

T8 СЕНСОР | СЕЙСМИКА

# ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СЕНСОРОМ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА GLOBAL DAS MONTH

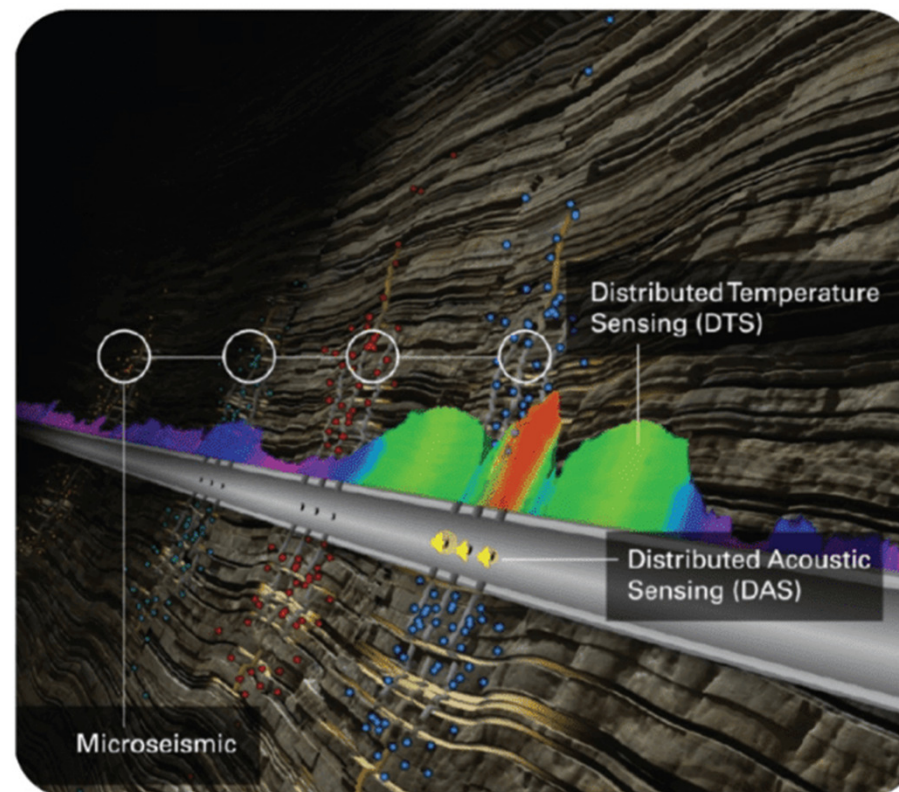
## Егор Спиридонов

Ведущий специалист по цифровой обработке сигналов

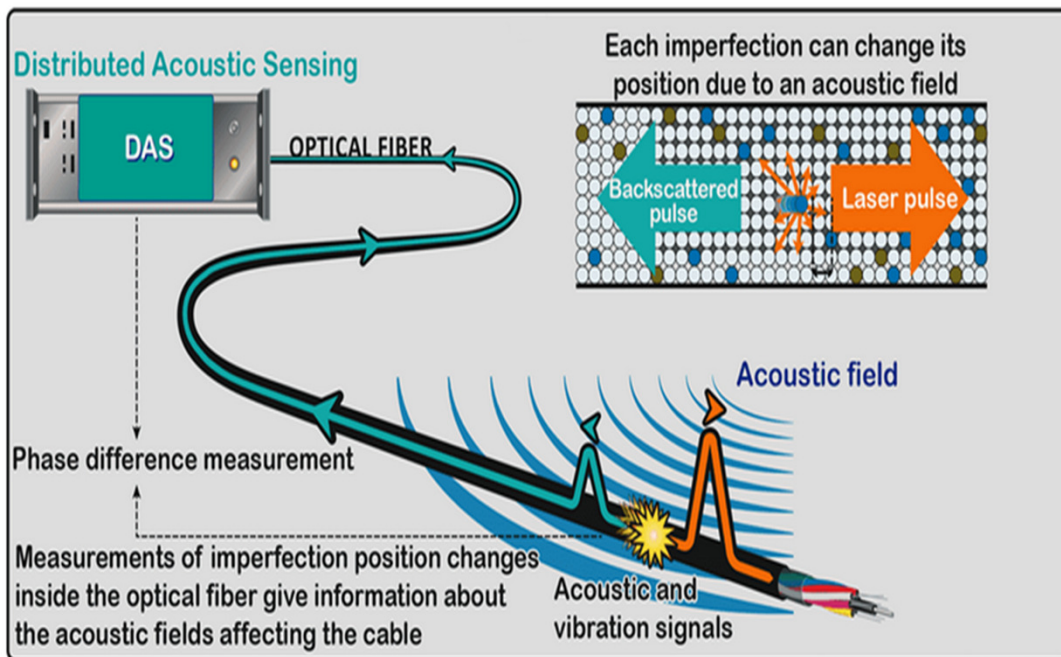


## План доклада

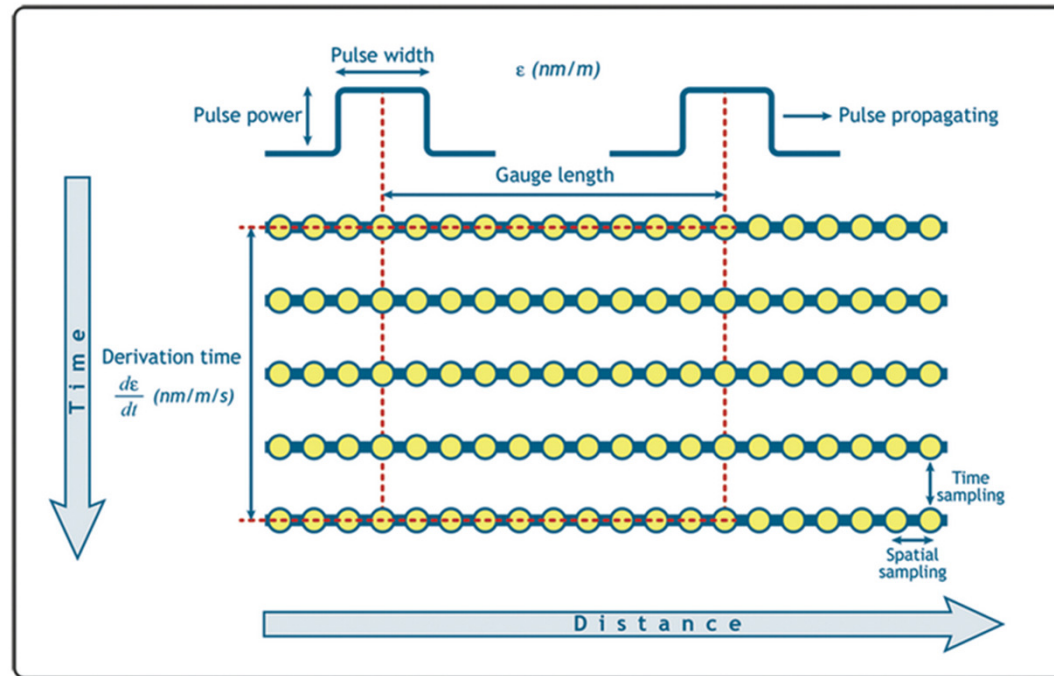
1. DAS и сейсмометрия
  - принцип работы и параметры DAS
  - применения
2. Система «Дунай» Т8
  - обзор
  - применения
3. Обзор DAS Global Month
  - Требования и постановка
  - Режимы работы и компоненты ПАК Дунай Сейсмика
  - Подготовка данных
4. Анализ данных эксперимента
  - Алгоритм оценки ОСШ
  - Чувствительность кабеля в грунте
  - Спектральный анализ
  - Оценка амплитуды объемных волн
  - Выбор данных
  - Корреляция параметров
  - Оценка амплитуды объемных волн
5. Заключение
  - Выводы



# DAS И СЕЙСМОМЕТРИЯ: принцип работы и параметры DAS



INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL - RED SISMICA NACIONAL



## Преимущества

- Высокое пространственное разрешение (~м).
- Высокое временное разрешение (~ кГц).
- Большой пространственный охват (более 100 км).
- Возможность использования уже проложенных оптоволоконных кабелей.
- Пригодно для городских территорий и отдаленных мест (океаны, вулканы, ледники и т. д.).
- Нет проблем с синхронизацией сенсорных часов.

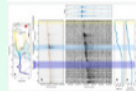
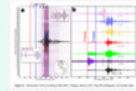
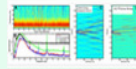
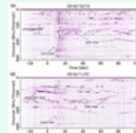
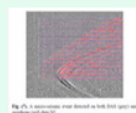
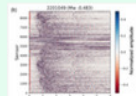
## Недостатки и ограничения

- DAS может регистрировать скорость деформации только вдоль волокна.
- Большой объем данных (~ТБ/день).
- Трудно узнать точные координаты положения кабеля и его связь с землей.

