

УДК 550.34.054, 550.34.038.3, 550.34.033

## Оцифровка сейсмограмм мирных ядерных взрывов

© 2022 г. Р.А. Дягилев<sup>1</sup>, П.Г. Бутырин<sup>1</sup>, К. Мяки<sup>2</sup>, Д. Бурк<sup>2</sup>, К. Бурхард<sup>2</sup>,  
Б. Уилер<sup>2</sup>, К. Уитт<sup>2</sup>, А.А. Добрынина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия; <sup>2</sup>Университет штата Мичиган, г. Ист-Лансинг, США;  
<sup>3</sup>ИЗК СО РАН, г. Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 26.01.2022 г.

**Аннотация.** Освещена работа в рамках совместного проекта ФИЦ ЕГС РАН и Мичиганского университета, направленная на восстановление, сохранение, сканирование и оцифровку исторических сейсмограмм мирных ядерных взрывов (МЯВ) на территории СССР. Всего в стране было произведено 122 МЯВ в период с середины 60-х до конца 80-х годов XX века. Взрывы производились в различных геологических условиях и имели широкую географию, представляя, таким образом, уникальный набор данных для геофизических исследований. Все взрывы отлично регистрировались региональными сейсмологическими сетями, в связи с чем было накоплено несколько тысяч записей таких событий. Работа по проекту направлена на упорядочивание этого уникального наследия из аналоговых сейсмограмм и на его сохранение для будущих поколений. Также создаются электронные копии сейсмограмм в виде растров высокого разрешения, которые в дальнейшем подвергаются оцифровке и анализу. Большинство сейсмограмм получено с помощью короткопериодных приборов, поэтому после корректного учёта данных калибровки оцифрованные записи позволяют восстановить параметры колебаний в полосе частот до 5 Гц.

**Ключевые слова:** мирный ядерный взрыв, аналоговая сейсмограмма, сканирование, оцифровка, частотная характеристика, компенсация влияния инструмента, контроль качества.

**Для цитирования:** Дягилев Р.А., Бутырин П.Г., Мяки К., Бурк Д., Бурхард К., Уилер Б., Уитт К., Добрынина А.А. Оцифровка сейсмограмм мирных ядерных взрывов // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 1. – С. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.1.02>

### Введение

Идея использования ядерных взрывов в мирных целях в СССР возникла практически сразу после успешного испытания ядерных зарядов в военных целях. В сравнении с химическими взрывами ядерные выгодно отличались высокой плотностью энергии и низкой стоимостью производства. Оставались неясными аспекты, связанные с безопасностью их использования на практике в народном хозяйстве, а также экологические последствия ввиду возможного радиоактивного заражения территории. Предполагалось, что все эти вопросы могут быть решены в ходе испытаний, в связи с чем с 1965 по 1988 г. в стране было произведено 122 ядерных взрыва в мирных целях [Sultanov, 1999]. Основными областями применения таких взрывов были формирование рельефа местности при строительстве каналов и водохранилищ, интенсификация добычи нефти и газа или перекрытие газовых фонтанов на месторождениях, созда-

ние подземных полостей для газохранилищ или для захоронения промышленных отходов [Мирные ..., 2000]. Несмотря на то, что в настоящее время МЯВ больше не производятся, многие аспекты, связанные с их реализацией, остаются актуальными до сих пор. Безусловно, важными являются вопросы, связанные с их экологическими последствиями, что находит отражение в регулярных обследованиях мест их проведения [Храмцов и др., 2021]. Отдельно стоит отметить взрывы, выполненные для решения задач инженерной сейсмологии и для производства глубинного сейсмического зондирования Земли.

Не вникая в успехи и проблемы, обнаруженные при производстве взрывов, отметим, что все они, независимо от цели их проведения, имели значительный сейсмический эффект, который мог фиксироваться действовавшими в то время региональными сейсмологическими сетями. Взрывы имели различную мощность: от 0.01 до 140 кт [Мирные ..., 2000; Sultanov, 1999], поэтому сейсмические волны от самых сильных

из них могли регистрироваться на расстояниях до нескольких тысяч километров. Для каждого взрыва точно установлены координаты и время, что делает такой источник сигнала идеальным для изучения кинематики распространения волн, а значит и для изучения скоростного строения земной коры и даже напряжённого состояния породного массива. Очаги природных землетрясений в этом отношении проигрывают взрывам, так как их местоположение определяется менее точно, и происходят они только в сейсмоактивных регионах, тогда как ядерные взрывы проводились, в том числе, в асейсмичных районах.

Учитывая, что все записи были получены в доцифровую эпоху, их интерпретация предполагала работу только с величинами, измеренными вручную: времена вступлений, амплитуды, преобладающие периоды. Современные подходы позволяют из сейсмических записей извлечь гораздо больше информации, так как часто оперируют непосредственно волновыми формами. Таким образом, становится весьма актуальной задача трансформации аналоговых записей в цифровые, чтобы получить возможность обработки исторических данных современными методами.

В 2019–2022 гг. данная работа выполняется в рамках совместного проекта ФИЦ ЕГС РАН и Мичиганского университета, который, помимо задачи оцифровки, также ставит другие задачи. Одной из них значится сохранение аналоговых сейсмограмм для следующих поколений. Будучи воспроизведёнными на фотобумаге и оставаясь невостребованными долгое время, сейсмограммы часто находятся в условиях, которые не способствуют их длительной сохранности. Так, например, сейсмограммы в Якутске и Южно-Сахалинске лежат в неотапливаемом и непроветриваемом помещении, подвержены попаданию влаги и гниению. В остальных хранилищах недостаточно места для надлежащего расположения бумажных лент. В архивах работа с сейсмограммами часто не ведётся из-за выбытия специалистов и отсутствия технических средств — сканеров, файловых хранилищ. Работа в рамках проекта направлена на частичное решение данной проблемы, включая оборудование архивов стеллажами и кондиционерами (как, например, в Якутске), оснащение их современными техническими средствами (широкоформатные сканеры, сетевые файловые хранилища с управляемым доступом).

Основная задача проекта состоит в оцифровке аналоговых записей. Несмотря на множество усилий специалистов по оцифровке растров в других

странах, обладающих такими же внушительными хранилищами, данный процесс в большинстве случаев автоматизации поддаётся слабо. Существуют отдельные успешные технологии и алгоритмы оцифровки, но они имеют весьма ограниченное применение, так как аналоговая запись практически всегда имеет искажения, связанные с техническими особенностями процесса её получения, и часто такие искажения накладываются друг на друга, из-за чего разобраться в них может только опытный специалист, знакомый со старыми средствами регистрации. Проект предусматривает создание полуавтоматической технологии трансформации аналоговых записей в цифровые, которая позволяет максимально учесть и устранить все возможные дефекты бумажных сейсмограмм, и главное — контролировать качество такой трансформации.

Так как аппаратура, применяемая для получения аналоговых записей, была менее совершенна в сравнении с современными инструментами, важным аспектом становится восстановление сейсмических записей — исключение влияния эффекта аппаратуры. Способы хранения калибровочной информации современных приборов существенно отличаются от тех, что использовались 30 лет назад. Поэтому важной задачей проекта является трансформация данных калибровки в современный вид.

