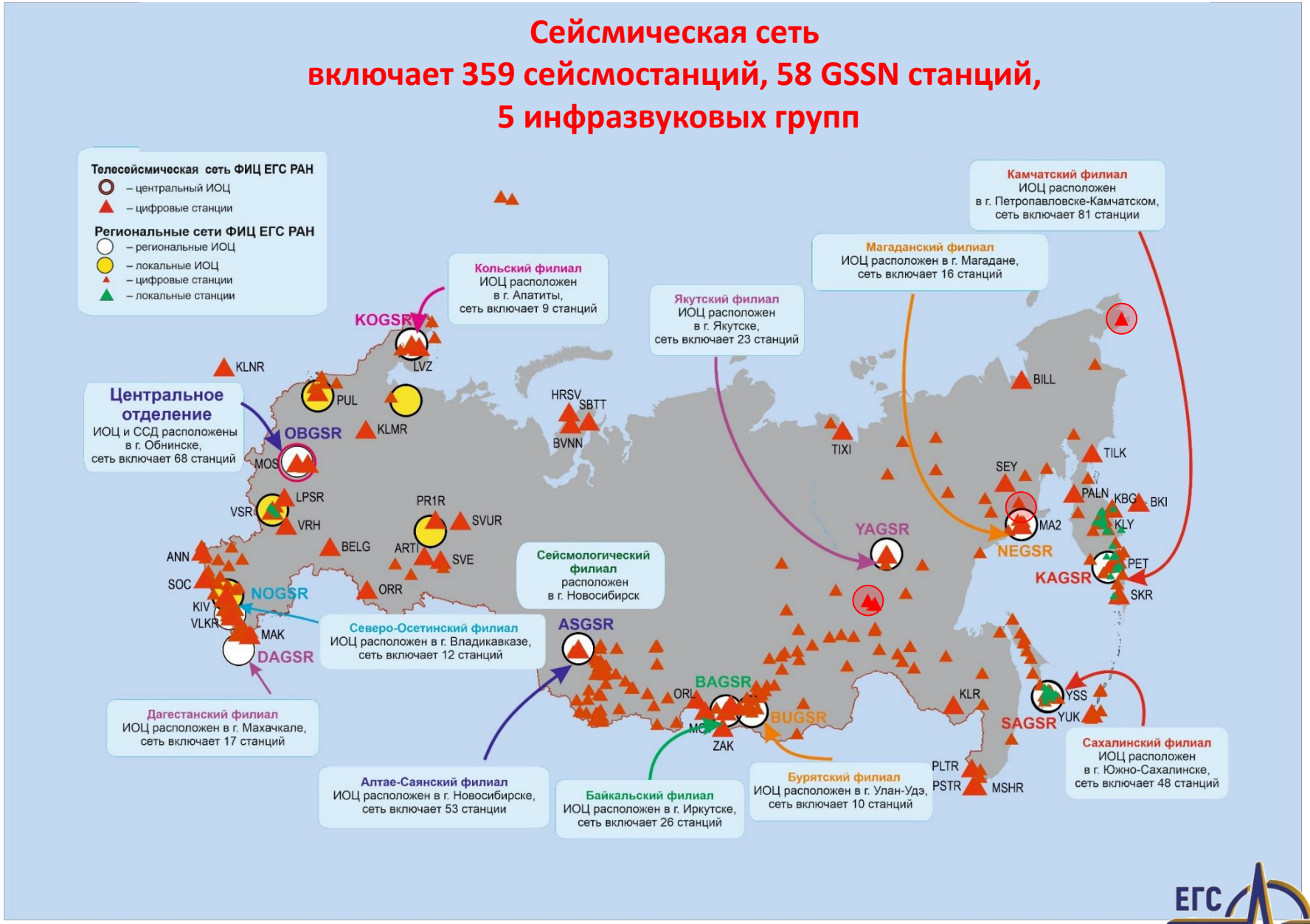
Мониторинг природных опасностей

ЕГС РАН

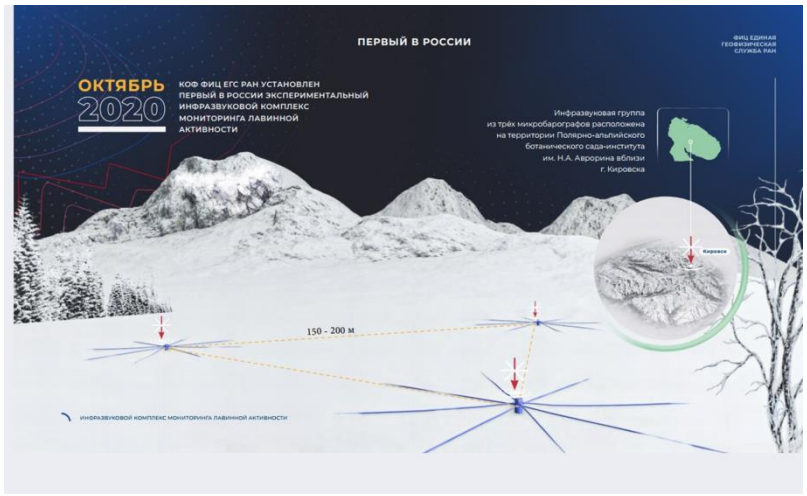
Сеть сейсмических станций ФИЦ ЕГС РАН

Сейсмическая сеть
включает 359 сейсмостанций, 58 GSSN станций,
5 инфразвуковых групп



Создание различных систем сейсмического и инфразвукового мониторинга

ПАО «Уралкалий»

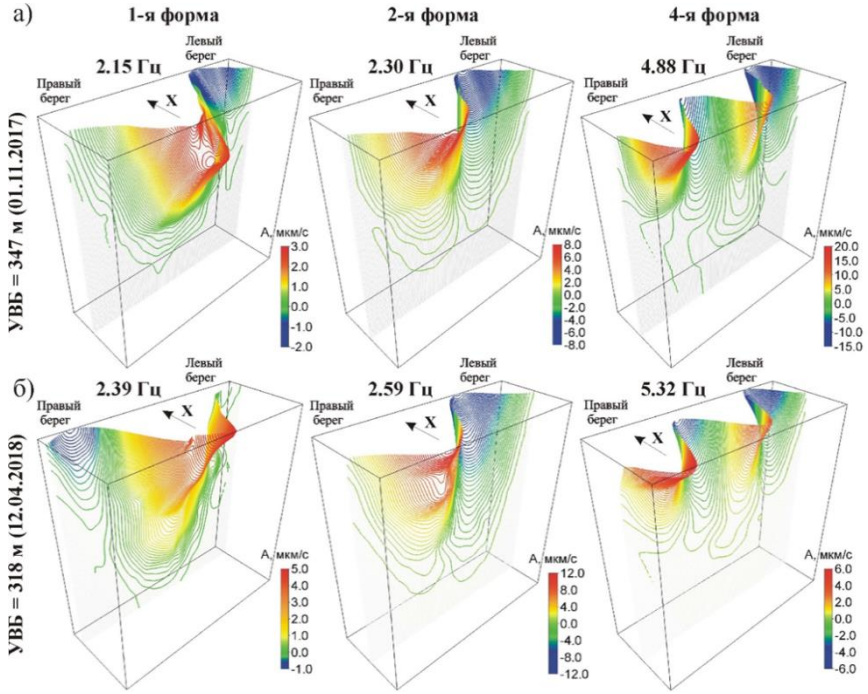


Комплексы мониторинга техногенной сейсмичности на горнодобывающих предприятиях

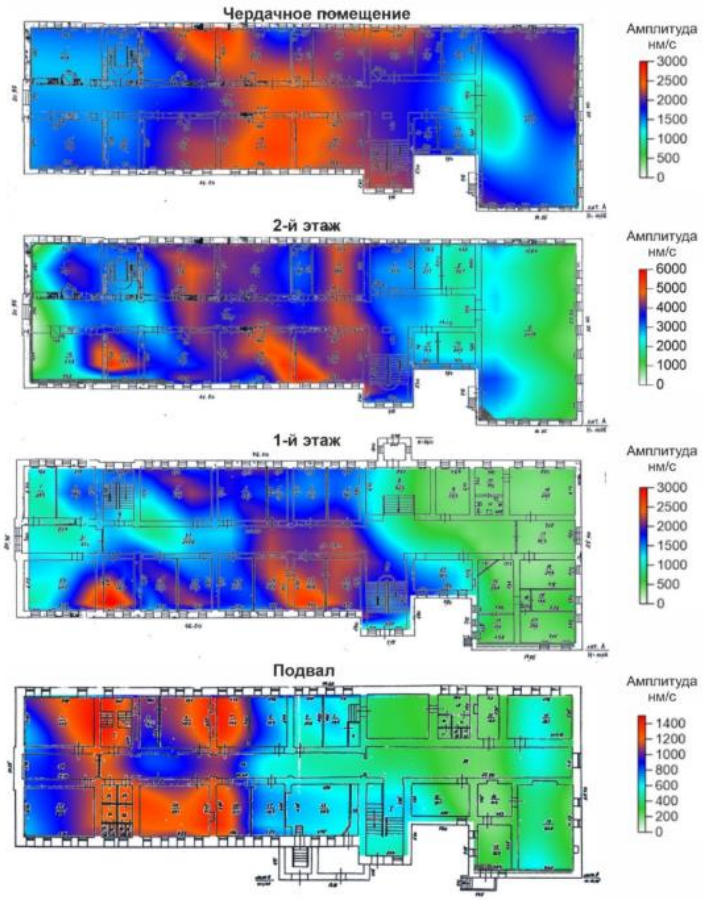
Комплексы мониторинга лавинной, айсберговой опасности

ЕГС РАН

Мониторинг состояния зданий и сооружений



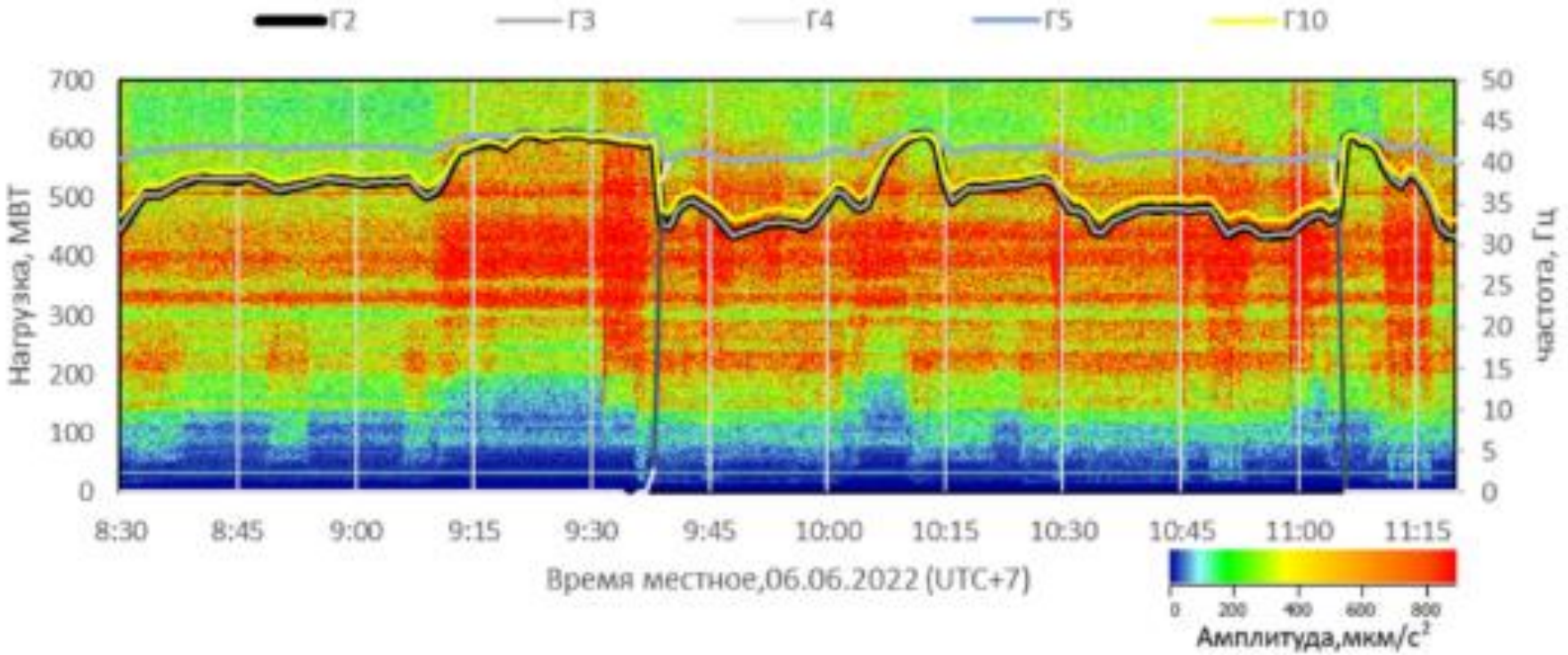
собственные колебания плотины, показывающие особенности сезонных изменений при различных напряженно-деформированных состояниях сооружения. Полученные данные используются в дальнейшем, как исходные данные для мониторинга технического состояния плотины.