## DAS И СЕЙСМОМЕТРИЯ: применения



- скважинные и поверхностные DAS при разведке и добыче полезных ископаемых;
  - мониторинг резервуаров СО и исследований в области геотермальной энергии;
  - пассивная и активная сейсмическая томография, как малоглубинная, так и глубокая;
  - сейсмология землетрясений, в т.ч. маломagnitudeных и микроземлетрясений;
  - анализ изменения скоростей поперечных волн;
  - изучение криосферных систем;
  - инженерная геофизика, в т.ч. исследования в мегаполисах;
- визуализация шума;
- морская геофизика, в т.ч. картирование разломов, изучение их движений; распределения отложений на шельфе, анализ океанических микросейсм и приливов;
  - гидросейсмология;
  - раннее предупреждение о землетрясении и цунами;
  - мониторинг вулканов;

Применение	Место	Результаты	Ссылка
Обнаружение землетрясений и сейсмический мониторинг (локальные землетрясения)	Тулон (Франция)		<a href="#">Sladen et al. (2019)</a>
Обнаружение землетрясений и сейсмический мониторинг (телесеисмика)	От Западного Сакраменто до Вудленда (Калифорния)		<a href="#">Ajo-Franklin et al. (2019)</a>
Анализ сейсмического шума	Полевая станция Ричмонд (Беркли)		<a href="#">Ajo-Franklin et al. (2015)</a>
Мелкая структура поверхности	Побережье Сансику (Япония)		<a href="#">Spica et al. (2021)</a>
Городской мониторинг недр	Стэнфорд (Калифорния)		<a href="#">Fang et al. (2020)</a>
Мониторинг нефти, газа и микросейсмичности	Канада		<a href="#">Webster et al. (2013)</a> , <a href="#">Karam et al. (2013)</a>
Геотермальные применения	Брейди Хот Спрингс (Невада)		<a href="#">Li and Zhan (2018)</a>

## СИСТЕМА ДУНАЙ: ОБЗОР

до  $\pm 10$  м

Высокое разрешение

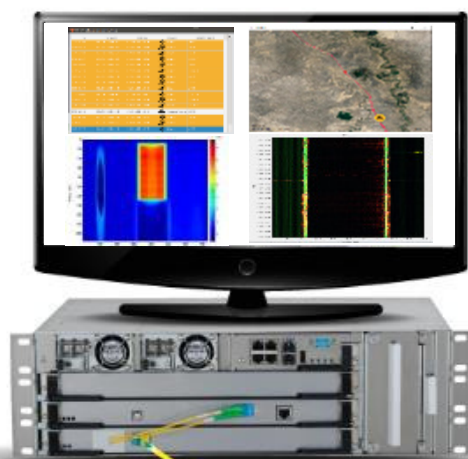
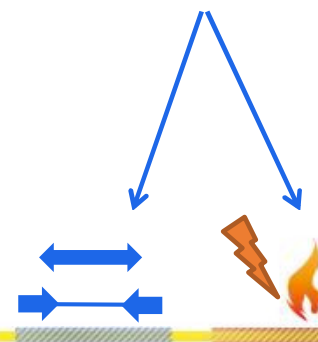
1.6 м

Высокая дискретизация

 $\pm 0.5^\circ\text{C}$  за 1 сек

Температурные или деформационные изменения за

до 75 км

Рабочий диапазон  
100 км в расширенной конфигурации← ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНТЕРФЕЙС← 3U, 19"  
ВКЛЮЧАЯ СЕРВЕРВИБРАЦИИ  
0.01 Гц – 10 кГцДЕФОРМАЦИЯ ИЛИ ТЕПЛОВОЕ  
ВОЗДЕЙСТВИЕПАССИВНЫЙ  
ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧЕСКИЙ  
КАБЕЛЬ

Стандартный телекоммуникационный кабель с одномодовым оптоволоконном G.652, G.655, G.657

Работа с многомодовым оптоволоконном G.651 в качестве опции

СТАБИЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НА ВСЕЙ ДЛИНЕ

# СИСТЕМА ДУНАЙ: применения



ГРАНИЦА



ПЕРИМЕТРАЛЬНАЯ  
ОХРАНА



ТЕЛЕКОМ



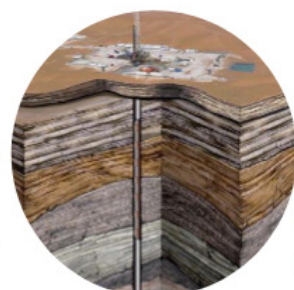
АВТОДОРОГИ



ЖЕЛЕЗНЫЕ  
ДОРОГИ И МЕТРО



НЕФТЕ-  
И ГАЗОПРОВОДЫ



Нужно > 100 Гц  
ПРОФИЛИРОВАНИЕ  
СКВАЖИН



Нужно < 10 Гц  
ГЕОФИЗИКА И  
СЕЙСМОЛОГИЯ



И ДРУГИЕ ...