Заключительным моментом в проекте значится предоставление мировому научному сообществу открытого доступа к преобразованным в цифровой вид данным.

### **Исходные данные и технические средства их получения и хранения**

В рассматриваемый период времени на территории СССР существовало несколько региональных сейсмологических сетей, принадлежащих различным опытно-методическим экспедициям и научным организациям. На базе каждой из них создавался архив бумажных сейсмограмм. В работе рассматриваются только те, которые в силу исторических причин остались на территории современной России и вошли в состав ФИЦ ЕГС РАН. Среди них — архивы в Обнинске, Кисловодске, Апатитах, Махачкале, Новосибирске, Иркутске, Магадане, Якутске, Петропавловске-Камчатском, Южно-Сахалинске. Каждый из них насчитывает сотни тысяч записей различных сейсмических событий, в том числе и МЯВ.

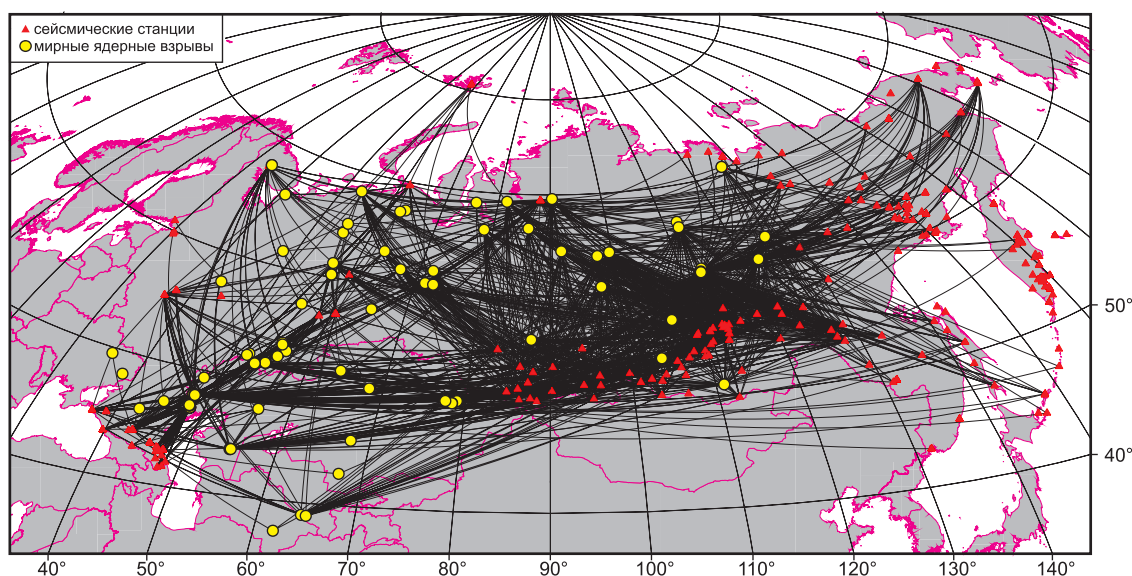
Всего с 1965 по 1988 г. работало 239 станций, период работы некоторых из них охватывает

весь временной интервал, остальных — только его часть. Одновременно на одной станции могла вестись регистрация несколькими приборами, поэтому в таких случаях создавалось соответствующее количество записей. Обычно использование расширенного инструментального комплекта приборов практиковалось на опорных станциях так, чтобы иметь возможность обрабатывать не только региональную сейсмичность, но и сильные землетрясения на телесеismicических расстояниях. В то же время на многих рядовых станциях часто велась регистрация двумя приборами. Наличие записей не означает, что сигнал на них был достаточно сильным, чтобы его можно было увидеть и обработать. Табл. 1 демонстрирует распределение потенциально доступного числа записей МЯВ среди имеющихся архивов. Указанное число записей учитывает все возможные случаи регистрации взрывов существовавшими на момент его

производства станциями и действующими приборами. Всего таких вариантов насчитывается более 25 тысяч. Однако стоит учесть тот факт, что не все события могли превышать уровень помех. Если принять, что событие могло регистрироваться только на тех станциях, где уровень сигнала был достаточно сильным, достигая на записи амплитуды 100 мм, то количество полезных записей сократится примерно до 3.6 тысяч. Соответствующее этому случаю распределение данных в пространстве представлено на рис. 1. Здесь отображены станции, существовавшие в период с 1965 по 1988 г., эпицентры МЯВ, а также проекции лучей, по которым распространялись сейсмические волны и вдоль которых возможно измерение времён пробега. Если также учесть, что не все сейсмограммы могут быть доступны (утрачены или испорчены временем), то число полезных данных будет несколько меньше.

**Таблица 1.** Распределение потенциально доступного числа записей МЯВ среди архивов аналоговых сейсмограмм

Код сети	Расположение архива	Количество записей	% от общего числа
OBGSR	Обнинск	4776	18.9
KMGSR	Кисловодск	95	0.4
KOGSR	Апатиты	508	2.0
YAGSR	Якутск	1339	5.3
BAGSR	Иркутск	4216	16.7
ASGSR	Новосибирск	2413	9.5
DAGSR	Махачкала	459	1.8
NEGSR	Магадан	1446	5.7
SAGSR	Южно-Сахалинск	3613	14.3
KAGSR	Петропавловск-Камчатский	6408	25.4
	Всего	25273	



**Рис. 1.** Карта-схема, отражающая потенциальный объём полезных сейсмических данных по МЯВ



Порча бумажных сейсмограмм, пролежавших несколько десятилетий в ненадлежащих условиях, — достаточно обычное явление среди множества сейсмологических архивов во всём мире. Научное сообщество хорошо понимает, что эти архивы содержат записи, которые по объёму сопоставимы с объёмом легко доступных данных цифровой эпохи регистрации. Главное их достоинство — это то, что они содержат записи уникальных событий, которые повторятся, возможно, только через сотни лет (сильные землетрясения) или даже больше никогда не произойдут (ядерные взрывы). Есть также понимание, что быстро трансформировать этот объём данных в цифровой вид не получится, поэтому обеспечение сохранности аналоговых сейсмограмм для будущих поколений является весьма важной задачей. Маленьким шагом в этом процессе является приведение мест хранения в удовлетворительное состояние. Одним из таких примеров может послужить переоборудование цокольного помещения в здании Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН (рис. 2) для нужд архива. Здесь выполнен ремонт, установлены стеллажи для удобного доступа к сейсмограммам, смонтированы кондиционеры, поддерживающие постоянный микроклимат. До 2020 г. архив хранился в деревянном неотапливаемом сарае.

