярким примером использования такого подхода является проведение детальных сейсмологических наблюдений в очаговой зоне сильнейшего в мире техногенного землетрясения, которое зарегистрировано в районе Бачатского угольного разреза (Кемеровская область) 18 июня 2013 г. Землетрясение, имевшее магнитуду 6.1, произошло в пределах крупнейшего в Сибири угольного разреза ($12 \times 2 \times 0.35$ км). Здесь подробно изучены динамика и структура наведенной сейсмичности, выявлены основные фазы в развитии интенсивного афтершокового процесса, оценены механизмы наиболее сильных событий, установлены особенности глубинного распределения гипоцентров техногенных землетрясений, связанных с разработкой разреза [Emanov et al., 2016, 2018].

Аналогичный подход с экстренным увеличением плотности сейсмических наблюдений сетью временных станций периодически используется и при возникновении сильных природных землетрясений. Так, к примеру, была подробно изучена эпицентральная зона Катав-Ивановского землетрясения на Южном Урале ($m_b=5.4$, $I_0=6$ баллов), произошедшего 4 сентября 2018 г. Сеть, развернутая в течение первых суток после землетрясения, позволила впервые для Урала зафиксировать мощный афтершоковый процесс, активная стадия которого продолжалась более одного года. Ретроспективный анализ исторических сейсмических данных показал, что данный район является сейсмически активным уже продолжительное время, и данная особенность не замечалась только из-за отсутствия регулярных наблюдений вблизи очаговой зоны. Что характерно, имеющиеся данные свидетельствуют о предрасположенности многих тектонических очагов Южного Урала сопровождаться афтершоками, а само Катав-Ивановское землетрясение всего лишь стало самым продуктивным из них [Dyagilev et al., 2020].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных УНУ СИЗК МАК выполнен целый комплекс фундаментальных, поисковых и прикладных научных исследований, направленных на получение новых знаний в области сейсмологии и геофизики, проведены мониторинговые сейсмологические и геофизические наблюдения на глобальном, федеральном, региональном и локальном уровнях, разработаны новые методы и подходы обработки и интерпретации измерений. Внедрение в работу УНУ СИЗК МАК новых научно-технических разработок (инструментальные и программные средства) обеспечило получение большого объема уникальных данных о различных проявлениях сейсмичности на территории Российской Федерации и мира. К настоящему времени накоплен

огромный объем сейсмологических данных, охватывающий более чем 100-летний период наблюдений и доступный для широкого круга исследователей и изыскателей. Постоянными пользователями УНУ СИЗК МАК являются многие научные организации, направление исследований которых связано с науками о Земле, а также органы исполнительной власти, отвечающие за безопасность жизнедеятельности на подведомственных территориях. Растет спрос со стороны изыскательских организаций, занимающихся оценкой сейсмической опасности.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность многочисленным коллегам из ФИЦ ЕГС РАН за их значительный вклад в поддержку работоспособности и высоких технических показателей работы УНУ СИЗК МАК, несмотря на моральные и финансовые сложности, возникающие при ее эксплуатации.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Akimov A.P., Krasilov S.A., 2020. Program Complex WGS "System of Processing of Seismic Data". Certificate of State Registration of Computer Programs No 2020664678 of November 16, 2020. ROSPATENT (in Russian) [Акимов А.П., Красилов С.А. Программный комплекс WGS «Система обработки сейсмических данных»: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020664678 от 16.11.2020. РОСПАТЕНТ, 2020].

Asming V.E., Fedorov A.V., Korchak P.A., Motorin A.Y., 2021. LORS2 Software Package for Monitoring the Seismicity of the Khibiny Massif: Construction Principles and Basic Algorithms. *Seismic Instruments* 57, 27–37. <https://doi.org/10.3103/S0747923921010059>.

Bliznetsov V.E., Senyukov S.L., 2016. ADAP Software for Automatic Detection of Ash Emission at Active Volcanoes and Calculations of Ash Plume Height Using Seismological Data. *Seismic Instruments* 52 (1), 32–42. <https://doi.org/10.3103/S0747923916010023>.

Butyrin P.G., Krasilov S.A., 2021. The Unified System for Storing and Accessing Geophysical Data. *Traditions and New Approaches. The Russian Journal of Seismology* 3 (4), 77–87 (in Russian) [Бутырин П.Г., Красилов С.А. Единая

система хранения и доступа к геофизическим данным. Традиции и новые подходы // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 4. С. 77–87]. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.05>.

Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Matveenko E.A., Chebrov D.V., 2020. Seismological Data Information System in Kamchatka Branch of Geological Survey of the Russian Academy of Sciences: Organization Principles, Main Elements and Key Functions. *Geophysical Research* 21 (3), 66–91 (in Russian) [Чеброва А.Ю., Чемарёв А.С., Матвеевко 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]. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>.

Database "Earthquakes of Russia", 2015. Certificate of State Registration of Database No. 2015620591 of April 7, 2015. ROSPATENT (in Russian) [База данных «Землетрясения России»: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620591 от 7.04.2015. РОСПАТЕНТ, 2015].

Droznin D.V., Droznina S.Y., 2010. Program for Seismic Signal Processing DIMAS. *Seismicheskie Pribory* 46 (3), 22–34 (in Russian) [Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34].

Dyagilev R.A., Verkholtantsev F.G., Varlashova Yu.V., Shulakov D.Yu., Gabsatarova I.P., Epifanskiy A.G., 2020. Katav-Ivanovsk Earthquake on 04.09.2018, $m_b=5.4$ (Urals). *Russian Journal of Seismology* 2 (2), 7–20 (in Russian) [Дягилев Р.А., Верховоланцев Ф.Г., Варлашова Ю.В., Шулаков Д.Ю., Габсатарова И.П., Епифанский А.Г. Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г., $m_b=5.4$ (Урал) // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01>.