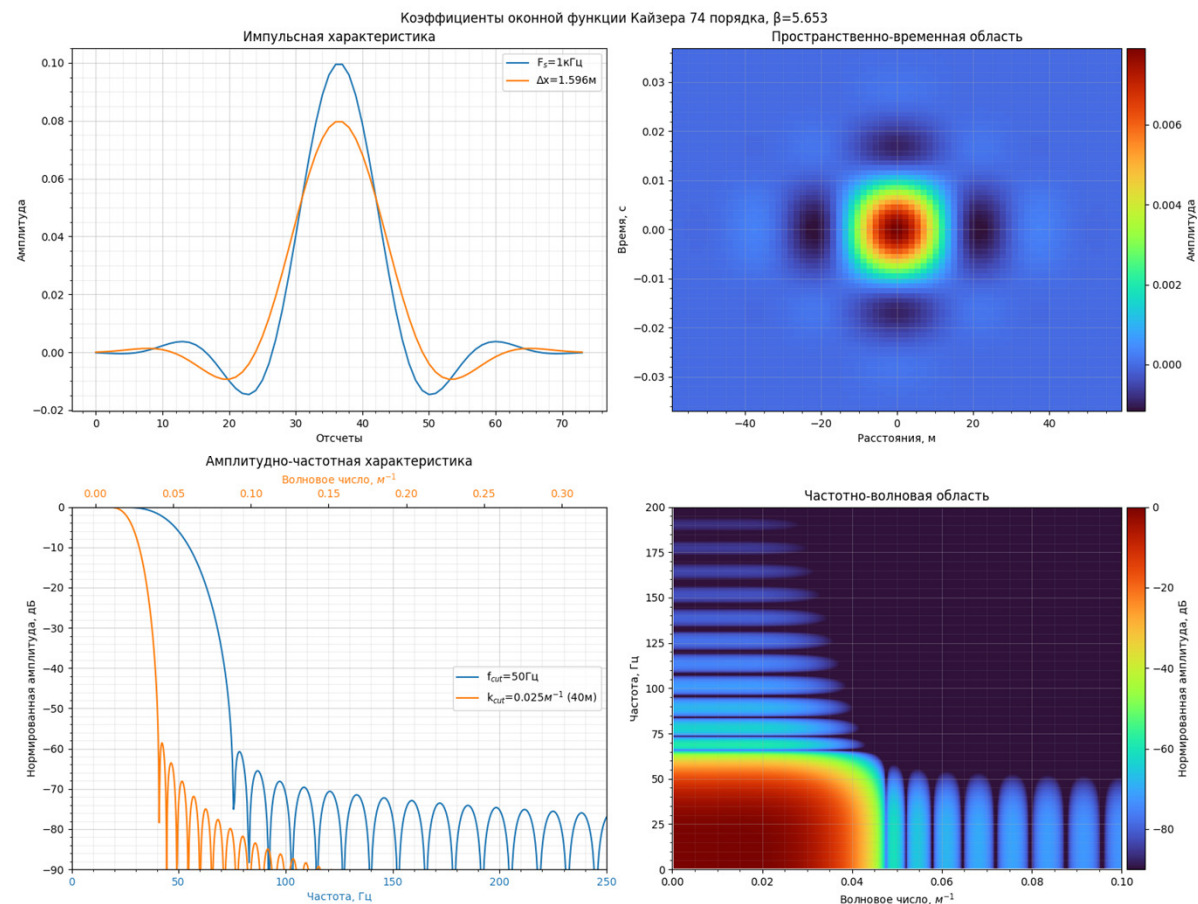
# Global DAS Month: требования



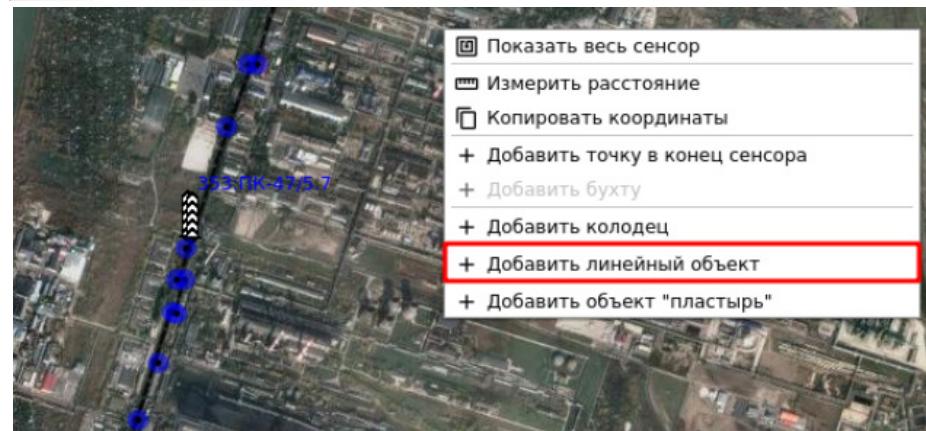
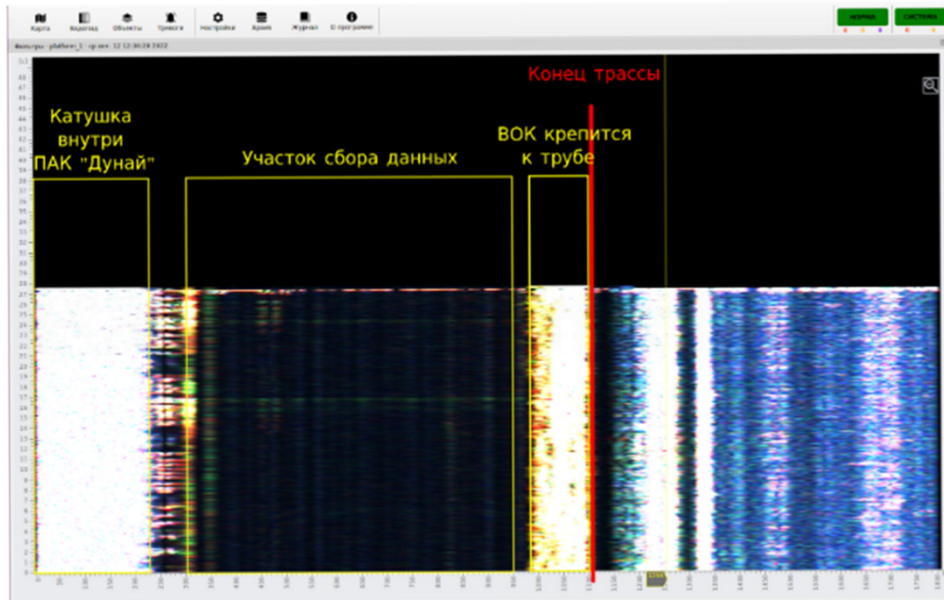
Параметры	Требования	Режим ПАК Дунай
Частота дискретизации	до 100 Гц	1000 Гц
Пространственная выборка	~20 м	~ <u>1.6м</u>
Длина используемого волокна	от 800 м	~680м
База измерения		20м
Длительность записи	1 час	