Важным элементом архива является его технологическая оснащённость. До 2020 г. широкоформатные сканеры имелись только в Обнинске, Новосибирске, Петропавловске-Камчатском и на сейсмостанции «Москва». Только широкоформатные сканеры с шириной сканируемой области до 1 м (максимальная длина бумажной ленты) подходят для корректного преобразования

фотозаписи в растр. При продольном сканировании, которое можно выполнять дешёвыми узкоформатными протяжными сканерами, становятся существенными искажения, связанные с неравномерностью прокрутки ленты. Для реализации процесса сканирования в 2021 г. широкоформатными сканерами оснащены восемь хранилищ, обладающих самыми большими объёмами сейсмограмм (все, кроме архивов в Апатитах и Кисловодске).

Средний объём файла растра, содержащего цифровой образ одной фотозаписи (цветное 32-битное изображение с разрешением не менее 600 dpi, без сжатия), составляет 500 МБ. Очевидно, что для хранения и обеспечения доступа к таким файлам необходимы сетевые хранилища больших объёмов. Данную потребность закрывают четыре сетевых хранилища объёмом по 8 ТБ, а также четыре сервера, используемые региональными обрабатывающими центрами для хранения потоков действующих цифровых сейсмических станций.

#### Технология оцифровки аналоговых сейсмограмм

Для разработки технологии оцифровки необходимо иметь полное представление о процессе получения аналоговых сейсмических записей. Значение имеют как сам принцип регистрации, так и технические средства, которые его реализуют. В рамках проекта рассматривались только бумажные ленты, запись на которые велась фотографическим способом.

Для получения таких лент использовались сейсмографы — системы из двух компонентов



Рис. 2. Архив Якутского филиала ФИЦ ЕГС РАН до 2020 г. (фото слева) и вид специально оборудованного помещения в 2021 г. (фото справа)

– сейсмометра и гальванометра [Аппаратура ..., 1974]. Сейсмометр преобразует колебания грунта в электрический ток, гальванометр, наоборот, преобразует ток в колебательные движения, для которых удобно производить запись на бумагу. Среди сейсмометров во второй половине XX в. наибольшее распространение получили модели СКД (диапазон регистрируемых периодов от 0.5 до 60 с), СКМ-3 (0.1–3 с) и ВЭГИК (частотный диапазон от 1 до 100 Гц). Регистрация сигналов производилась зеркальными фотогальванометрами, такими как ГК-VII-M (собственный период от 0.18 до 1.3 с), SPG-4 (90 с) и др. Сформированный специальным осветителем световой пучок направлялся на зеркало гальванометра, откуда отражался и фокусировался на вращающийся с постоянной скоростью барабан регистрира, на поверхность которого крепилась фотобумага. По мере вращения барабана луч получал систематическое смещение, позволяя получить на ленте длиной около 90 см непрерывный след продолжительностью до нескольких часов. Обычно одну ленту условно делили на три зоны, чтобы вести синхронную запись от маятников с различной ориентацией осей. Синхронизация записей с мировым временем осуществлялась посредством периодического (через 1 мин) кратковременного искусственного искажения сигнала (наложение малоамплитудных прямоугольных импульсов или изменение яркости).

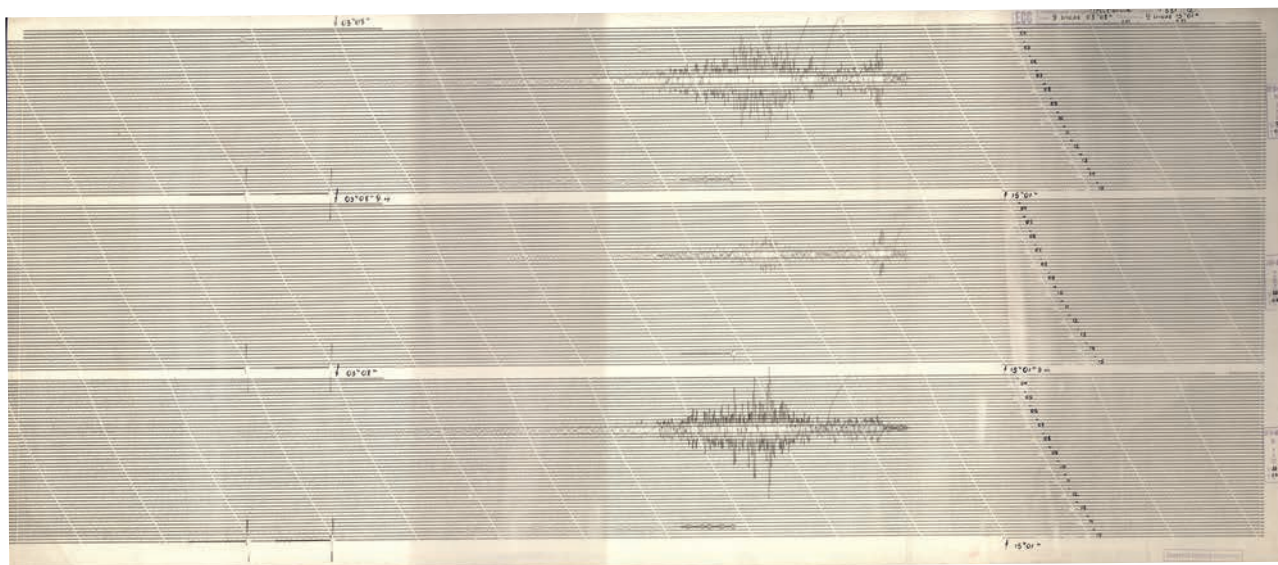
В режиме ожидания запись имеет небольшую амплитуду и очень редко пересекает соседний

след. Обычно интервал между соседними следами измеряется несколькими миллиметрами. Результат фотофиксации весьма чувствителен к продолжительности засвечивания и яркости луча. При сильных колебаниях, возникающих во время прохождения волн от землетрясения, обычной яркости луча может быть недостаточно для качественной засветки ленты. Для таких случаев в некоторых моделях осветителей была реализована автоматическая регулировка яркости луча, которая увеличивалась при наличии высокоамплитудного сигнала.

После засветки всей свободной поверхности ленты производилось переключение записи на другой барабан. Продолжительность промежутка времени с отсутствием записи между последовательными лентами могла составлять несколько секунд. Засвеченную ленту снимали и передавали в фотолабораторию на проявку. Каждая лента после проявки получала свою маркировку, включающую порядковый номер ленты, название станции, каналов, типы приборов, времена начала и окончания записи, калибровочные данные и др. Пример типичной ленты с аналоговой записью сейсмического события представлен на рис. 3.

Использование такой технологии регистрации вносит целый ряд искажений и дефектов на сейсмическую запись [Trifunac et al., 1999]. Перечислим основные из них:

– все записи имеют скос, который возникает из-за необходимости смещать нулевой уровень сигнала при вращении барабана.



**Рис. 3.** Пример, демонстрирующий полноразмерную сейсмограмму МЯВ «Факел» (9 июля 1972 г.), записанного сейсмической станцией «Обнинск» (ОВН).