Распределение собственных поперечных частот по этажам здания, позволяющее сделать выводы об ослабленных зонах

ЕГС РАН

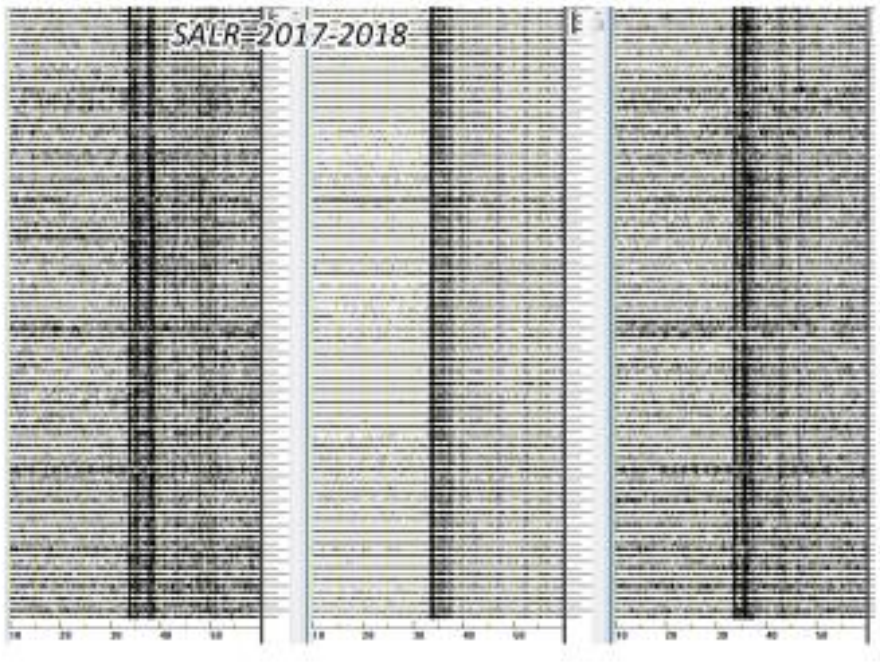
Мониторинг состояния ответственного технологического оборудования



По изменениям несущих частот в спектре в течении длительного периода времени можно делать выводы об изменении технического состояния объекта мониторинга

Активный вибросейсмический мониторинг с мощными вибраторами

Ряд вибрационного мониторинга на линии Быстровка- с/с Салаир



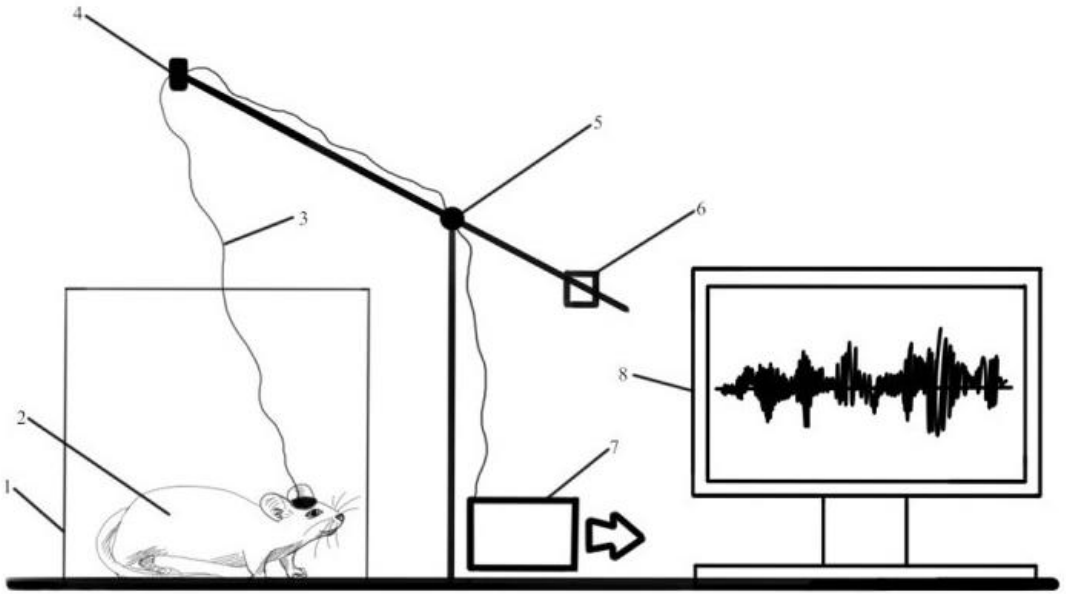
Сейсмический вибратор – уникальный инструмент, генерирующий как сейсмические, так и инфразвуковые волны в широком диапазоне частот, позволяет проводить детальное сейсмоакустическое профилирования на расстояниях до 1000 км от источника

ЕГС РАН

Биосейсмопрогнозирование землетрясений

Два пункта наблюдений:

- ✓ Петропавловск-Камчатский
- ✓ КГО «Карымшина»



Биогибридный аппаратно-программный комплекс

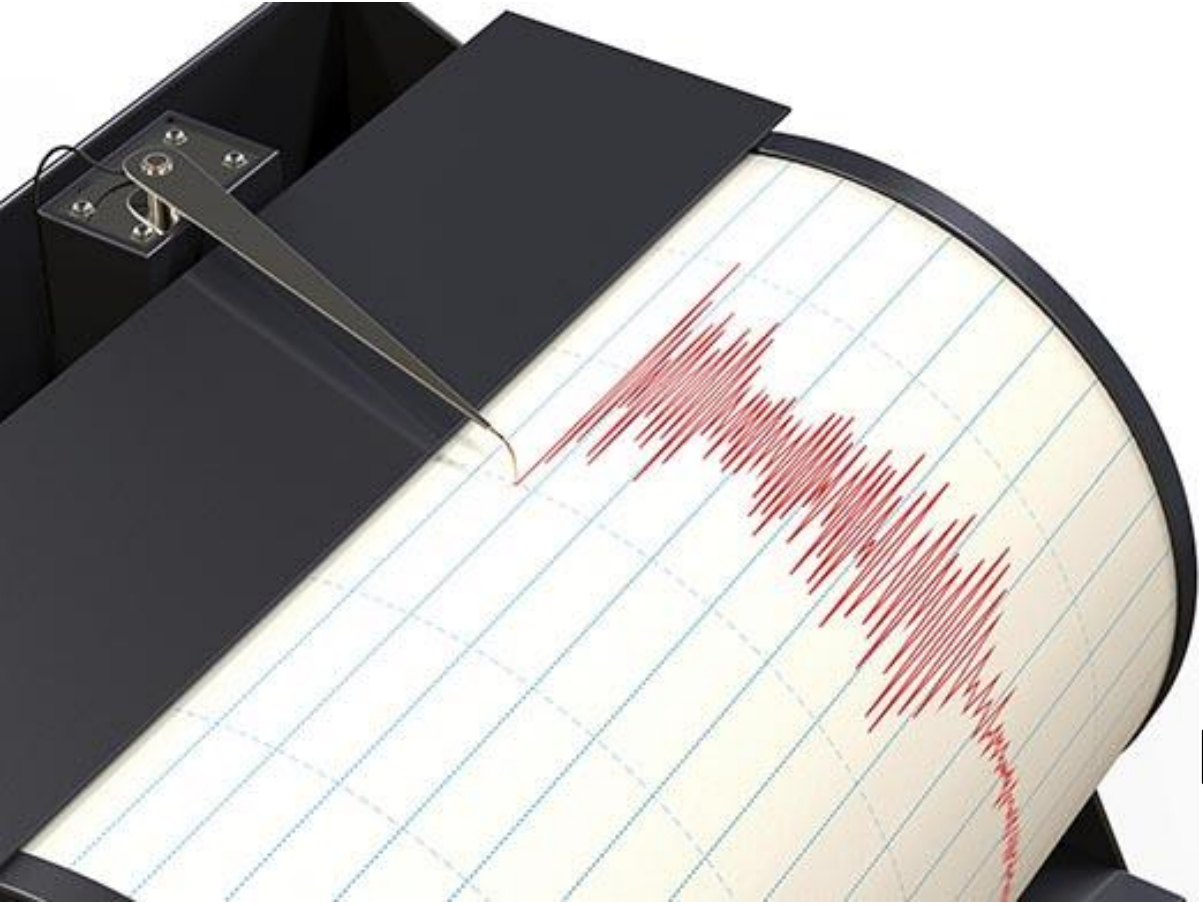
1 – пластиковый бокс; 2 – крыса с имплантированными полиграфическими электродами; 3 – регистрирующий кабель; 4 – электрический круговой контакт; 5 – подвижное соединение вертикальной планки; 6 – регулируемый груз на горизонтальной планке; 7 - усилитель биологических сигналов и аналогово-цифровой преобразователь; 8 – компьютер

Обнаружены предвестники землетрясений в поведении лабораторных животных. Подтвердилась гипотеза о стресс-реакции в ответ на процессы подготовки землетрясения

Выявлено изменение профиля сна за **1-3 суток** до землетрясения 4 апреля 2023 г. (M=6.3)

Выявлено резкое увеличение индекса напряженности за **5 часов** до землетрясения

ЕГС РАН



Технология оцифровки аналоговых сейсмограмм и метаданных

Дягилев Р.А., ФИЦ ЕГС РАН

Пермь, 2025

Проблема сохранения и обеспечения доступности архивных данных

- Актуальность:
  - Аналоговая регистрация в Росси ведется с 1901 г.
  - объем аналоговых данных (станция*год) до 2020г. превышал объем цифровых

Проблема сохранения и обеспечения доступности архивных данных

- Актуальность:
  - Хранение аналоговых записей требует соблюдения определенных условий, которые не всегда соблюдаются из-за отсутствия площадей
  - носители аналоговой информации (фотобумага, фотопленка) со временем необратимо ветшают

Проблема сохранения и обеспечения доступности архивных данных

- Актуальность:
  - методики обработки аналоговых записей имеют свои особенности
  - записи доступны только ограниченному кругу лиц

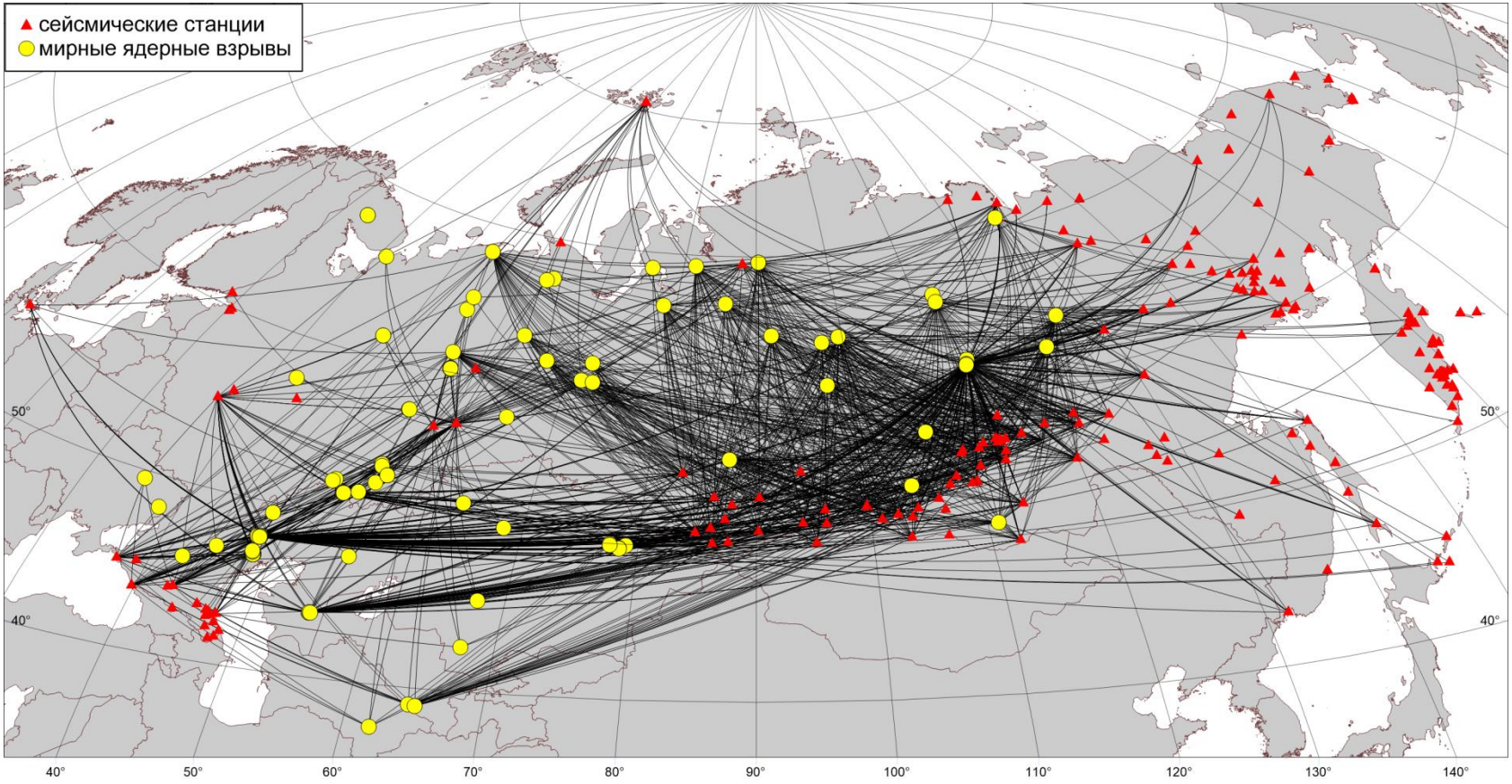
Код сети	Расположение архива	Количество записей МЯВ	% от общего числа
OBGSR	Обнинск	4776	18.9%
KMGSR	Кисловодск	95	0.4%
KOGSR	Апатиты	508	2.0%
YAGSR	Якутск	1339	5.3%
BAGSR	Иркутск	4216	16.7%
ASGSR	Новосибирск	2413	9.5%
DAGSR	Махачкала	459	1.8%
NEGSR	Магадан	1446	5.7%
SAGSR	Южно-Сахалинск	3613	14.3%
KAGSR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

Зачем нужна оцифровка старых данных?

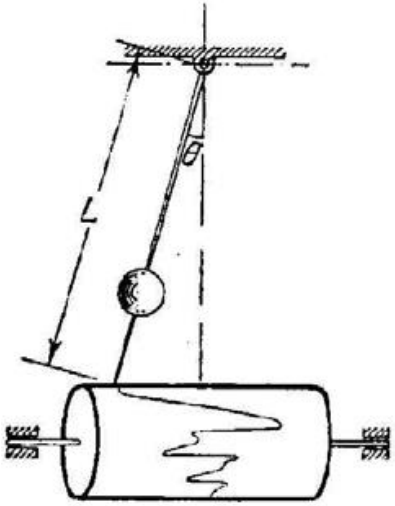
- Угроза скорейшей утери архивных данных из-за деградации ее носителей
- Возможность обработки данных современными методами и получение сведений об очагах, которые ранее не определялись
- Согласование старых магнитудных оценок с новыми

Зачем нужна оцифровка старых данных?