Продолжительность	02.2023	18.01-13.03.2023
Дополнительно 14 февраля 2023 г. была проведена непрерывная регистрация продолжительностью 24 часа с частотой дискретизации, 50 Гц.		

## Программные компоненты ПАК Дунай Сейсмика:

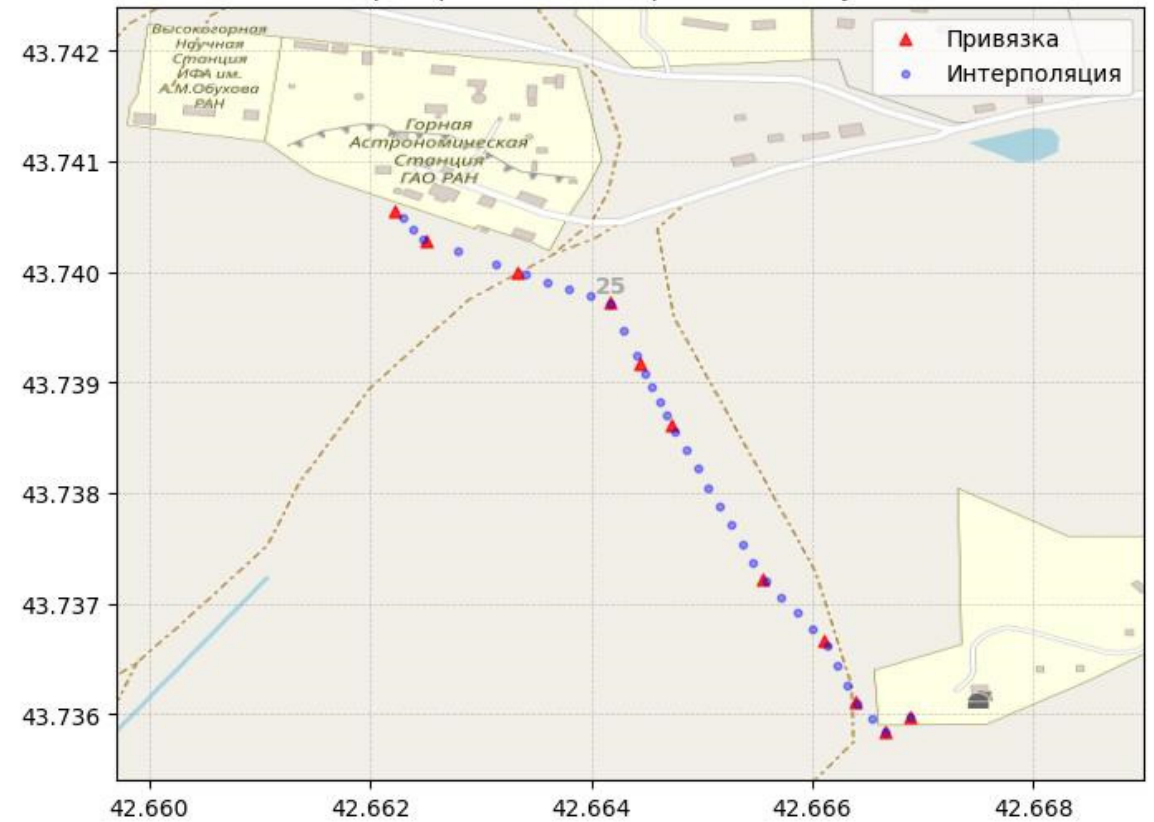
- Parser ([earthquake.usgs.gov](http://earthquake.usgs.gov));
- Copier (кольцевой буфер 3 часа);
- Resampler (параметры передискретизации).