Сейсмограмма читается справа налево

Дополнительный скос может возникать, если гальванометр имеет не строго вертикальное положение;

- скорость вращения барабана непостоянна, что делает шкалу времени неравномерной;

- каждую минуту на сигнал накладывает метка времени длиной около 1–2 с; в зависимости от используемой системы регистрации метка наносится разными способами: либо посредством смены яркости, либо наложением на запись прямоугольного импульса – таким образом, в некоторых случаях при использовании первого способа и практически всегда при использовании второго способа измерение параметров полезного сигнала в этот короткий промежуток времени невозможно;

- при совершении полного оборота барабана записанный след луча переходит на начало ленты, в результате чего на стыке краёв он может теряться на короткий интервал времени (доли секунды);

- запись полезного сигнала может быть прервана при смене лент, в результате чего сигнал может отсутствовать в течение нескольких секунд;

- запись может резко сменить свою яркость и быть почти неразличимой из-за большой скорости движения луча при сильных колебаниях; также яркость может меняться из-за неисправности системы регулировки яркости или снижаться со временем в результате затемнения лампы осветителя;

- след от луча имеет размеры от 1 до 3 мм, что накладывает свои ограничения на разрешающую способность записи;

- нить лампы осветителя и её стеклянные стенки могут иметь искривления, из-за чего форма луча становится асимметричной, что затрудняет корректное отслеживание следа.

Вторая группа искажений возникает уже после проявки изображений. Среди них:

- деформация ленты в результате неоднородной структуры бумаги, неравномерного высыхания после проявки или неправильного хранения;

- лента имеет области со сплошной засветкой или испорченные под действием грибка и времени, что делает сигнал неразличимым;

- на ленте сигнал неразличим в местах физического износа (надрывы, места сгиба);

- маркировка на ленте отсутствует или нанесена частично.

Третья группа искажений может проявиться при сканировании. Такие искажения могут быть устранены полностью или сведены к минимуму при использовании правильных подходов в работе:

- деформация изображения при продольном сканировании ленты;

- поворот растра на малозаметный угол;

- частичное отсутствие изображения ленты в файле в результате превышения максимально возможной ширины сканируемой области или неправильной (излишней) ручной обрезки растра.

Четвёртая группа искажений вносится оператором, выполняющим оцифровку:

- неточное следование форме сигнала;

- некорректно выбранный масштаб по шкале амплитуды и шкале времени;

- неверно указанные момент отсчёта, идентификаторы записи (станция, канал).

Технология трансформации аналоговой записи в цифровую разработана с учётом того, что она должна обеспечить устранение всех или большей части искажений, образовавшихся при регистрации, проявке ленты и её хранении, а также чтобы она не допускала внесения новых искажений в самом процессе оцифровки. Весь процесс трансформации можно разделить на семь этапов:

- 1 – сканирование (создание растра достаточно высокого разрешения);

- 2 – предварительная обработка (подготовка растра к оцифровке в графическом редакторе);

- 3 – оцифровка (отметка характерных точек видимого сигнала);

- 4 – трансформация последовательности характерных точек в запись в формате miniseed;

- 5 – независимая проверка качества трансформации на каждом предыдущем этапе создания цифровой записи;

- 6 – преобразование частотной характеристики сейсмического канала в запись с использованием полюсов и нулей;

- 7 – заполнение базы данных сведениями об оцифрованной записи.

Процедура сканирования достаточно проста, однако для того, чтобы сделать её рутинной, проведён ряд исследований, в результате которых выявлены наилучшие модели сканеров, которые почти не касаются поверхности лент и не вносят при сканировании на них дополнительных физических дефектов. Наиболее адаптированными моделями для сканирования сейсмограмм на сегодняшний день являются модели WT36CL-600 (WideTek), обладающие высокой производительностью (время полноцветного сканирования одной ленты размером 90×40 см с разрешением 600 dpi не превышает 15 с), высоким разрешением (до 3000 dpi), которые к тому же имеют встроенное программное обеспечение, позволяющее автоматически устранять поворот прямоугольных изображений и сохранять



в сетевое хранилище согласно заданному шаблону имени. Определён наилучший способ подачи лент – поперечный как вносящий минимальные искажения при протягивании лент. При стандартной скорости прокрутки барабана 60 мм/мин установлена связь максимальной различимой частоты ( $F_{\max}$ ) восстановленных колебаний с разрешением исходного растра и размером фотоследа на нём (табл. 2).

Готовый растр часто требует предварительной обработки для того, чтобы, во-первых, снизить влияние искажений первой группы и, во-вторых, чтобы устранить остаточные искажения, внесённые в результате сканирования. В первую очередь, предварительная обработка включает определение угла, на который следует повернуть растр, чтобы колебания происходили строго вдоль вертикальной оси. Ориентиром при расчёте такого угла служат временные метки всех трёх компонент записи, которые по определению должны быть синхронными, а следовательно, располагаться на одной вертикальной оси.

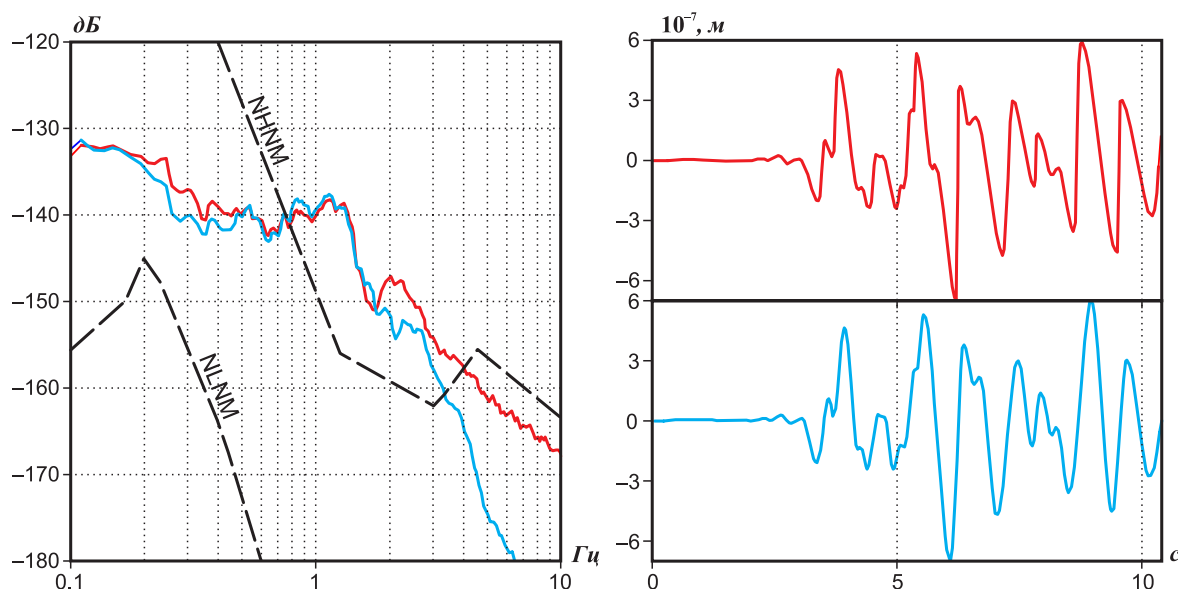
После расчёта угла растр соответствующим образом поворачивается. Может иметь место ситуация, когда из-за деформации бумаги угол поворота на различных участках ленты будет разным. Опыт показывает, что наиболее чувствительными к скосу являются высокочастотные колебания (рис. 4), в связи с чем при определении угла поворота предпочтение отдаётся тем участкам, где присутствуют продольные волны.