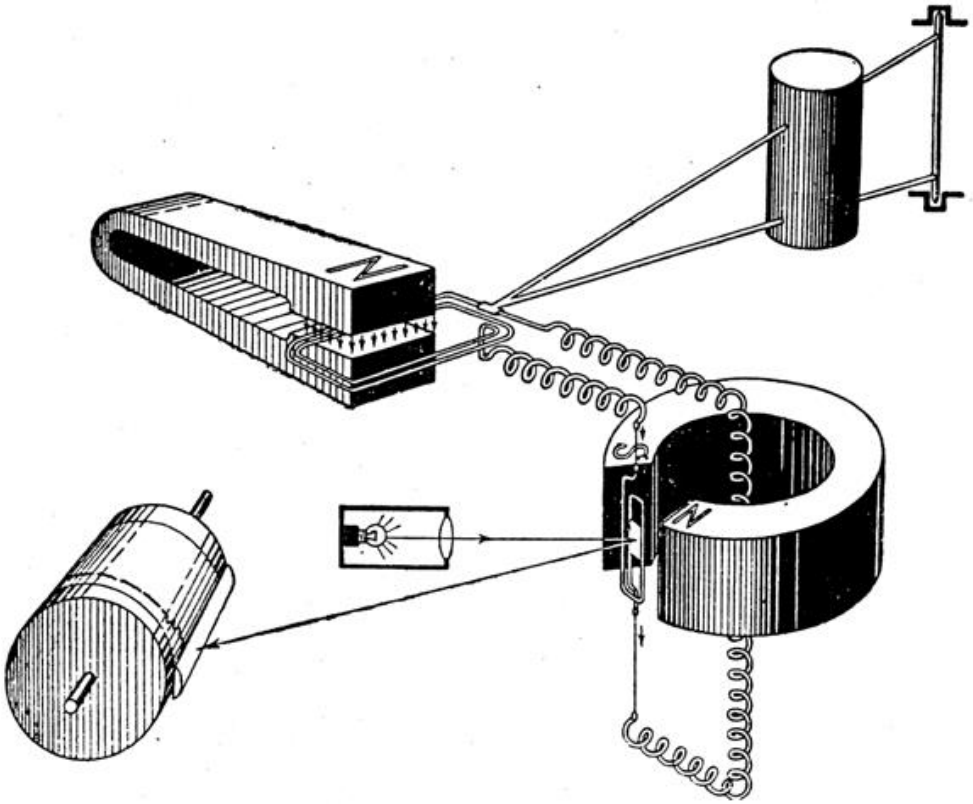
- Уточнение скоростной модели среды по записям сильных сейсмических событий



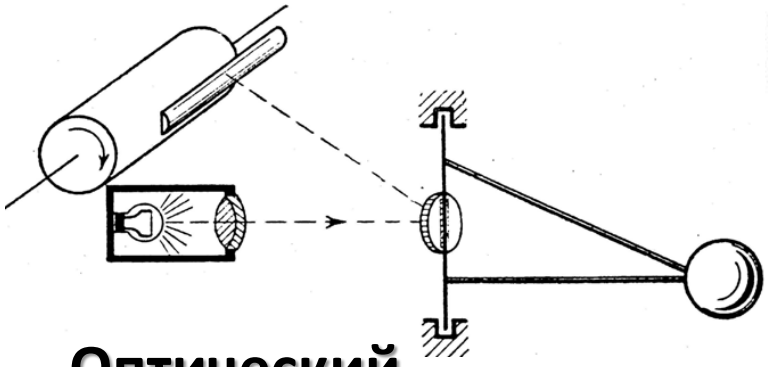
Технология получения аналоговых записей (способы регистрации)



Механический



Электродинамический



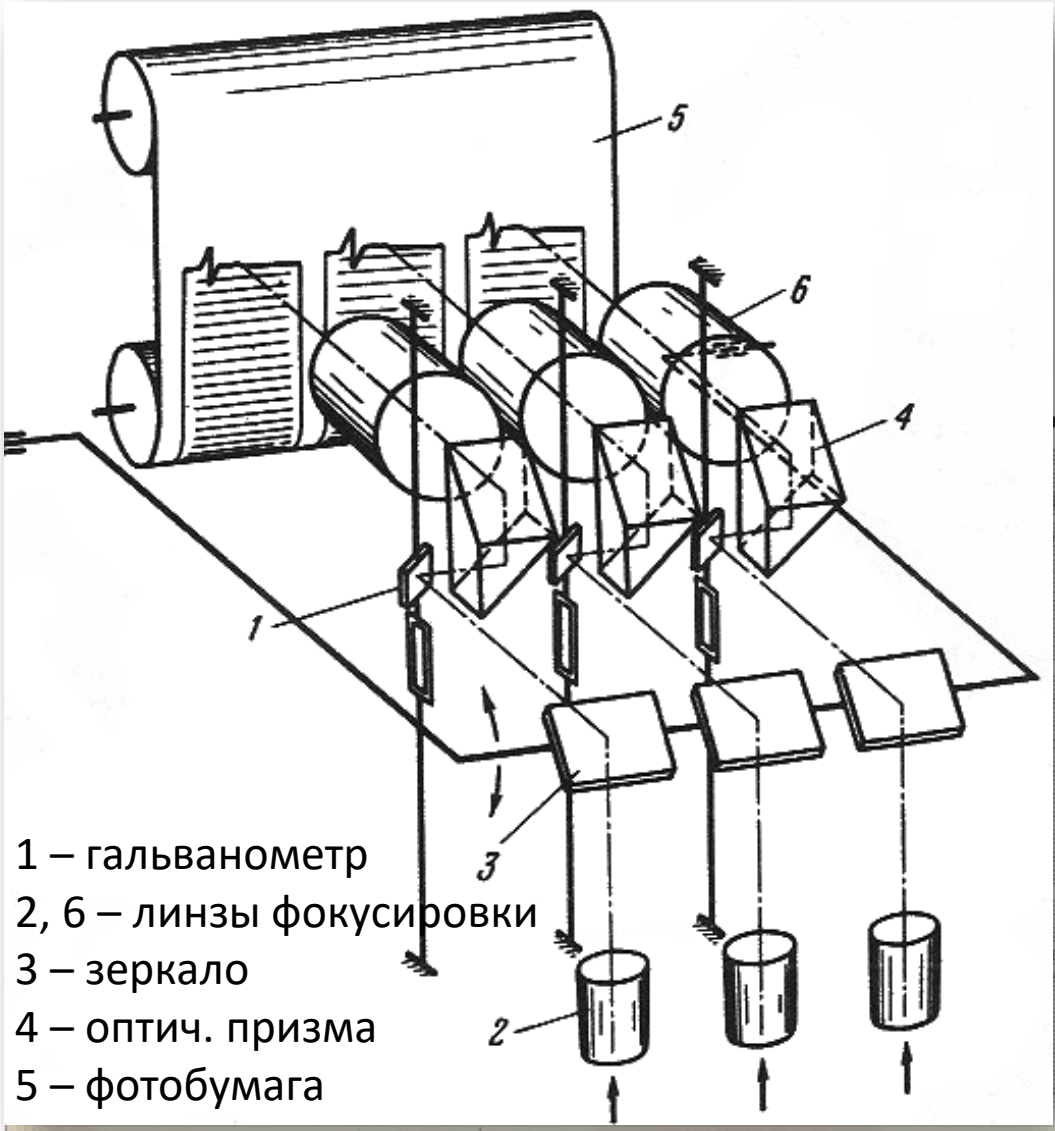
Оптический

Аппаратура и методика …, 1974

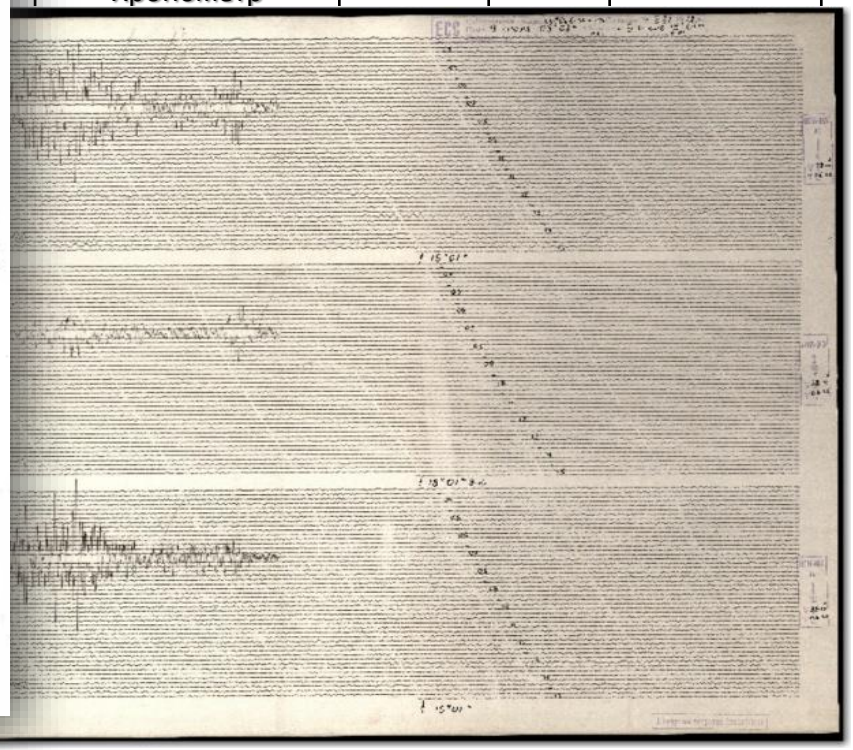
Технология получения аналоговых записей

Приборы, влияющие на параметры и качество записи

Прибор	Способ регистрации		
	Механи-ческий	Опти-ческий	Электро-динамический
Маятник	V	V	V
Гальванометр			V
Осветитель		V	V
Регистрир	V	V	V
Бумага (фотобумага)	V	V	V
Хронометр			V



1 – гальванометр
2, 6 – линзы фокусировки
3 – зеркало
4 – оптич. призма
5 – фотобумага



Искажения аналоговых записей

при регистрации

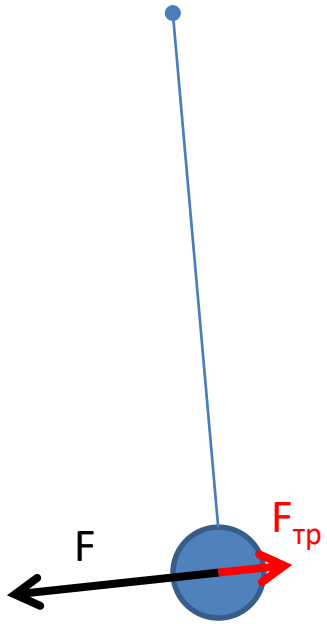
Прибор	Вид регистрации		
	Механический	Оптический	Электродинамический
Маятник	нелинейная ЧХ		
	трение		
	искривленная запись		
Гальванометр	нелинейная ЧХ		
			искривленная запись (пером)
Осветитель		переменная яркость, асимметричный луч	
Регистрир	переменная скорость вращения барабана		
	смещение нуля, прерывание записи на границе ленты		
Бумага (фотобумага)	подверженность деформации со временем		
Хронометр			дрейф времени
			искажение записи метками

при оцифровке

Источник искажения	Искажение
Сканер	неравномерная протяжка длинных лент
	недостаточное разрешение и цветность
Оператор	неточная установка точек
	ошибки и опечатки в метаданных
Способ интерполяции	искажение сигнала между точками

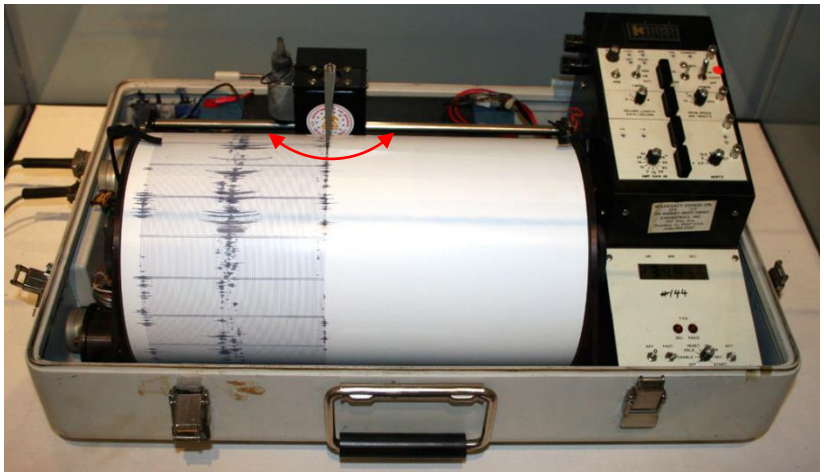
Искажения при регистрации

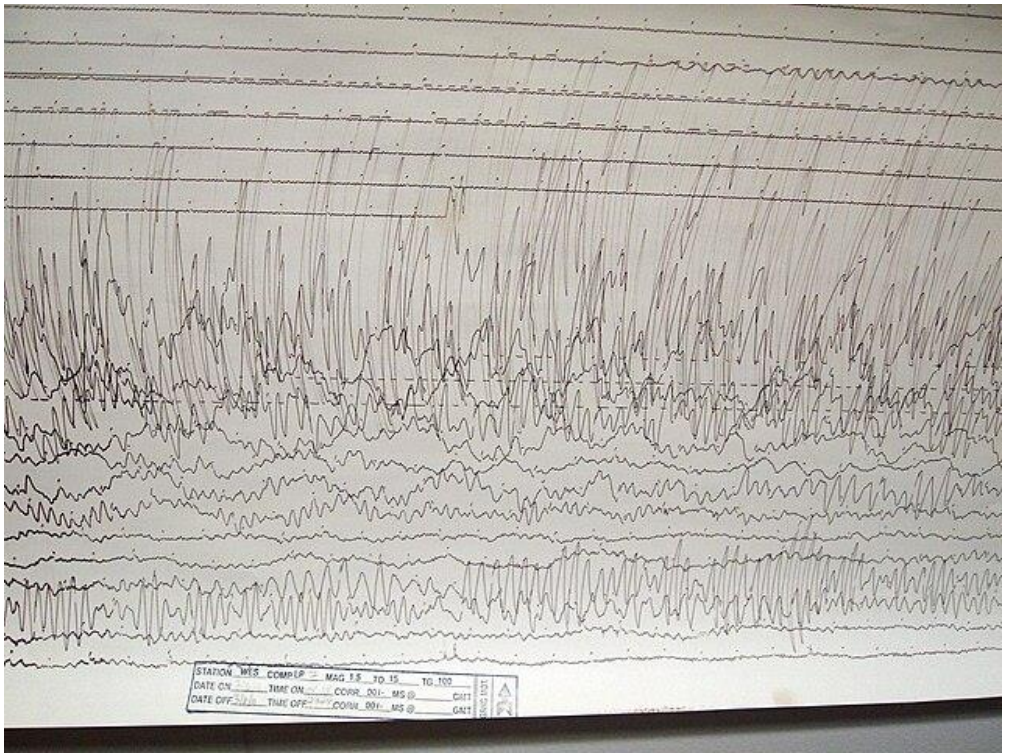
- трение маятника (пера) о бумагу (10^{-7} – 10^{-6} Н)
  - сила трения при больших увеличениях становится значимой величиной
  - положение равновесия прибора (особенно длиннопериодного) становится неопределенным
  - понижается чувствительность маятника
- способ устранения – увеличение массы маятника



Искажения при регистрации

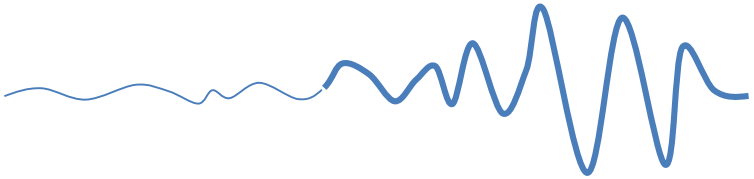
- искривленная запись (только пером)
  – запись ведется по дуге окружности
- способ устранения – выпрямление скана