## Global DAS Month: привязка



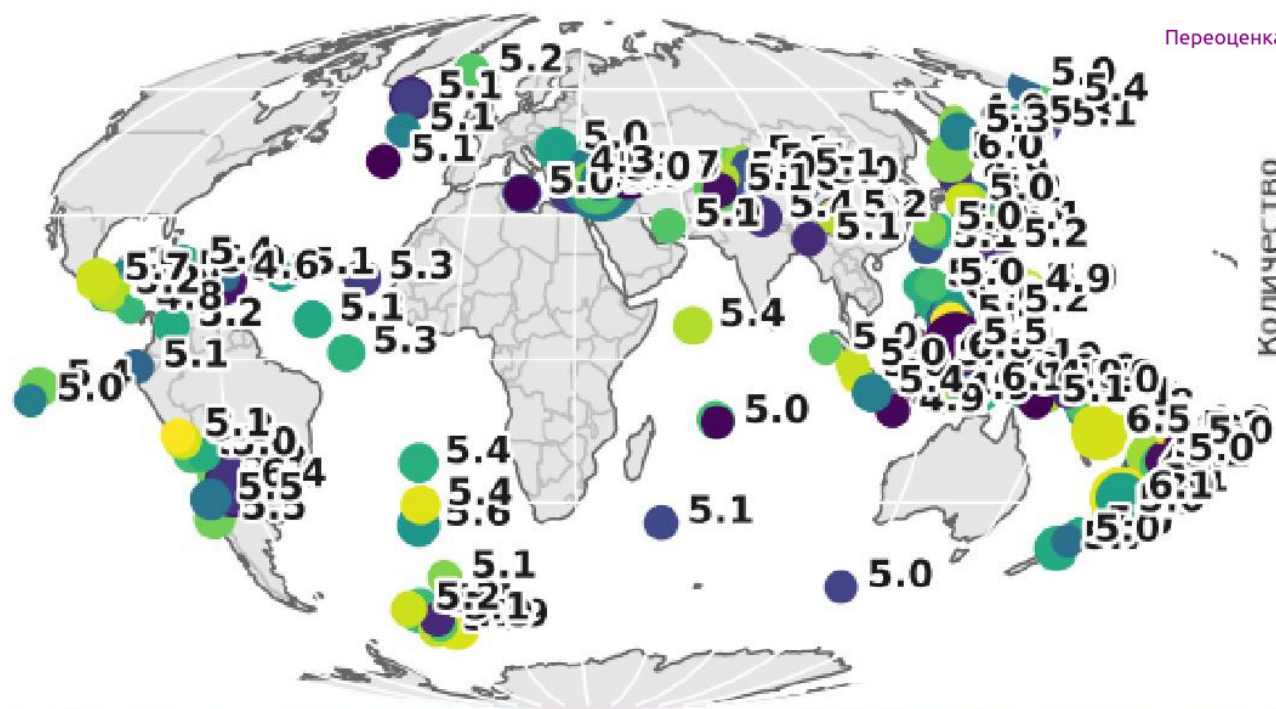
Пространственная привязка T8 Дунай



# Global DAS Month: записанные события

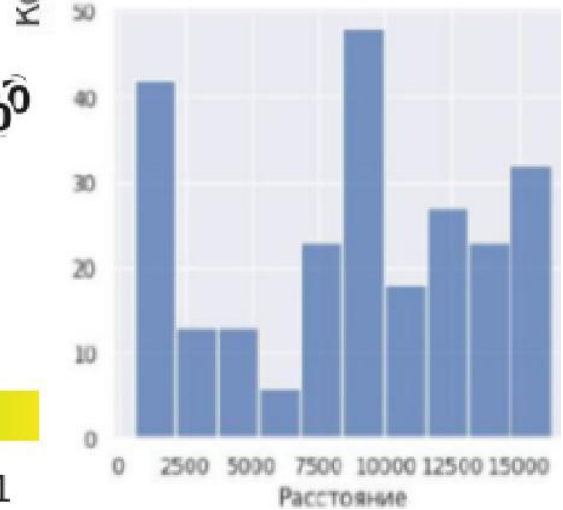
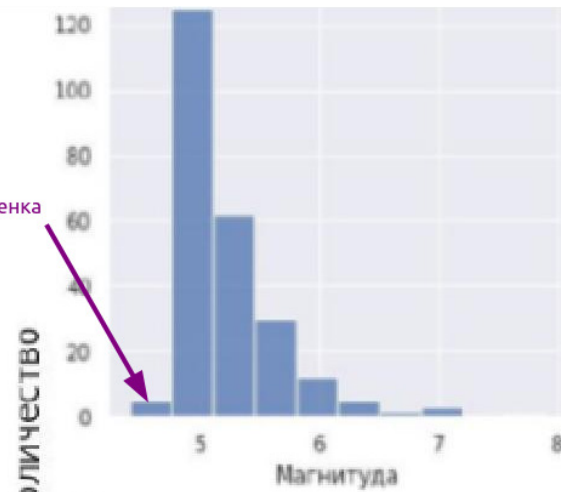