Кроме этого, в ходе подготовки растра может потребоваться разрезать его на две части и срастить их снова в другой последовательности, чтобы полезный сигнал не разрывался на стыке и прослеживался только на одной трассе по всей длине растра. Также возможны случаи, когда приходится сращивать две разные ленты, следующие друг за другом, если сигнал при записи был разбит на части. Особенностью сращивания лент является необходимость контролировать плавность перехода трасс с одной части на другую. Не всегда одновременно все трассы стыкуются идеально без вертикальных смещений.

**Таблица 2.** Зависимость максимальной различимой частоты ( $F_{\max}$ ) восстановленных записей от разрешения растра и размеров следа (при разрешении 600 dpi)

Разрешение, dpi	$F_{\max}$ , Гц	Размер следа, пиксели	$F_{\max}$ , Гц
200	3–4	1	6–7
300	5–6	5	5
600	7–10	20	7–10*
>1500	<12	50	3.5

Примечание: \* – отклонение связано с повышенным вниманием оцифровщика и небольшим объёмом экспериментальных данных, задействованных при исследовании.



**Рис. 4.** Спектр мощности, показывающий ошибки частотного состава в результате оцифровки слегка повернутого сигнала (красная линия) в сравнении с правильно ориентированной сейсмограммой (синяя линия)

В случаях появления смещения трасс приходится создавать отдельные копии растров для каждой компоненты движения и минимизировать смещения только для части трасс, отдавая предпочтение тем из них, на которых присутствует полезный сигнал.

Оцифровка (векторизация) сейсмограмм происходит с помощью программы WaveTrack 1.0 (разработка Новосибирского регионального центра информационных технологий, автор В.Д. Суворов). Попытки применения других программ, в том числе с автоматическим прослеживанием трасс [Bromirski, Chuang, 2003; Pintore et al., 2005; Xu Y., Xu T., 2014; Bogiatzis, Ishii, 2016], не дали каких-либо преимуществ при обработке сложных сигналов с большими амплитудами и высокочастотным составом колебаний. В сравнении с ними WaveTrack обладает более простым интерфейсом и в ручном режиме в достаточной мере позволяет учесть самые критические искажения и недостатки аналоговых записей. Наиболее распространённый случай, когда автоматическое прослеживание не работает, — это наложение соседних трасс друг на друга. При самых сильных колебаниях возможно также пересечение трасс от соседних компонент (рис. 5), что существенно усложняет прослеживание. Для оцифровки в программе задаётся шкала амплитуд и временная шкала. Важной особенностью программы является возможность задания неравномерной временной шкалы, которая вручную подстраивается под минутные временные метки на сейсмограмме. Шкала между временными метками принимается равномерной. Оцифровка производится посредством

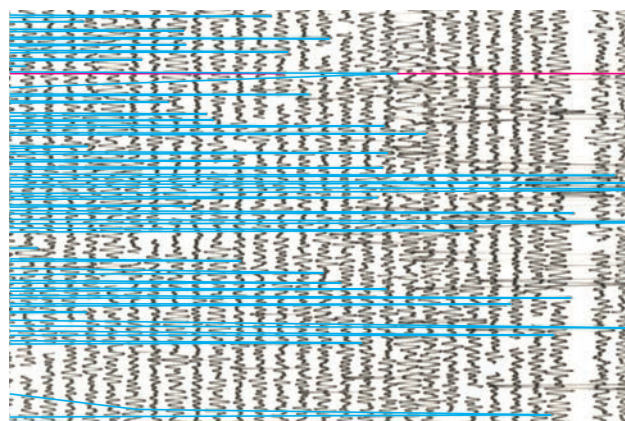


Рис. 5. Пример сложного сигнала, совмещающего две проблемы: пересечение соседних трасс и путаница со следом от высокоамплитудного сигнала соседней компоненты

последовательного указания характерных точек записи, находящихся в экстремумах и перегибах.

Получение равномерного во времени ряда последовательных значений происходит в Python-скрипте PNE2SAC (автор Д. Бурк), на вход которого подаётся результат оцифровки WaveTrack. Скрипт восстанавливает интервалы между характерными точками интерполяцией с помощью кубического Эрмитова сплайна (рис. 6), удаляет тренд и сохраняет результат с частотой дискретизации  $100 \text{ Гц}$  в виде файлов в форматах SAC и miniseed. Также в скрипте имеется возможность проверить качество первичной оцифровки посредством контроля частотного состава и выявления участков записи с остаточным скопом, который можно компенсировать в автоматическом режиме.

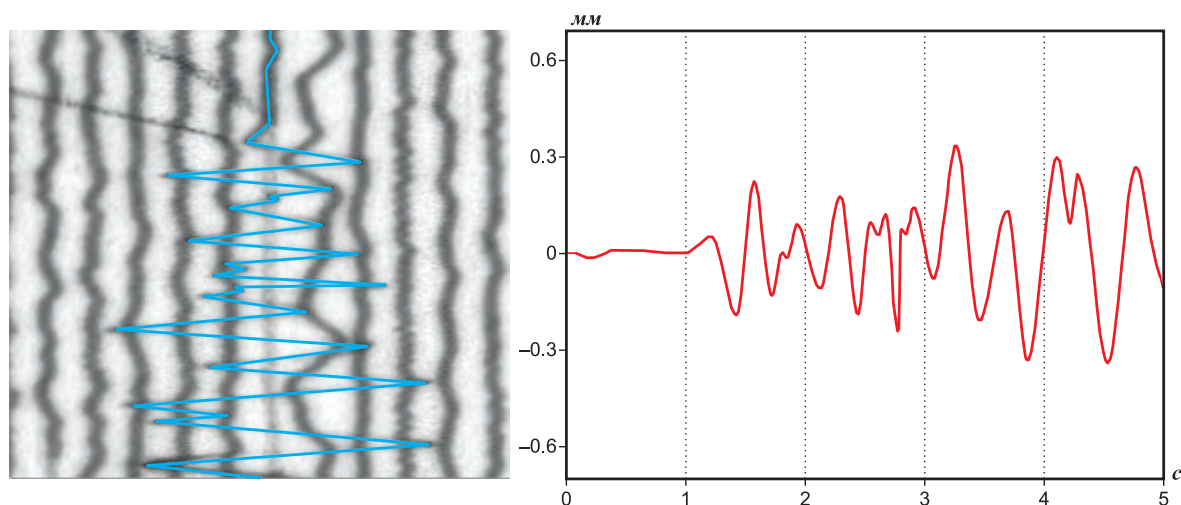


Рис. 6. Пример указания характерных точек при оцифровке (слева) и форма результирующего сигнала (справа)



Контроль качества оцифровки является неотъемлемой частью процедуры подготовки цифровых записей. В процессе задействованы несколько человек, поэтому каждая сейсмограмма проходит двухступенчатый контроль у разных операторов, чтобы исключить появление ошибок на любом из этапов. Такие ошибки могут возникнуть во время подготовки растров (неточно рассчитан поворот, неверно задан масштаб ленты), непосредственно при оцифровке (неточная расстановка характерных точек и временных меток), а также при описании метаданных сейсмограммы при её трансформации в SAC и miniseed (ошибочное указание идентификаторов каналов, времени начала записи и пр.). Проверка качества сопровождается заполнением специального формуляра, отражающего каждый параметр преобразования, которое было применено к сейсмограмме, с возможностью включения комментариев об особенностях, не вписывающихся в формализованный набор. В завершение по готовой цифровой записи определяются параметры вступления МЯВ. При их совпадении с параметрами, определёнными по оригинальной записи, считается, что сейсмограмма прошла контроль качества успешно.