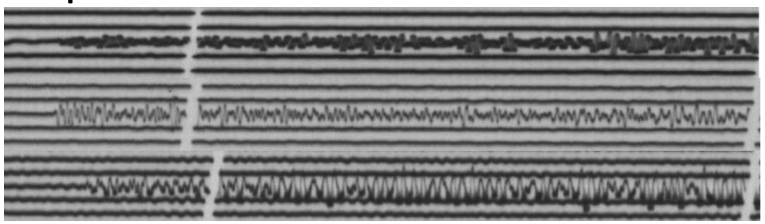




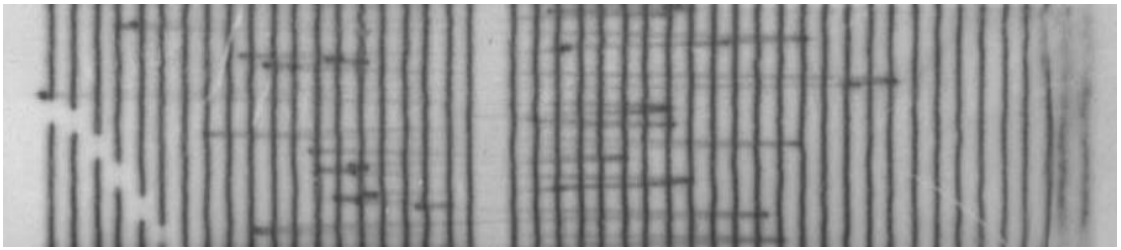
Искажения при регистрации

- переменная яркость луча
  - яркость луча подстраивается под амплитуду колебаний ступенями и может отличаться на разных компонентах





  - след от луча меняет яркость в зависимости от скорости смещения (амплитуды колебаний) в следствие разной выдержки

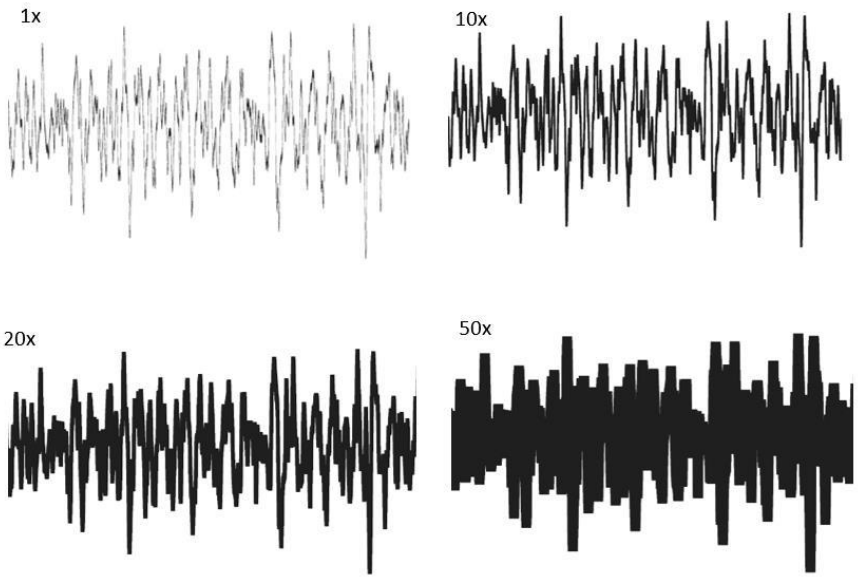


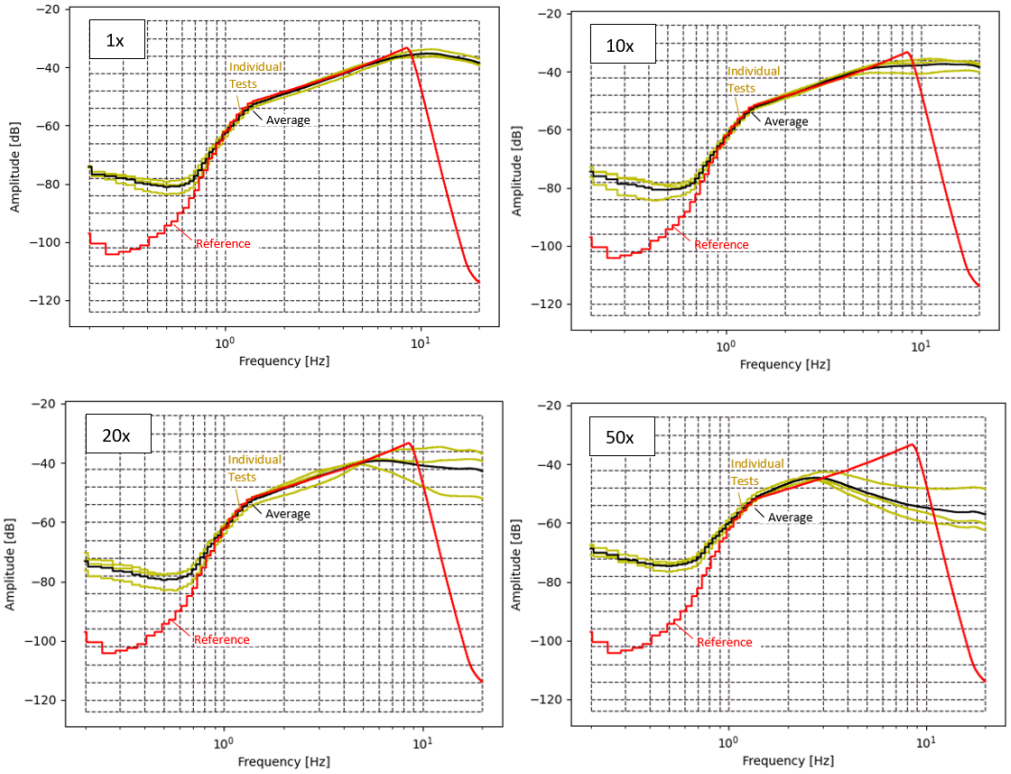
- асимметричный луч
  - лампа может иметь дефектную (кривую) нить

- способ устранения – сканирование с высоким разрешением и в полной палитре цветов

Искажения при регистрации

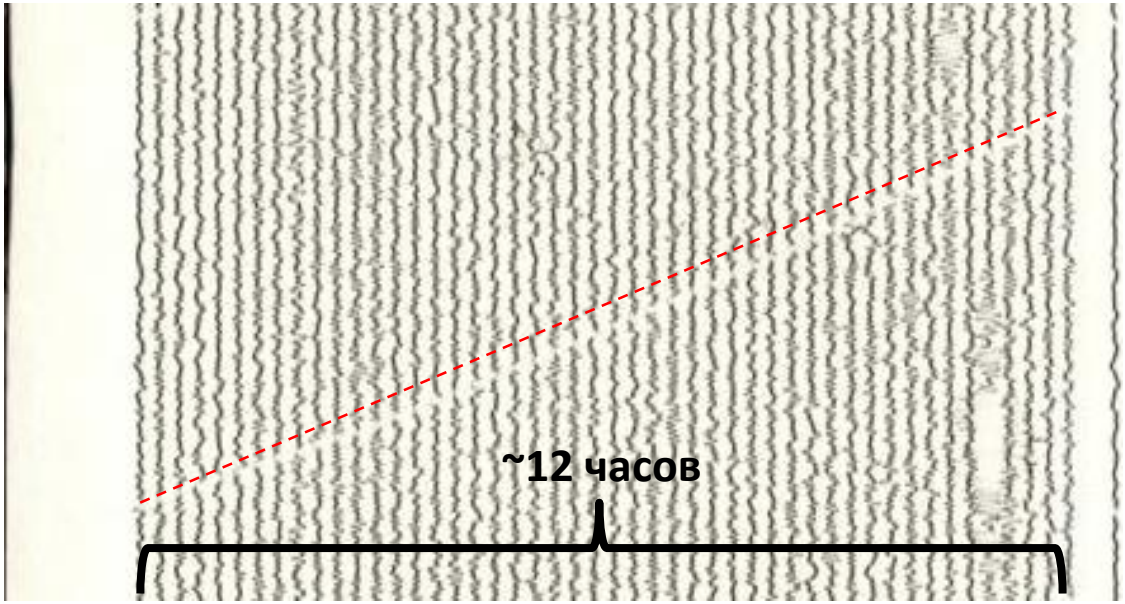
- влияние ширины луча на ширину частотного диапазона сигнала





Искажения при регистрации

- переменная скорость вращения барабана
  - расстояние между временными метками непостоянное



- способ устранения – формирование кусочно-равномерной шкалы времени

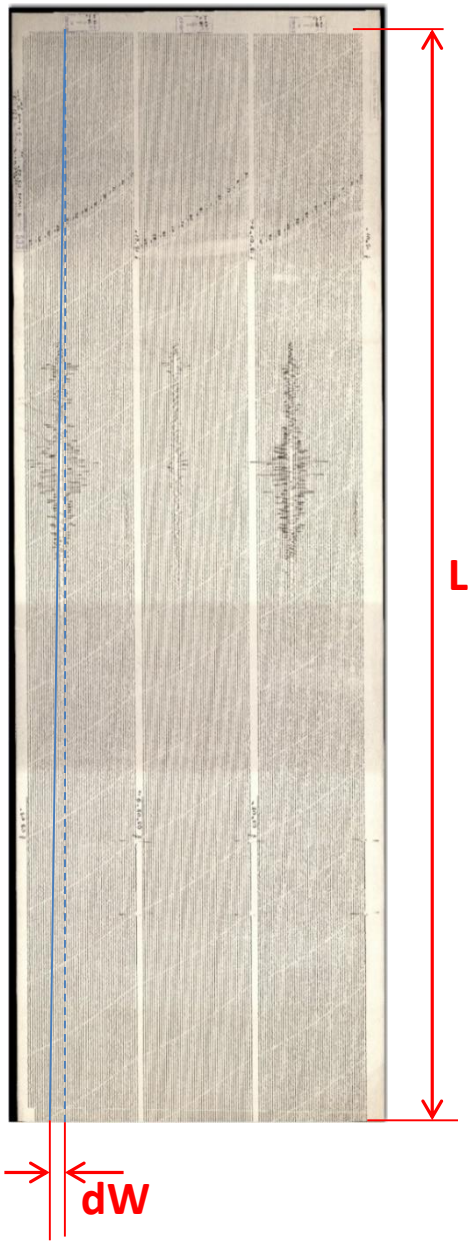
Искажения при регистрации

- смещение нуля

- способ устранения – поворот скана или удаление тренда на оцифрованной записи

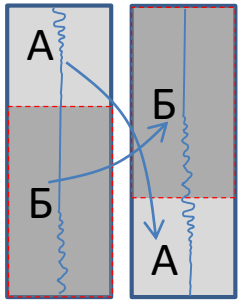
$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{dW}{L}$$

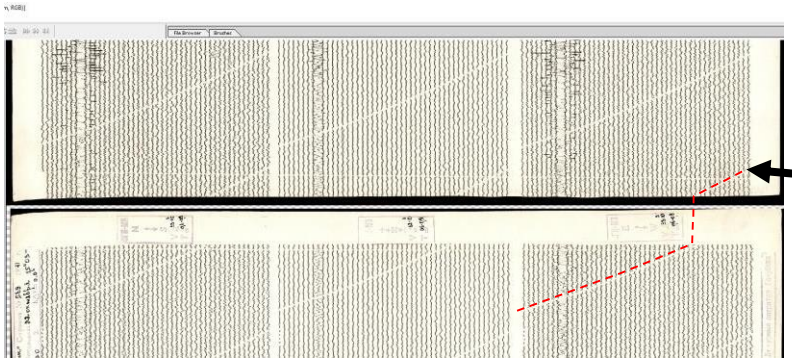
$$A'(t) = A(t) + \operatorname{tg}\varphi\,(t - t_0)$$