245 событий за время эксперимента



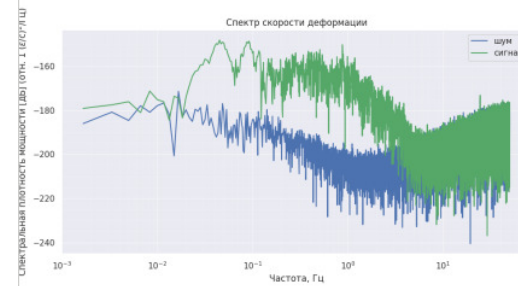
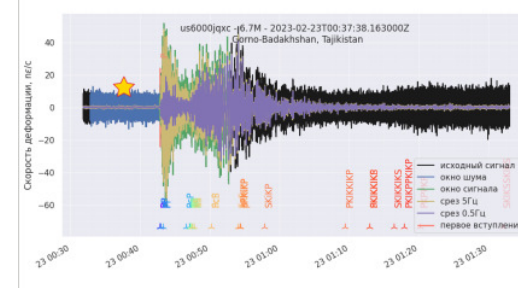
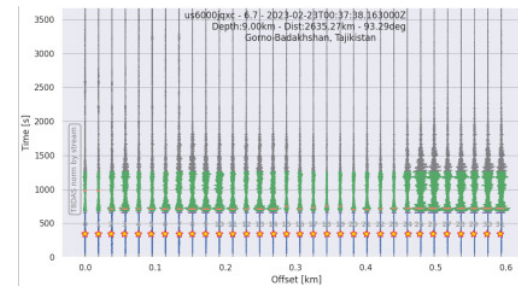
2023-01-22   2023-02-01   2023-02-08   2023-02-15   2023-02-22   2023-03-01