### Трансформация калибровочных данных

Важным этапом трансформации аналоговых записей в цифровые является снабжение их достоверной калибровочной информацией сейсмических каналов, причём данная информация должна иметь современный вид представления – набор полюсов и нулей. Исторически сложилось так, что калибровочные данные периодически публиковались в приложениях к ежегодным сейсмологическим бюллетеням [*Параметры ...*, 1965; 1989] или в виде самостоятельных сборников [*Параметры ...*, 1988]. Калибровочной информацией снабжался каждый канал всех сейсмических приборов станции. Информация представлялась в двух видах: в параметрическом и в виде графических кривых амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Параметрический вид представления включает шесть основных величин:

- $T_s$  – собственный период сейсмометра в секундах (собственная частота  $f=1/T_s$ );
- $D_s$  – коэффициент затухания сейсмометра;
- $T_g$  – собственный период гальванометра в секундах (собственная частота  $f_g=1/T_g$ );
- $D_g$  – коэффициент затухания гальванометра;
- $\sigma^2$  – коэффициент, характеризующий электрическую связь сейсмометра и гальванометра;

$V_0$  – коэффициент увеличения сейсмографа (связки сейсмометра и гальванометра).

Дополнительно публиковались величины  $V_m$  – максимальное увеличение сейсмографа (увеличение в точке экстремума АЧХ) и  $T_m$  – диапазон периодов на уровне  $0.9 \cdot V_m$ .

Все эти параметры определялись в ходе регулярных калибровочных работ для каждой сейсмической станции. На практике же использовались графические кривые, которые рассчитывались из параметров и были более адаптированной для восприятия человеком формой представления АЧХ.

Для современной практики имеет значение параметрическая форма представления калибровочной информации, так как именно она может быть легко трансформирована в набор из четырёх полюсов и трёх нулей, являющихся комплексными корнями следующего уравнения, представляющего собой передаточную функцию сейсмического канала сейсмографа [Hagiwara, 1958; Nguyen, 1995; Peterson, Hutt, 2014]:

$$H(s) = \frac{C_0 s^3}{\frac{1}{16\pi^4} s^4 + \frac{m}{8\pi^3} s^3 + \frac{p}{4\pi^2} s^2 + \frac{q}{2\pi} s + t} \quad (1)$$

с чувствительностью  $C_0 = \frac{D_g}{T_g} V_0 \left|_{\substack{T_s > T_g \\ D_s < D_g}} = \frac{D_s}{T_s} V_0 \left|_{\substack{T_s < T_g \\ D_s > D_g}} \right.$ ,

где для упрощения записи использовались следующие переменные:

$$\begin{aligned} m &= 2(D_s f_s + D_g f_g); \\ p &= f_s^2 + f_g^2 + 4D_s D_g f_s f_g (1 - \sigma^2); \\ q &= 2(D_s f_s f_g^2 + D_g f_g f_s^2); \\ t &= f_s f_g^2. \end{aligned}$$

В новом представлении калибровочной информации коэффициент нормализации  $A_0$  рассчитывается как обратная величина максимального значения АЧХ. Далее из всех рассчитанных параметров можно легко рассчитать не только амплитудную, но и фазовую характеристику канала. Критерием корректности всех выполненных преобразований является совпадение рассчитанной из полюсов и нулей АЧХ с опубликованной кривой.

Для удобства выполнения трансформации АЧХ и контроля совпадения с первичными калибровочными кривыми разработано программное обеспечение PZCALC (автор Д. Бурк) и DFilter (автор Р.А. Дягилев) [Дягилев, 2021], позволяющее сохранять результаты в файлах в форматах dataless SEED и SACRZ, которые потом прикладываются к оцифрованным записям.

Принимая во внимание тот факт, что АЧХ каналов сейсмографов не всегда имеют столбчатую форму и порой отличия в увеличении для разных каналов достигают 1–2 порядков, компенсация влияния прибора является весьма важным этапом обработки исторических записей. Пример на рис. 7 демонстрирует две записи одного и того же МЯВ «Факел», записанного на сейсмостанции «Обнинск». Одна из записей является цифровой копией исходного сигнала на бумажной ленте, а вторая получена после компенсации влияния прибора в полосе от 0.1 до 10 Гц. Насколько изменился частотный состав колебаний, можно видеть на спектрах мощности в левой части рисунка. Во временной области наиболее ярко эффект компенсации проявляется в интервале прохождения поверхностных волн, которые стали интенсивнее в несколько раз.

### Заключение

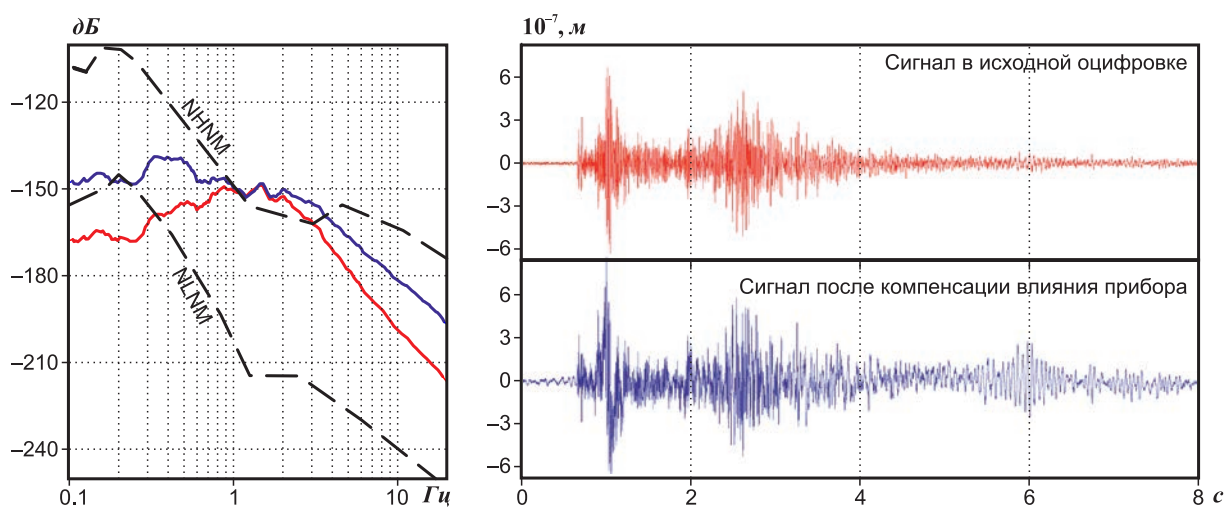
В ходе реализации проекта в 2020–2021 гг. удалось восстановить более 1.5 тыс. записей МЯВ. Обеспечены условия для длительного хранения бумажных сейсмограмм в Якутском архиве. Создана и отлажена технология оцифровки отдельных сейсмических событий, могущих представлять интерес для переобработки. Безусловно, существует понимание, что в рамках одного небольшого проекта не удастся привести в порядок и оборудовать все хранилища. Данная работа весьма затратна и требует много времени. До сих пор в очень плачевном состоянии находятся записи Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН. В Обнинском хранилище, кроме бумажных лент,

имеется сопоставимый по объёму данных архив на микрофильмах и микрофишах, оцифровка которых пока не представляется возможной из-за отсутствия адекватных технологий и специальных технических средств. Всё это, очевидно, станет предметом работ далёкого будущего.