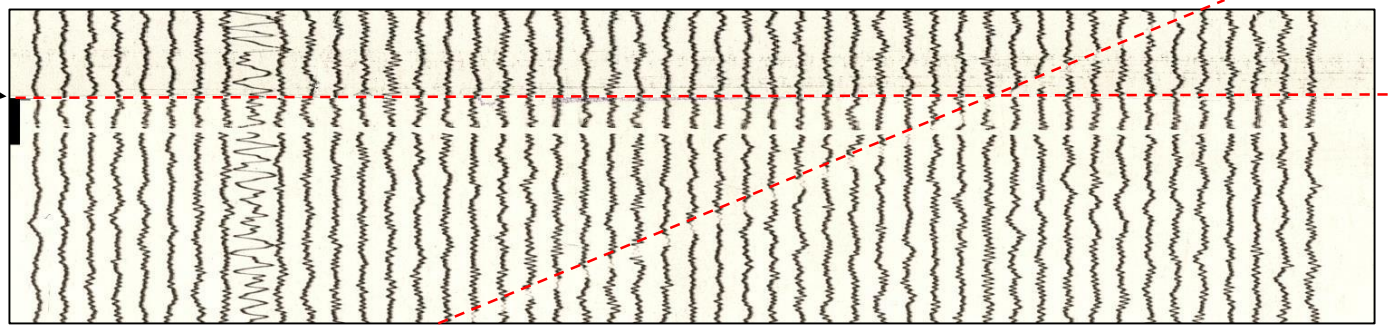
Искажения при регистрации

- прерывание записи на границе ленты





линия временных меток

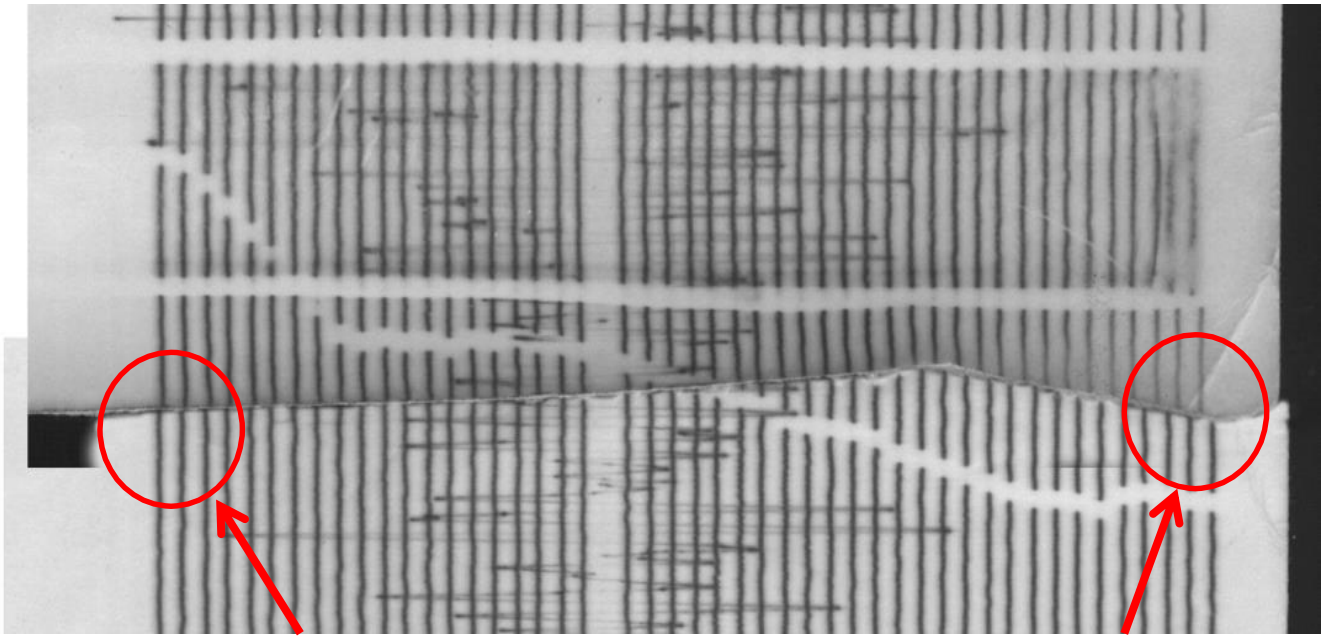


линия стыка

- способ устранения – стыковка двух сканов (копий скана) друг к другу

Искажения при регистрации

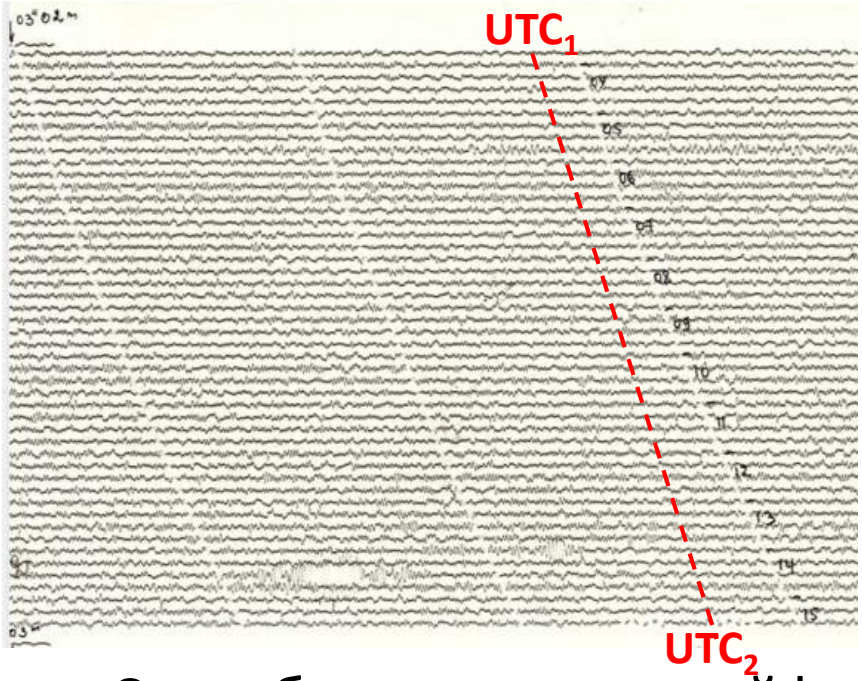
- подверженность бумаги деформации со временем

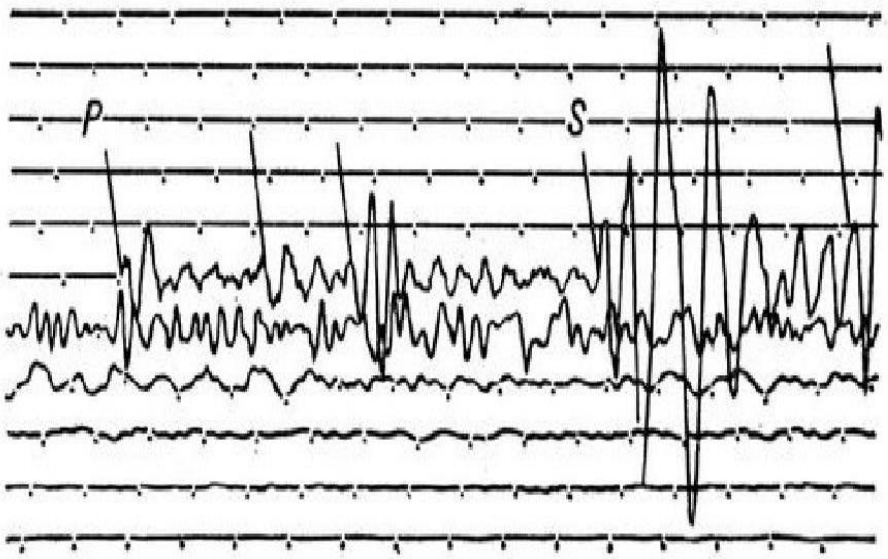


- способ устранения – индивидуальная стыковка сканов для каждой линии сигнала

Искажения при регистрации

- дрейф времени хронометра (сдвиг меток относительно UTC)
- добавление в запись меток времени (гашение/сдвиг луча)

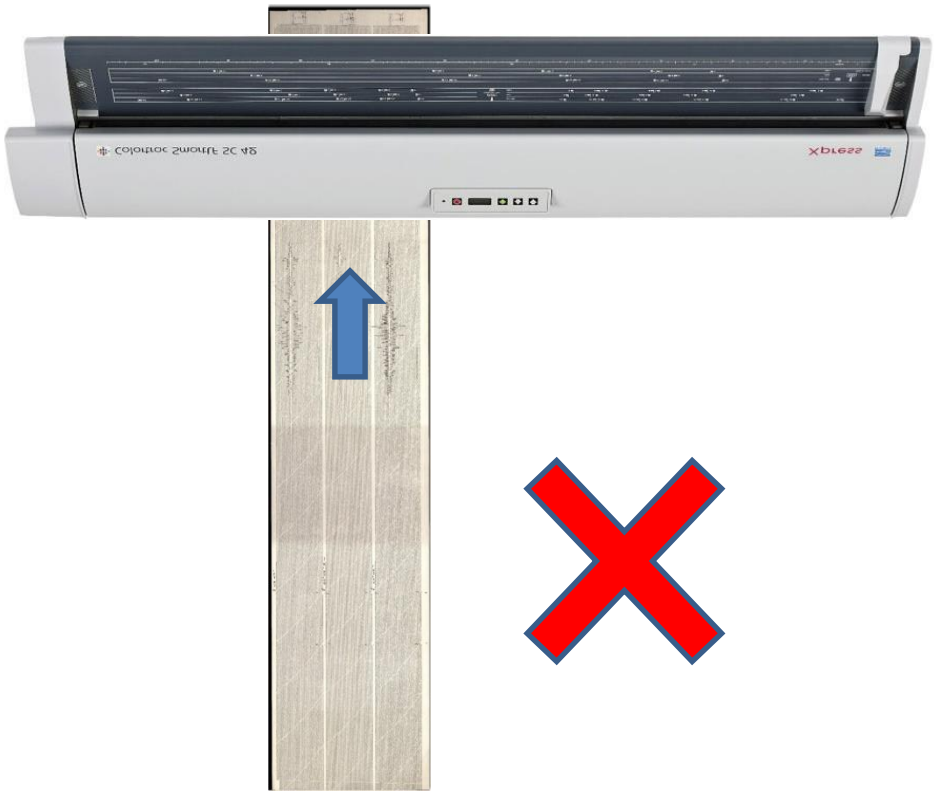




- Способ устранения дрейфа – внесение поправки
- Универсального способа восстановления временных разрывов нет (в некоторых случаях возможна интерполяция). Для сдвиговых меток используют обратное смещение.

Искажения при сканировании

- неравномерная протяжка длинных лент

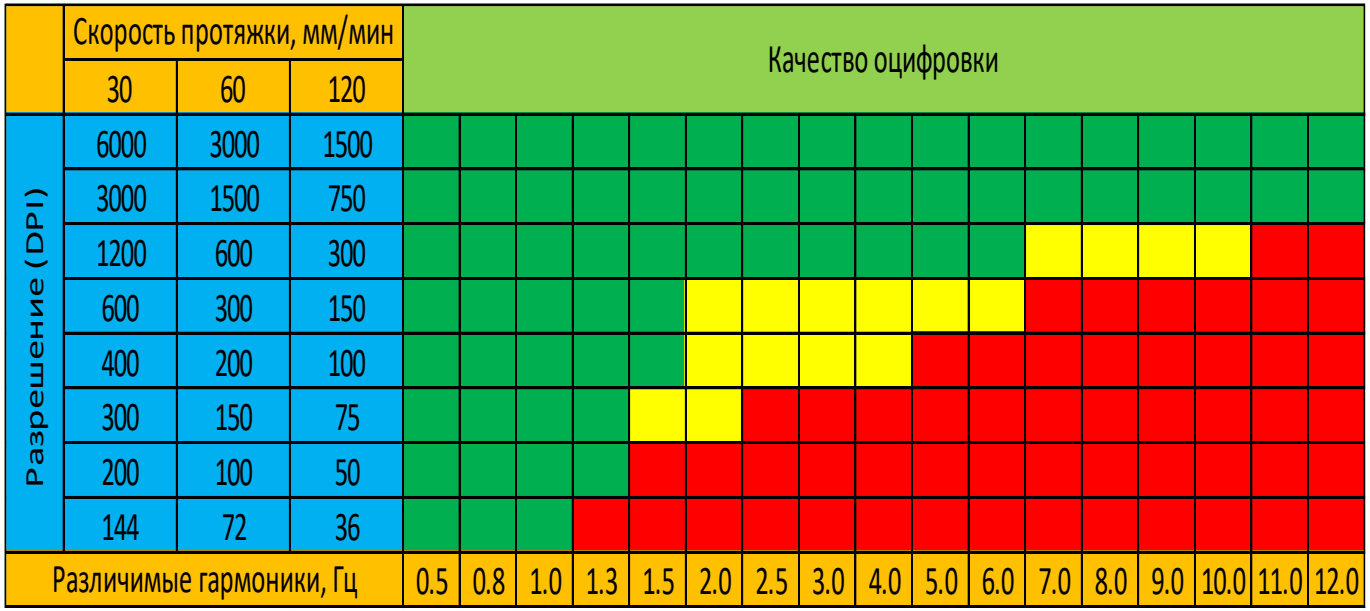


- Способ устранения – сканирование широкоформатным сканером поперек лент

Искажения при сканировании

- недостаточное разрешение

$$DPI = 4500\frac{F_{max}}{V}$$



DPI – минимальное разрешение

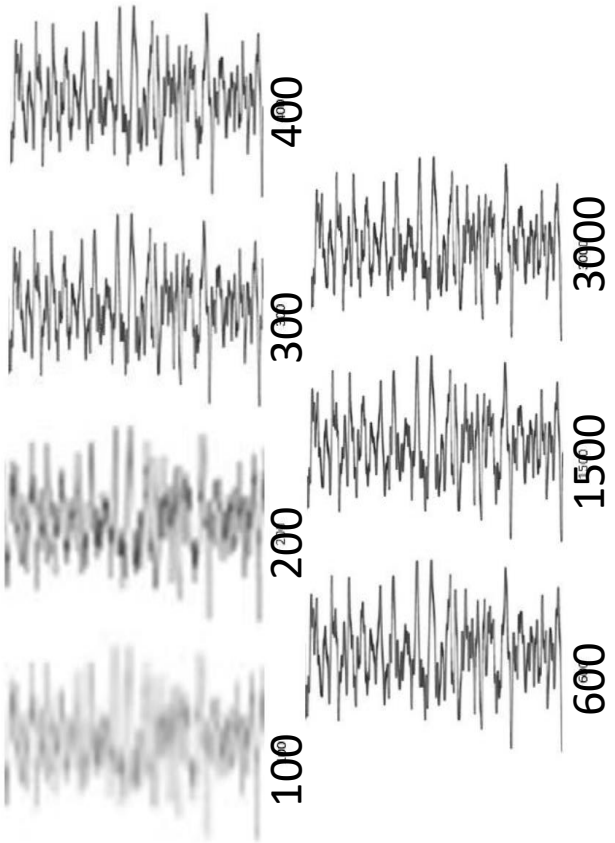
F_{max} – верхняя частота рабочего диапазона, Гц

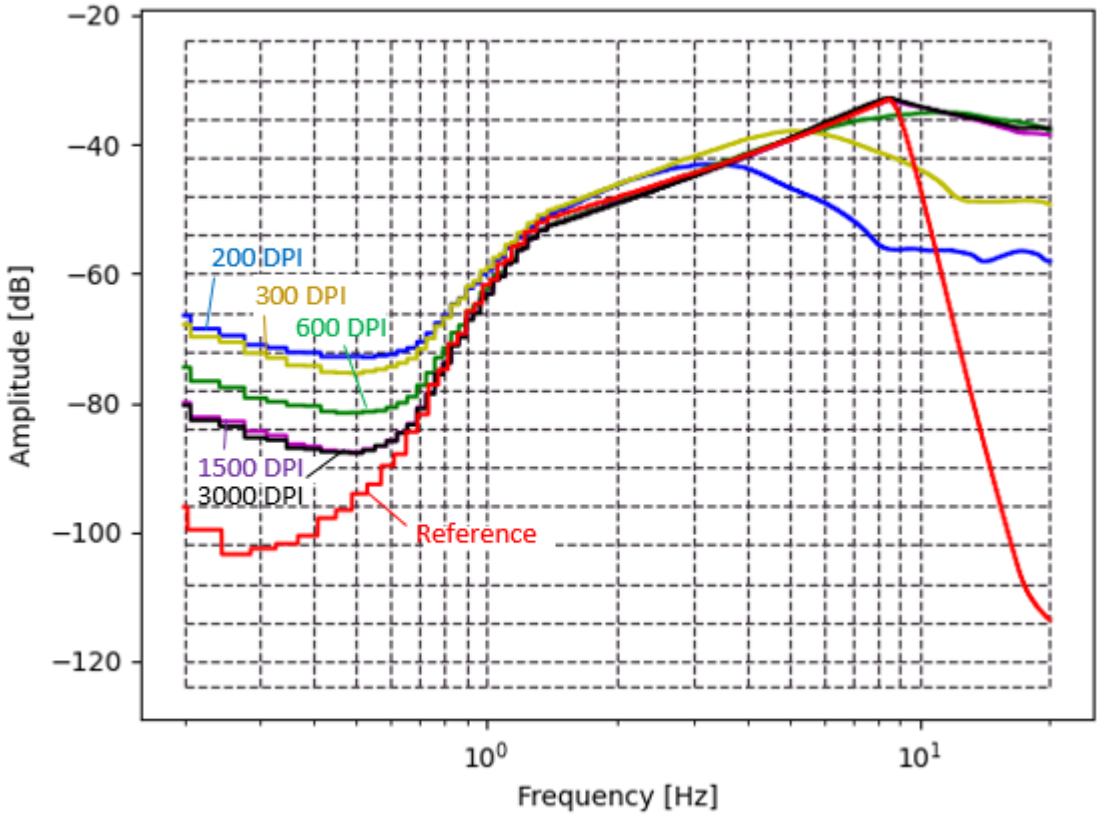
V – скорость протяжки ленты (вращения барабана), мм/мин