Emanov A.F., Bakh A.A., 2019. Development of Algorithms for Interpreting the Method of Standing Waves for the Study of Buildings and Structures of Complex Constructions. *Earthquake Engineering, Constructions Safety* 5, 28–35 (in Russian) [Еманов А.Ф., Бах А.А. Развитие алгоритмов интерпретации метода стоячих волн для исследования зданий и сооружений сложных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 5. С. 28–35].

Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., 2016. The Technogenic $M_L=6.1$ Bachatsky Earthquake of 18 June 2013 in Kuzbass: the World Strongest Event during Mining Operations. *Problems of Engineering Seismology* 43 (4), 34–60 (in Russian) [Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Техногенное Бачатское землетрясение 18.06.2013 в Кузбассе – сильнейшее в мире при добыче твердых полезных ископаемых // Вопросы инженерной сейсмологии. 2016. Т. 43. № 4. С. 34–60]. <https://doi.org/10.21455/vis2016.4-3>.

Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Vorona U.Y., Serezhnikov N.A., 2018. Seismic Effect of Industrial

Explosions in Western Siberia and Induced Seismicity. *Problems of Engineering Seismology* 45 (4), 5–24 (in Russian) [Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Ворона У.Ю., Серёжников Н.А. Сейсмический эффект промышленных взрывов в Западной Сибири и наведенная сейсмичность // Вопросы инженерной сейсмологии. 2018. Т. 45. № 4. С. 5–24]. <https://doi.org/10.21455/VIS2018.4-1>.

Emanov A.F., Seleznev V.S., Kuzmenko A.P., Gritsenko S.A., Saburov V.A., Danilov I.A., Bakh A.A., 1998. Detailed Engineering and Seismological Studies of Buildings and Structures. In: *Methods of Study, Structure and Monitoring of the Lithosphere. Proceedings of the International Conference (September 6–13, 1998)*. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 61–72 (in Russian) [Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Кузьменко А.П., Гриценко С.А., Сабуров В.А., Данилов И.А., Бах А.А. Детальные инженерно-сейсмологические исследования зданий и сооружений // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы: Материалы международной конференции (6–13 сентября 1998 г). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 61–72].

Fedorov A.V., Fedorov I.S., Voronin A.I., Asming V.E., 2021. Mobile Infrasound Avalanche Monitoring System: General Design Principle and Application of Results. *Seismic Instruments* 57, 369–375. <https://doi.org/10.3103/S0747923921040058>.

Hsu T.Y., Valentino A., Liseikin A., Krechetov D., Chen C.C., Lin T.K., Wang R.Z., Chang K.C., Seleznev V., 2020. Continuous Structural Health Monitoring of the Sayano-Shushenskaya Dam Using Off-Site Seismic Station Data Accounting for Environmental Effects. *Measurement Science and Technology* 31 (1), 015801. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab393c>.

Krasilov S.A., Akimov A.P., Kolomiets M.V., Poigina S.G., 2020a. Database of the WSG Software Package "Seismic Data Processing System". Certificate of State Registration of the Database No. 2020622357 of November 20, 2020. ROSPATENT (in Russian) [Красилов С.А., Акимов А.П., Коломиец М.В., Пойгина С.Г. База данных программного комплекса WSG «Система обработки сейсмических данных»: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622357 от 20.11.2020. РОСПАТЕНТ, 2020].

Krasilov S.A., Kolomiets M.V., Poigina S.G., 2020b. Database "Earthquakes" of the Urgent Reporting Service. Certificate of State Registration of the Database No. 2020622314 of November 18, 2020. ROSPATENT (in Russian) [Красилов С.А., Коломиец М.В., Пойгина С.Г. База данных «Землетрясения» Службы срочных донесений: Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622314 от 18.11.2020. РОСПАТЕНТ, 2020].

Liseikin A.V., Seleznev V.S., Adilov Z.A., 2020. Seasonal Changes in the Parameters of the Normal Modes of the Chirkey Hydroelectric Power Plant Dam According to the Standing Waves Method. *Power Technology and Engineering* 53, 681–686. <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01138-6>.

Petrova N.V., Krasilov S.A., Goryunov S.N., Kugaenko Yu.A., Kurova A.D., 2019. Information Resources of the Geophysical

Service of the Russian Academy of Sciences. Certificate of State Registration of the Computer Program No. 2019622012 of November 6, 2019. RO SPATENT (in Russian) [Петрова Н.В., Красилов С.А., Горюнов С.Н., Кугаенко Ю.А., Курова А.Д. Информационные ресурсы Единой геофизической службы РАН: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019622012 от 6.11.2019. РОСПАТЕНТ, 2019].

Saltykov V.A., 2011. A Statistical Estimate of Seismicity Level: The Method and Results of Application to Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology* 5, 123–128. <https://doi.org/10.1134/S0742046311020060>.

Seleznev V.S., Kuzmenko A.P., Emanov A.F., Saburov V.A., Baryshev V.G., Danilov I.A., Bakh A.A., 1998. Possibilities and Results of Engineering Seismological Survey of Buildings

and Structures. In: *Methods of Study, Structure and Monitoring of the Lithosphere. Proceedings of the International Conference (September 6–13, 1998)*. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 98–104 (in Russian) [Селезнёв В.С., Кузьменко А.П., Еманов А.Ф., Сабуров В.А., Барышев В.Г., Данилов И.А., Бах А.А. Возможности и результаты инженерно-сейсмологического обследования зданий и сооружений // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы: Материалы международной конференции (6–13 сентября 1998 г). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 98–104].

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. <https://doi.org/10.1134/S0742046313010077>.