На сегодняшний день ближайшей задачей для архивов видится плановый перевод оригинальных бумажных лент аналоговых сейсмограмм в сканированный вид. Также перспективными видятся работа по дальнейшей оцифровке записей МЯВ и практическое использование их в других проектах. Уже сейчас полученные результаты находят применение в задачах дискриминации типов очагов, восстановлении тензора сейсмического момента, инженерных изысканиях и других приложениях. Для успешного продвижения результатов проекта весьма важным видится создание web-сервиса, обеспечивающего удобный доступ к данным. Такая работа уже ведётся, и по окончании проекта данные станут доступны для широкого круга исследователей.

Авторы выражают благодарность Слесаревой С.Ю., Астафьевой Л.В., Тереховой Е.Б., Бабкиной В.Ф., Згуре Л.Б., Ковалёвой С.А., Хритовой М.А., Габдрахмановой Ю.В., Андреевой С.А., Силкину К.Ю., Колганко А.А., Шестере Е.А., Сизаску И.А., Дибирову Г.-М., Гавриленко А.С. и Ежовой И.Т. за их значительный вклад в реализацию проекта.

**Работа выполнена при поддержке совместного проекта ФИЦ ЕГС РАН и Университета штата Мичиган (контракт № RC109977).**



**Рис. 7.** Результат оцифровки сигнала от МЯВ «Факел», записанного станцией «Обнинск» до и после удаления влияния инструмента.

Повышение уровня низко- и высокочастотных колебаний особенно заметно на спектрах мощности (слева) для скорректированного сигнала (синяя линия)

### Литература

*Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР.* – М.: Наука, 1974. – 244 с.

Дягилев Р.А. Программа подбора параметров БИХ-фильтров для описания частотных характеристик сейсмических приборов, DFilter / Свидетельство о государственной регистрации № 2021663921 от 25.08.2021.

*Мирные ядерные взрывы СССР.* Использование ядерно-взрывных технологий в интересах народного хозяйства: Приложение 1 // Ядерные испытания СССР / Под ред. академика РАН В.Н. Михайлова. – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2000. – Т. 4: Использование ядерных взрывов для решения народнохозяйственных задач и научных исследований. – С. 119–125.

*Параметры, частотно-амплитудные и фазовые характеристики приборов опорных сейсмических станций СССР.* 1965. Приложение к сейсмологическому бюллетеню сети сейсмических станций СССР. – М.: ИФЗ АН СССР, 1966. – 64 с.

*Параметры, частотно-амплитудные и фазовые характеристики приборов опорных сейсмических станций СССР в 1988 году.* Приложение к сейсмологическому бюллетеню сети сейсмических станций СССР. – М.: ИФЗ АН СССР, 1989. – 178 с.

*Параметры, частотно-амплитудные и фазовые характеристики приборов опорных сейсмических станций Сибири.* 1988 год. – Иркутск: ИЗК СО АН СССР, 1989. – 96 с.

Храмцов Е.В., Репин В.С., Библин А.М., Варфоломеева К.В., Иванов С.А. Радиационно-гигиеническая характеристика охранных зон мирных ядерных взрывов в Архангельской области // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 111–123. doi: 10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123

Bogiatzis P., Ishii M. DigitSeis: A new digitization software for analog seismograms // Seismological Research Letters. – 2016. – V. 87, N 3. – P. 726–736. doi: 10.1785/0220150246

Bromirski P.D., Chuang S. SeisDig: Software to digitize scanned analog seismogram images, User's Manual. – UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography, 2003. [Site]. – URL: <https://escholarship.org/uc/item/76b2m74m>

Hagiwara T. A note on the theory of the electromagnetic seismograph // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1958. – V. 36. – P. 139–164.

Nguyen B.V. The instrument responses of the SKM-3 system and the designated seismic station vault seismic system // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1995. – V. 85, N 6. – P. 1835–1846.

Peterson J. Worldwide standardized seismograph network: A data users guide // U.S. Geological Survey Open-File Report 2014–1218. – 2014. – 74 p. [Site]. – doi: 10.3133/ofr20141218

Pintore S., Quintiliani M., Franceschi D. Teseo: A vectoriser of historical seismograms // Computers & Geosciences. – 2005. – V. 31. – P. 1277–1285. doi: 10.1016/j.cageo.2005.04.001

Sultanov D.D., Murphy J.R., Rubinstein Kh.D. A seismic source summary for soviet peaceful nuclear explosions // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1999. – V. 89, N 3. – P. 640–647.

Trifunac M.D., Lee V., Todorovska M. Common problems in automatic digitization of strong motion accelerograms // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 1999. – V. 18. – P. 519–530.

Xu Y., Xu T. An interactive program on digitizing historical seismograms / Computers & Geosciences. – 2014. – V. 63. – P. 88–95.

### Сведения об авторах

**Дягилев Руслан Андреевич**, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: dra@gsras.ru

**Бутырин Павел Генрихович**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: pbutyrin@gsras.ru

**Мяки Кевин**, PhD, доцент Университета штата Мичиган, г. Ист-Лансинг, США. E-mail: mackeyke@msu.edu

**Бурк Даниэль**, инженер по приборам Университета штата Мичиган, г. Ист-Лансинг, США. E-mail: burkdani@msu.edu

**Бурхард Кейтлинн**, аспирант Университета штата Мичиган, г. Ист-Лансинг, США. E-mail: burkha81@msu.edu

**Уилер Брендис**, исследователь Университета штата Мичиган, г. Ист-Лансинг, США. E-mail: wheel272@msu.edu

**Уитт Крис**, исследователь Университета штата Мичиган, г. Ист-Лансинг, США. E-mail: wittechr@msu.edu

**Добрынина Анна Александровна**, канд. физ.-мат. наук, ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук (ИЗК СО РАН), г. Иркутск, Россия. E-mail: dobrynina@crust.irk.ru