- Способ устранения – сканирование с разрешением, зависящим от скорости протяжки и верхней границы частотного диапазона

Искажения при сканировании

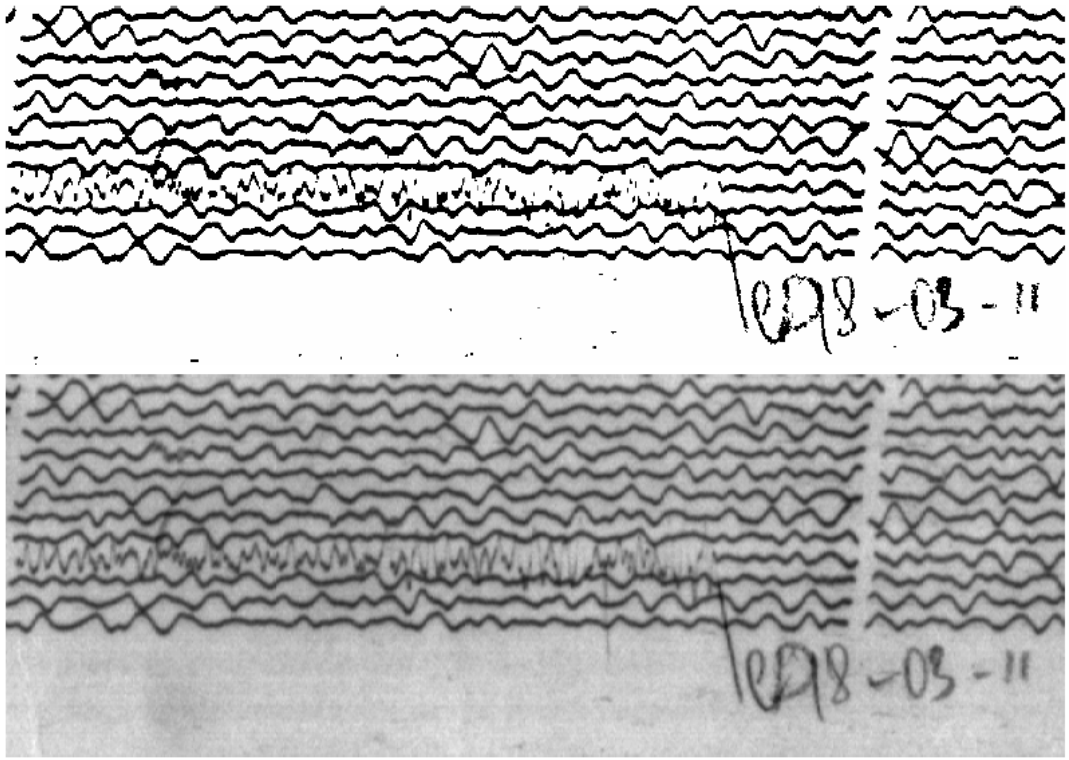
- влияние разрешения на ширину частотного диапазона сигнала





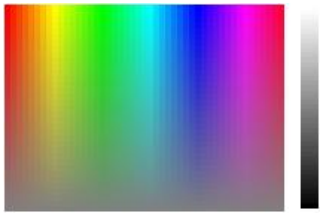
Искажения при сканировании

- недостаточное количество цветов



ч/б

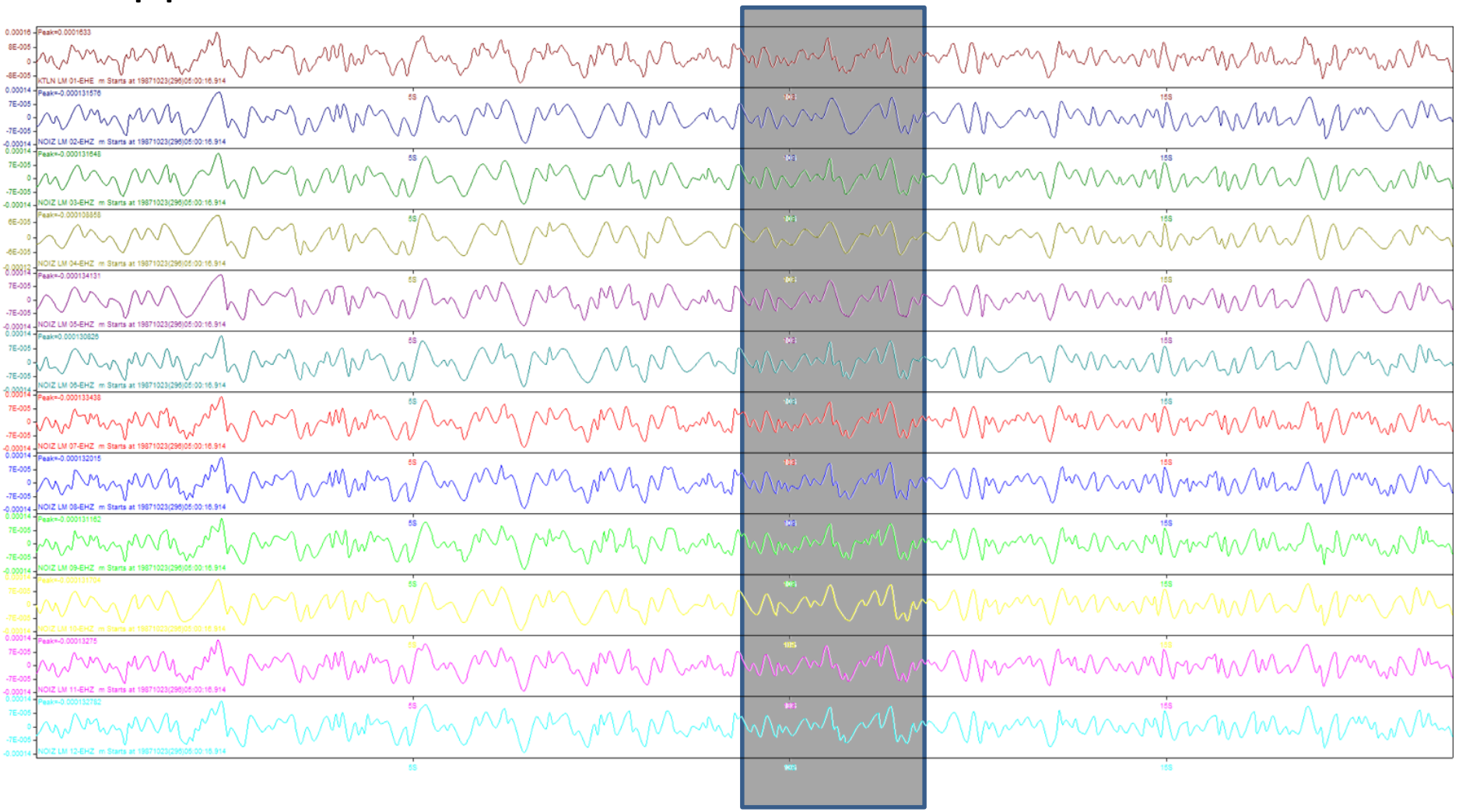
цветной (серый)



- Способ устранения – полноцветное сканирование

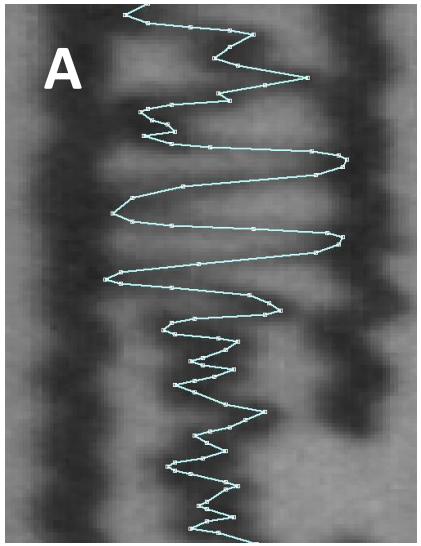
Искажения при оцифровке

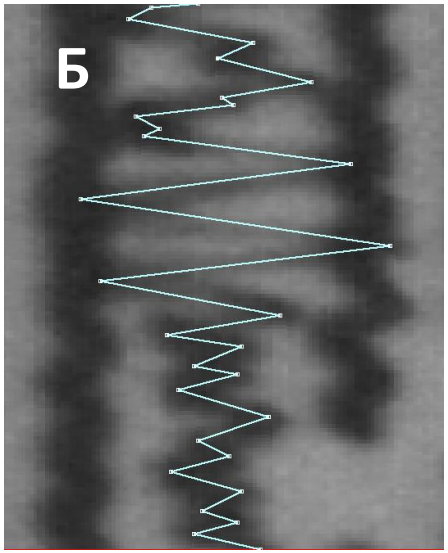
- Разный уровень внимания операторов к деталям

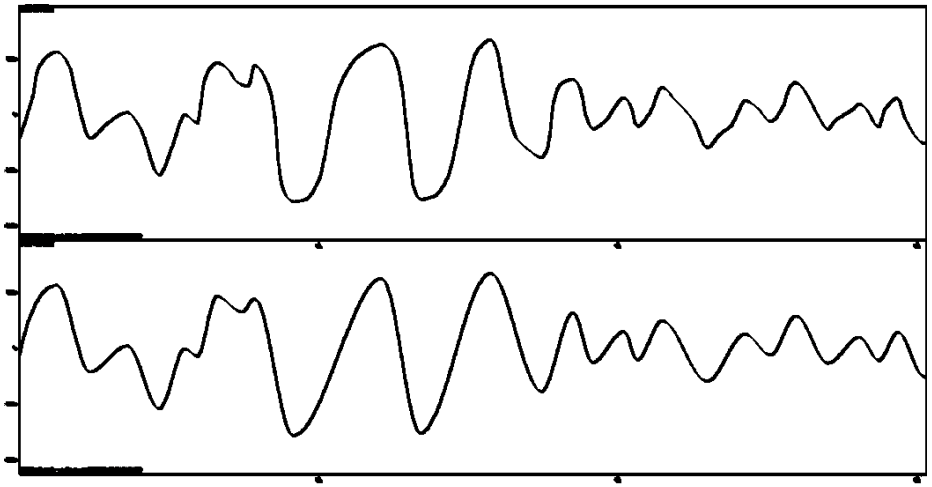


Искажения при оцифровке

- Разные подходы к оцифровке







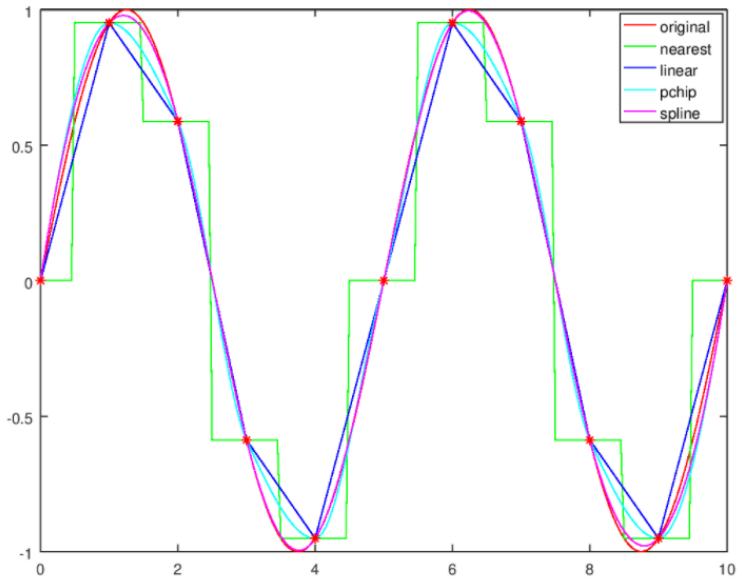
А – избыточный

Б – пиковый

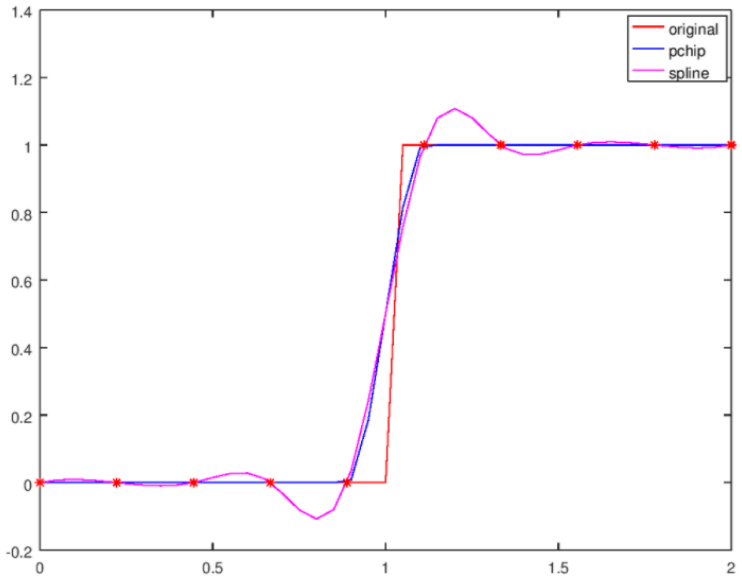
Искажения при оцифровке

- Разные методы интерполяции

sin(x)