## Digitization of soviet peaceful nuclear explosion seismograms

© 2022 R.A. Dyagilev<sup>1</sup>, P.G. Butyrin<sup>1</sup>, K. Mackey<sup>2</sup>, D. Burk<sup>2</sup>, K. Burkhard<sup>2</sup>, B. Wheeler<sup>2</sup>, C. Witte<sup>2</sup>, A.A. Dobrynina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>GS RAS, Obninsk, Russia; <sup>2</sup>MSU, East Lansing, USA; <sup>3</sup>IES SB RAS, Irkutsk, Russia

Received January 26, 2022

**Abstract** The Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences and Michigan State University are working to recover, preserve, scan, and digitize the historic seismograms of Soviet Peaceful Nuclear Explosions (PNEs). The Soviet Union detonated 122 PNEs from the mid-1960s through the late 1980s. The PNEs were conducted in a wide range of geologic settings and geographic locations, thus representing a unique data set for geophysical studies. These explosions were well recorded by the regional seismic networks, where thousands of seismograms are still retained. We are working to index these irreplaceable legacy analog seismograms and preserve them against loss for future generations. In the process, we are also generating high resolution scans of the seismograms and digitizing them for analysis. Most seismograms are from short period instruments, and when combined with the correct station calibration information, the digitization process accurately recovers ground motion signals to at least 5 Hz.

**Keywords** Peaceful nuclear explosion, analog seismogram, scanning, digitization, calibration, instrument correction, quality control.

**For citation** Dyagilev, R.A., Butyrin, P.G., Mackey, K., Burk, D., Burkhard, K., Wheeler, B., Witte, C., & Dobrynina, A.A. (2022). [Digitization of soviet peaceful nuclear explosion seismograms]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(1), 28-40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.1.02>

### References

*Apparatura i metodika seismometricheskikh nabliudeni v SSSR* [Equipment and technique of seismometric observations in USSR]. (1974). Moscow, Russia: Nauka Publ., 244 p. (In Russ.).

Dyagilev, R.A. (2021). [Program to calculate FIR-filter parameters for describing seismic equipment responses, DFilter]. Certificate of state registration of database No. 22021663921. (In Russ.).

Mikhailov, V.N. (ed.). (2000). [Peaceful nuclear explosions in USSR. Usage nuclear explosion technologies for national economy: Appendix 1]. In *Iadernye ispytaniia SSSR. T. 4: Ispol'zovanie iadernykh vzryvov dlia resheniia narodnokhoziaistvennykh zadach i nauchnykh issledovaniia* [Nuclear tests in USSR. V. 4: Usage nuclear technologies for solving tasks in national economy and scientific investigations] (pp. 119-125). Sarov, Russia: RFYATS-VNIIEF Publ. (In Russ.).

*Parametry, chastotno-amplitudnye i fazovye kharakteristiki priborov opornykh seismicheskikh stantsii SSSR. 1965. Prilozhenie k seismologicheskomu biulleteniu seti seismicheskikh stantsii SSSR* [Response parameters of backbone seismic stations in USSR. 1965. Appendix to seismic bulletin of USSR seismic stations]. (1966).

Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ., 64 p. (In Russ.).  
*Parametry, chastotno-amplitudnye i fazovye kharakteristiki priborov opornykh seismicheskikh stantsii SSSR v 1988 godu. Prilozhenie k seismologicheskomu biulleteniu seti seismicheskikh stantsii SSSR* [Response parameters of backbone seismic stations in USSR in 1988. Appendix to seismic bulletin of USSR seismic stations]. (1989). Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ., 178 p. (In Russ.).

*Parametry, chastotno-amplitudnye i fazovye kharakteristiki priborov opornykh seismicheskikh stantsii Sibiri. 1988 god* [Response parameters of backbone seismic stations in Siberia. 1988]. (1989). Irkutsk, Russia: IEC SB AS USSR Publ., 96 p. (In Russ.).

Khramtsov, E.V., Repin, V.S., Biblin, A.M., Vafolomeeva, K.V., & Ivanov, S.A. (2021). [Radiation-Hygienic characteristic of the protective zones of peaceful nuclear explosions in the Arkhangelsk region]. In *Radiatsionnaya Gygiena* [Radiation Hygiene], 14(1), 111-123. (In Russ.). <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-111-123>

Bogiatzis, P., & Ishii, M. (2016). DigitSeis: A new digitization software for analog seismograms. *Seismological Research Letters*, 87(3), 726-736. <https://doi.org/10.1785/0220150246>

- Bromirski, P.D., & Chuang, S. (2003). SeisDig: Software to digitize scanned analog seismogram images, User's manual. UC San Diego: Scripps Institution of Oceanography [Site]. Retrieved from: <https://escholarship.org/uc/item/76b2m74m>
- Hagiwara, T. (1958). A note on the theory of the electromagnetic seismograph. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 36, 139-164.
- Nguyen, B.V. (1995). The instrument responses of the SKM-3 system and the designated seismic station vault seismic system. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(6), 1835-1846.
- Peterson, J., & Hutt, C. (2014). Worldwide standardized seismograph network: A data users guide. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1218*, 74 p. [Site]. <http://doi.org/10.3133/ofr20141218>
- Pintore, S., Quintiliani, M., & Franceschi, D. (2005). Teseo: A vectoriser of historical seismograms. *Computers & Geosciences*, 31, 1277-1285. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.04.001>
- Sultanov, D.D., Murphy, J.R., & Rubinstein, Kh.D. (1999). A seismic source summary for soviet peaceful nuclear explosions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(3), 640-647.
- Trifunac, M.D., Lee, V., & Todorovska, M. (1999). Common problems in automatic digitization of strong motion accelerograms. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18, 519-530.
- Xu, Y., & Xu, T. (2014). An interactive program on digitizing historical seismograms. *Computers & Geosciences*, 63, 88-95.

### Information about authors

**Dyagilev Ruslan Andreevich**, PhD, Leading Researcher of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: [dra@gsras.ru](mailto:dra@gsras.ru)

**Butyrin Pavel Genrikhovich**, PhD, Leading Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia. E-mail: [pbutyrin@gsras.ru](mailto:pbutyrin@gsras.ru)

**Mackey Kevin**, PhD, Associate Professor at the Michigan State University (MSU), East Lansing, USA. E-mail: [mackeyke@msu.us](mailto:mackeyke@msu.us)

**Burk Daniel**, Instrumentation Engineer at the MSU, East Lansing, USA. E-mail: [burkdani@msu.edu](mailto:burkdani@msu.edu)

**Burkhard Kaitlynn**, Graduate Student at the MSU, East Lansing, USA. E-mail: [burkha81@msu.edu](mailto:burkha81@msu.edu)

**Wheeler Brandi**, Researcher at the MSU, East Lansing, USA. E-mail: [wheel272@msu.edu](mailto:wheel272@msu.edu)

**Witte Chris**, Researcher at the MSU, East Lansing, USA. E-mail: [wittechr@msu.edu](mailto:wittechr@msu.edu)

**Dobrynina Anna Aleksandrovna**, PhD, scientific secretary of the Institute of the Earth's crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IES SB RAS), Irkutsk, Russia. E-mail: [dobrynina@crust.irk.ru](mailto:dobrynina@crust.irk.ru)