ступень

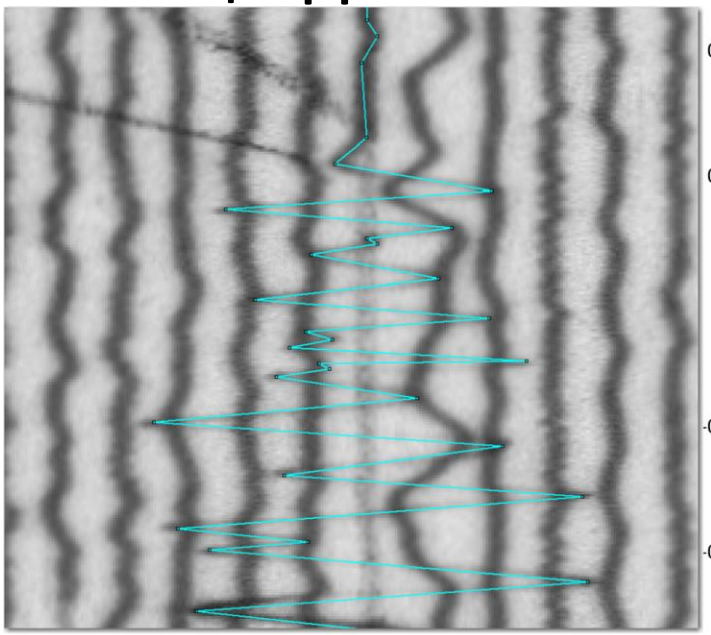


- исходные точки
- ступенчатая интерполяция
- линейная интерполяция
- PCHIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolation Polynomial*)
- кубический сплайн

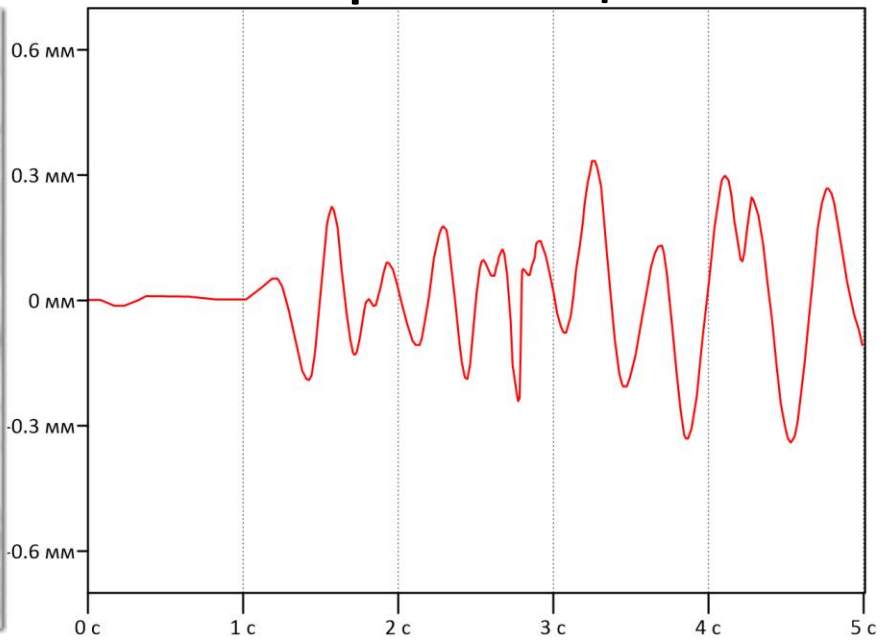
*Fritsch and Carlson, 1980

Искажения при оцифровке

оцифровка



интерполяция



- Наиболее подходящие методы:
  - ✓ для оцифровки – пиковый
    (наилучшее повторение формы при наименьшем числе точек)
  - ✓ для интерполяции – PCHIP
    (наименьшее искажение, использование неравномерных интервалов)

Программное обеспечение для оцифровки

- Графический редактор (*IrfanView, GIMP, PhotoShop* и др.)
- Оцифровщик (*NxScan*[1], *SeisDig*[2], *Teseo*[3], *DigitSeis*[4], *WaveTrack*[5] и др.)
- Интерполятор-конвертер (*PNE2SAC*[6])
- Прочее ПО для просмотра, выявления и корректировки остаточных искажений

[1]California Institute of Technology, 1992
[2]Berkeley Seismological Laboratory, 2003
[3]Istituto Nazionale di Geofisica E Vulcanologia, 2001
[4]Harvard University, 2015
[5]Новосибирский региональный центр геоинформационных технологий, 1999
[6]Michigan State University, 2020

Программное обеспечение для оцифровки

Сравнение эффективности работы ПО

Сигнал	ПО	Время оцифровки
Низкочастотный (0.1-2 Гц)	DigitSeis	~1 час
	WaveTrack	~1 час
Высокочастотный (1-12 Гц)	DigitSeis	8-10 часов
	WaveTrack	1.5-2 часа

Трансформация частотных характеристик

Старая форма представления ЧХ

	Маятник	Гальванометр
Период собственных колебаний:	T=10 с	T=1 с
Постоянная затухания:	D=0.45	D=5.5

Коэффициент взаимной связи маятника и гальванометра: σ^2=0.1

Коэффициент увеличения сейсмографа: V_0=1000

Современная форма представления ЧХ

$$H(s) = G\frac{\prod_k(s-n_k)}{\prod_l(s-p_l)}$$

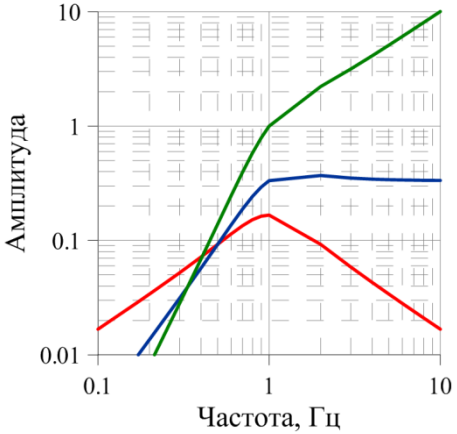
G – масштабный коэффициент,

n_k – нули передаточной функции,

p_l – полюса передаточной функции.

$s = j\omega$ – комплексная переменная Лапласа

ZEROS	3
POLES	4
-0.2753	0.5921
-0.2753	-0.5921
-0.5327	0.0000
-68.59696	0.0000
CONSTANT	69115.03



Hx — частотная характеристика маятника с преобразователем по смещению.

Hv = *Hx*/*s* — частотная характеристика маятника с преобразователем по скорости.

Ha = *Hv* /*s* = *Hx*/s^2 — частотная характеристика маятника с преобразователем по ускорению.

Расчет* комплексной ЧХ из T, D, σ^2 и V_0

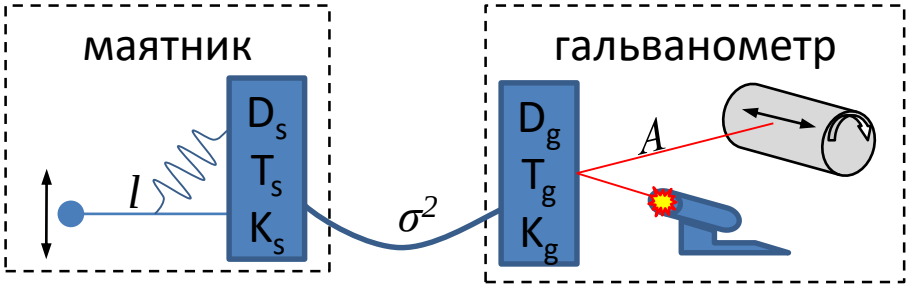
$$V(f) = \frac{jKf^3}{R(f) + jI(f)}$$

Вещественная часть: $R(f) = (f^2 - {f_s}^2)(f^2 - {f_g}^2) - 4D_sD_gf_sf_gf^2(1-\sigma^2) = f^4 - pf^2 + r$

Мнимая часть: $I(f) = 2ff_gD_g({f_s}^2 - f^2) + 2ff_sD_s({f_g}^2 - f^2) = qf - mf^3$

Константа масштаба: $K = 2\frac{D_g}{T_g}V_0\Big|_{\substack{T_s>T_g \\ D_s<D_g}} = 2\frac{D_s}{T_s}V_0\Big|_{\substack{T_s<T_g \\ D_s>D_g}} = 4\frac{A}{l}\left[\frac{K_sD_sD_g}{K_gT_sT_g}\sigma^2\right]^{1/2}$

A – оптическое плечо
l – длина маятника
K_s – момент инерции маятника
K_g – момент инерции гальванометра



Умножая выражения на 2π, можно перейти от переменной частоты f к переменной Лапласа ($s=j\omega$), получить полином 3-й степени в числителе, решением которого являются три нуля, и полином 4-й степени в знаменателе, решением которого (метод Феррари) являются 4 полюса на плоскости Лапласа.

*Hagiwara, T. (1958). A note on the theory of the electromagnetic seismograph, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo,* 36, 139-164.

Расчет* АЧХ из T, D , σ^2 и V_0

$$V(T) = \frac{C_0}{(T^{-2} + a + bT^2 + cT^4 + dT^6)^2}$$

$$a = m^2 + 2p \qquad b = p^2 - 2mq + 2r \qquad c = q^2 - 2pr \qquad d = r^2$$

$$m = 2\left(\frac{D_s}{T_s} + \frac{D_g}{T_g}\right) = 2\left(D_s f_s + D_g f_g\right)$$

$$p = \frac{1}{{T_s}^2} + \frac{1}{{T_g}^2} + \frac{4D_s D_g}{T_s T_g}(1 - \sigma^2) = {f_s}^2 + {f_g}^2 + 4D_s D_g f_s f_g (1 - \sigma^2)$$

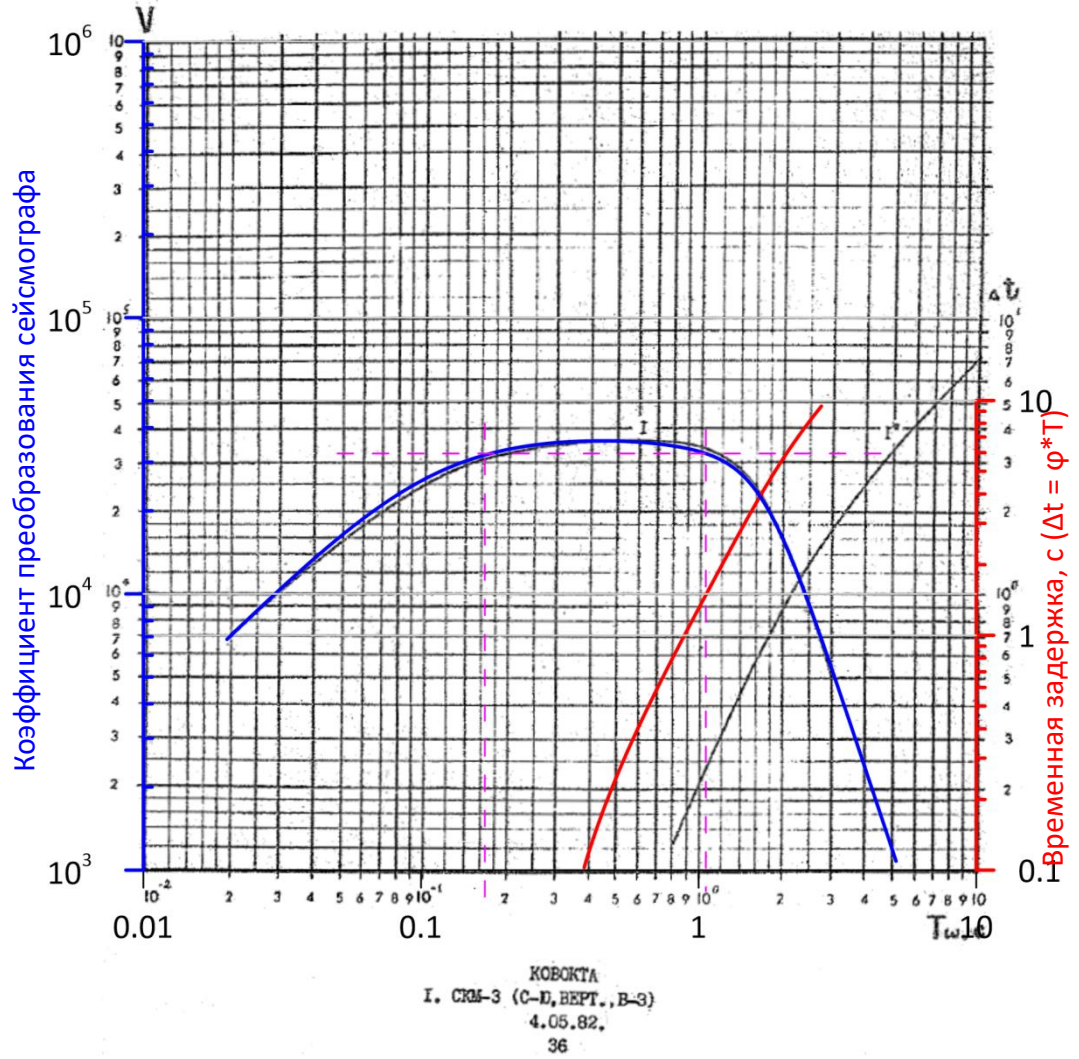
$$q = 2\left(\frac{D_s}{T_s {T_g}^2} + \frac{D_g}{T_g {T_s}^2}\right) = 2(D_s f_s {f_g}^2 + D_g f_g {f_s}^2)$$

$$r = \frac{1}{{T_s}^2 {T_g}^2} = {f_s}^2 {f_g}^2$$

*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, Vol. 85, No. 6, pp. 1835-1846, December 1995

Опечатки в параметрах ЧХ аналоговых сейсмических каналов

№ пп	Наименование с/станции	Тип прибора	Составляющая	T_S T_s с	D_S $Д_s$	T_g T_q с	D_g $Д_q$	σ^2 G^2	V_0 V_{0v}	V_m V_m	T_m T_m с	Дата Дата определения
	"Ковокта"	СКМ-3	С-Ю	I,74	0,53	0,37	I,84	0,00993	35000	36227	0,2-I,2	04.05.82г.
			Верт	–	–	–	–	0,0984	–	36213	–	
			В-З	–	–	–	–	0,I0I4	–	36239	–	



РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ (при V_0=35000):

Vm – максимальное значение

Vm(С-Ю) = 35822 (±1.12%) при σ²=0.00993

= **36236** (±0.02%) при σ²=**0.0993**

Vm(Верт) = **36231** (±0.05%)

Vm(В-З) = **36249** (±0.03%)

0.9 *Vm* – условный уровень определения рабочей полосы периодов

Tm – рабочая полоса периодов

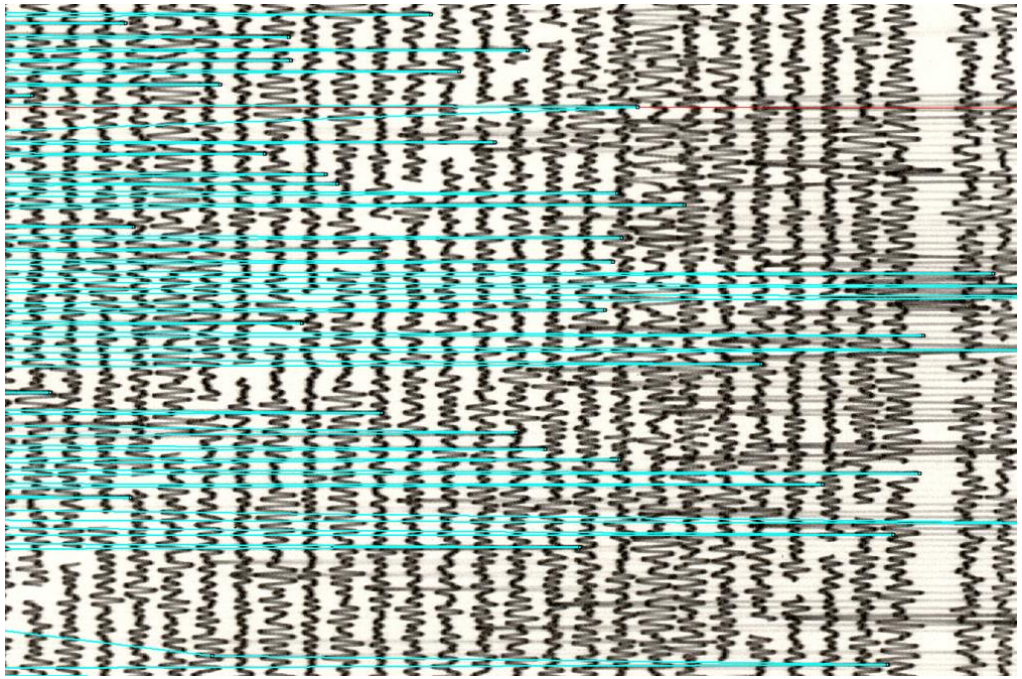
Tm(С-Ю) = 0.18 – 1.05 **с** при σ²=0.00993

= **0.19 – 1.19 с** при σ²=**0.0993**

Tm(Верт) = **0.19 – 1.19 с**

Tm(В-З) = **0.19 – 1.19 с**

Контроль качества оцифровки



Сложная сейсмограмма с пересечением высокоамплитудных колебаний на соседней компоненте

Пример листа контроля качества

METADATA
Station Khandyga Network ID RU Code KHG ISC Station Code KHG
Date 24-Jul-1987 Event Neva2-2 Component EHZ

SEISMOGRAM DETAILS
Instrument Type: SKM Magnification (CF) 36440 T_m 0.2-1.2
Time Correction # 1: @ Date 23-Jul 22 h. T.C.= 0.0 s Time Correction # 2: @ Date 24-Jul 09 h. T.C.= 0.0 s
Interpolated Time Correction for event (TC): @ Date h. T.C.= 0.0 s
Signal Polarity: Positive, N, E ☑ Negative, S, W ☐ VERIFIED ? ☐
Trace Velocity: 60 mm/minute

SCAN AND IMAGE DETAILS
Original Resolution (dpi) 600 Image Format TIFF (BMP/TIFF/JPG/PNG)
File Combined from Multiple Images? ☐ If yes, from Multiple Files? ☐ and/or Waveform Extension? ☐
Up Sampled Resolution (dpi) Image Format (BMP/TIFF/JPG/PNG)
Image Rotation = [+/-] 0° *See Image Processing Guide for calculation*
File Name Neva2-2_Khandyga_KHG_YAKnet_24-Jul-1987
Scan Condition and Image Processing Notes
Scan has undergone rolling, leaving slight creases throughout, with relatively small effect on the overall seismogram scan. Scan is of good quality.
Image Processed By Brandi Wheeler DATE October 25, 2020

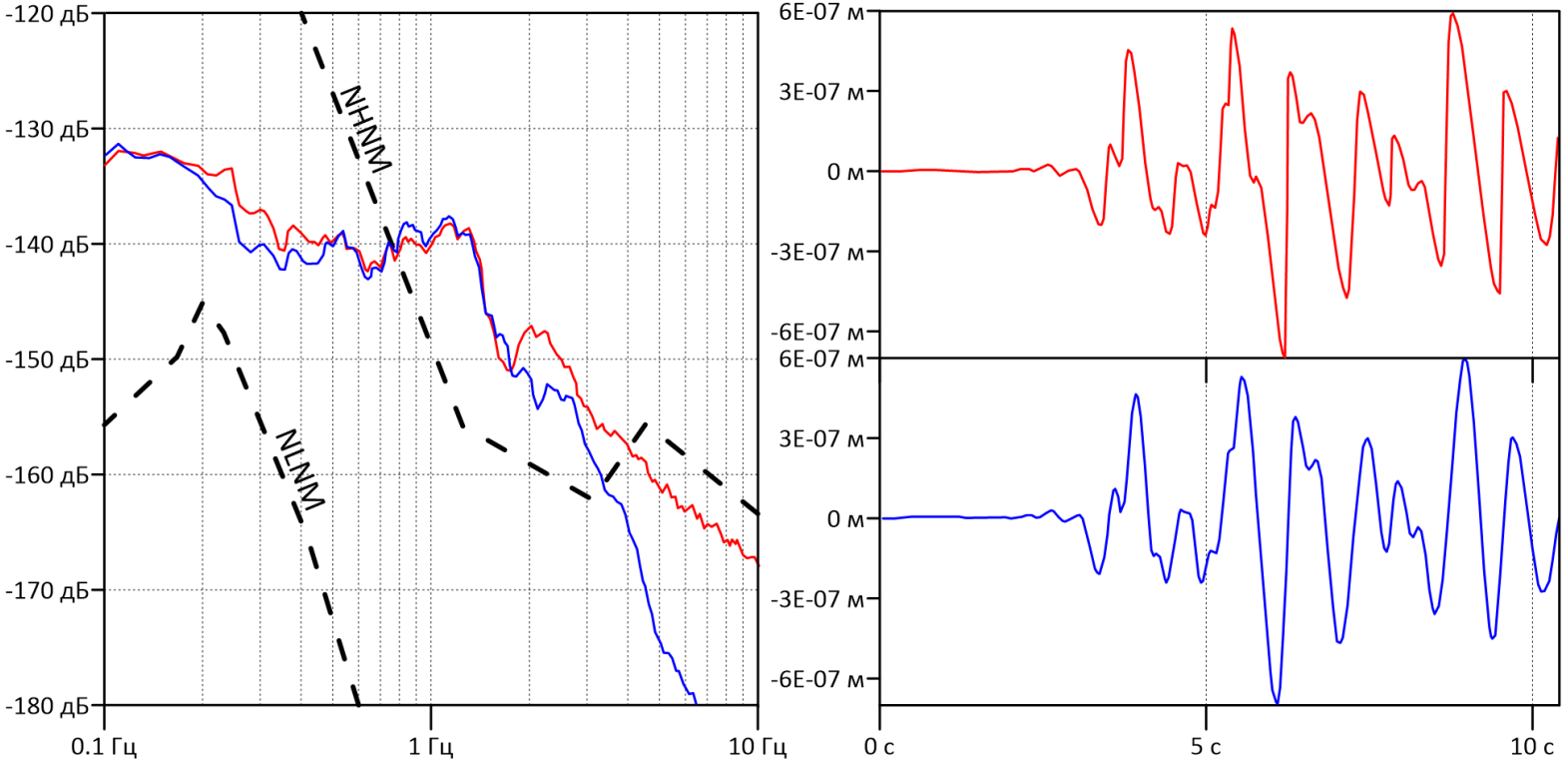
WAVETRACK PASS #1
Digitized Trace Start time (REFTIME) 24_JUL_1987_02:02:00.000
MSEED Export Start time (STARTTIME) 24_JUL_1987_02:02:00.000
Template used N/A Amplitude Interval 0-10
Resampling Interval 0.01 (seconds)
File Component EHZ (HHZ, HHN, HHE, etc.)
.wsp file name Neva2-2_Khandyga_EHZ Export file name Neva2-2_Khandyga_EHZ_120-575.txt
DIGITIZED BY Chris Witte DATE November 18, 2020

EDIT EXPORT FILE (to prepare file for PNE2SAC conversion – Record actual header information here)
STATION KHG
NETWORK RU
COMPONENT EHZ
CF(from above) 36440
TC(Time Correction from above) +0.0
REFTIME(from above) 24_JUL_1987_02:02:00.000
STARTTIME(from above) 24_JUL_1987_02:02:00.000
COMMENT Neva 2-2
EXPORT EDITED BY Chris Witte DATE November 18, 2020

PNE2SAC Conversion
.log file name Neva2-2_Khandyga_EHZ .mseed file name KHG.RU..EHZ.1987.07.24.02.02.00
All time discrepancies repaired? ☐
Wavetrack .wsp file edited & re-exported ☐
PNE2SAC discrepancy graph file name KHG.RU..EHZ.1987.07.24.02.02.00.png
.mseed file checked for asymmetry in DIMAS ☑
Event arrival time from paper seismogram 02:02:30.000 GMT
Event arrival time from Miniseed file 02:02:30.055 GMT Do they match? ☑
CONVERTED BY Chris Witte DATE November 18, 2020

Turn Page Over Last Updated 2020-08-11(PM)

Контроль качества оцифровки



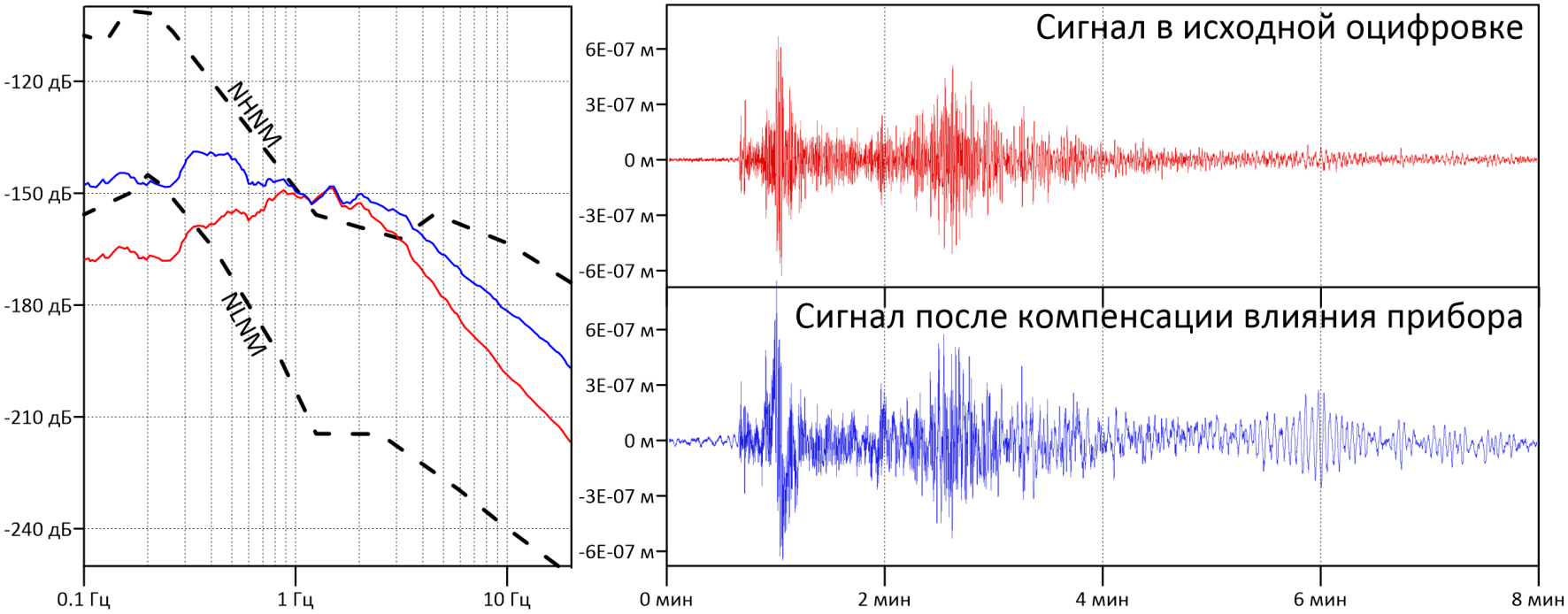
ошибки частотного состава в результате оцифровки слегка повернутого сигнала (красная линия) в сравнении с правильно ориентированной сейсмограммой (синяя линия)

Этапы технологии оцифровки аналоговых сейсмограмм

- Работа со сканом
  - сканирование
  - поворот изображения
  - стыковка лент (частей ленты)
- Оцифровка
  - установка размеров ленты (выбор шаблона)
  - корректировка шкалы времени
  - установка характерных пиковых точек
  - экспорт точек
  - редактирование метаданных канала (коды-идентификаторы и др.)
- Интерполяция
  - визуальная проверка волновых форм
  - корректировка пиковых точек
  - сохранение в SAC, miniseed
- Трансформация ЧХ
  - сканирование
  - распознавание параметров каналов
  - пересчет параметров каналов полюса-нули
  - сравнение расчетных ЧХ с опубликованными графиками
  - корректировка параметров
- Контроль качества
  - независимая проверка всех этапов работы с записью
  - коррекция
  - внесение цифровой записи и ЧХ в БД

Литература

- *Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР* / Ред. З.И. Аранович, Д.П. Кирнос, В.М. Фремд. М.: Наука, 1974. 244 с.
- *Дягилев Р.А., Бутырин П.Г., Мяки К., Бурк Д., Бурхард К., Уилер Б., Уитт К.* 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
- *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.
- *Bogiatzis P., Ishii M.* DigitSeis: A New Digitization Software for Analog Seismograms. Seismological Research Letters. V.87, №3, 2016. – 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.
- *Fritsch F.N. and Carlson R.E.* Monotone Piecewise Cubic Interpolation. SIAM Journal on Numerical Analysis. Vol. 17, Iss. 2. 1980. DOI: https://doi.org/10.1137/0717021
- *Hagiwara T.* A Note on the Theory of the Electromagnetic Seismograph. Bulletin of the Earthquake Research Institute, V.36, 1958. – 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, V.85, №6, 1995. – P. 1835–1846.
- *Peterson J., Hutt C.* World-Wide Standardized Seismograph Network: A Data Users Guide. – U.S. Geological Survey Open-File Report 2014–1218. – 74 p. [Site]. URL: http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141218
- *Pintore S., Quintiliani M., Franceschi D.* Teseo: A vectoriser of historical seismograms. Comput. Geosci. V.31, 2005. – P. 1277–1285. DOI: 10.1016/j.cageo.2005.04.001
- *Trifunac M.D., Lee V., Todorovska M.* Common problems in automatic digitization of strong motion accelerograms. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V.18, 1999. – P. 519–530.
- *Xu Y., Xu T.* An interactive program on digitizing historical seismograms / Computers & Geosciences, V. 63, 2014. – P.88–95.



Спасибо за внимание