Переоценка

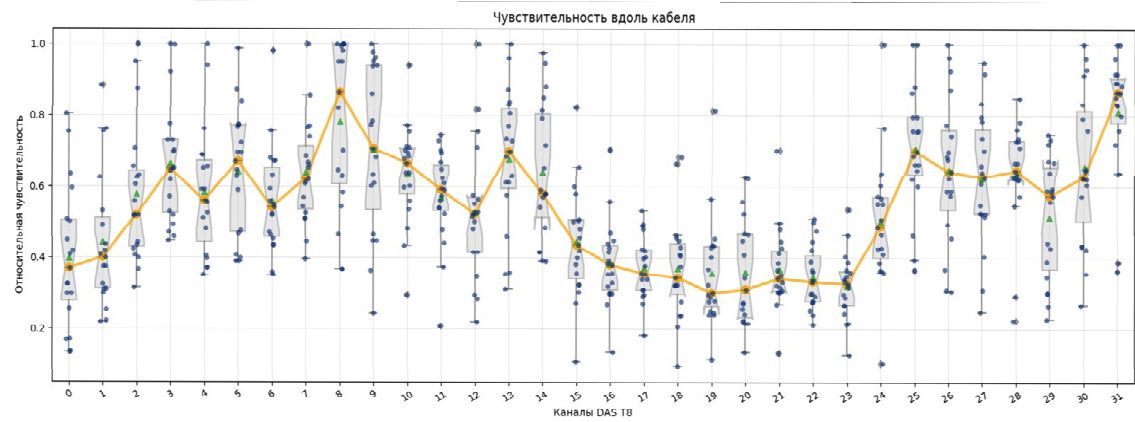
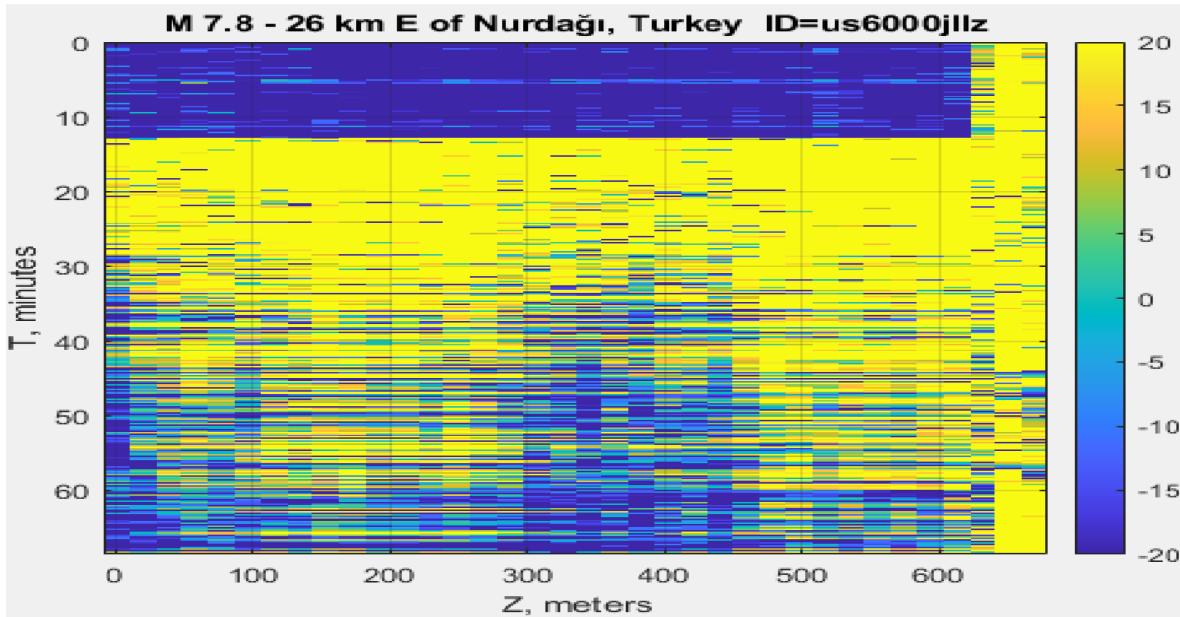


# Анализ: Алгоритм оценки ОСШ

event_id	us7000j5vr	us7000j5sc	us7000j5pu	us7000j5sy	us6000jqxc	us6000jqxg	us6000jqzy	us6000jr0f	us6000jr2a	us7000j646
az	313.61	44.35	310.67	307.43	293.60	293.45	58.65	52.02	30.68	313.61
baz	91.83	291.86	54.74	75.93	93.29	93.24	258.68	264.64	315.48	91.81
calib	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
channel	STR	STR	STR	STR	STR	STR	STR	STR	STR	STR
inates_latitude	43.74	43.74	43.74	43.74	43.74	43.74	43.74	43.74	43.74	43.74
ates_longitude	42.66	42.66	42.66	42.66	42.66	42.66	42.66	42.66	42.66	42.66
degfromorigin	83.97	89.16	69.99	145.11	23.65	23.50	130.37	120.04	133.62	84.02
delta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
distance	478.65	478.65	478.65	478.65	478.65	478.65	478.65	478.65	478.65	478.65
endtime	2023-01-20T18:20...	2023-01-20T11:55...	2023-01-20T06:19...	2023-01-20T13:13...	2023-02-23T01:33...	2023-02-23T01:51...	2023-02-23T11:20...	2023-02-23T13:58...	2023-02-23T18:17...	2023-01-21T20:38...
event_depth	24,625.00	162,000.00	47,894.00	10,000.00	9,000.00	10,000.00	10,000.00	182,599.00	10,000.00	28,931.00
event_lat	2.75	16.14	38.92	-27.95	38.06	38.13	-33.90	-24.00	-6.06	2.72
event_lon	126.94	-62.15	142.10	-176.31	73.23	73.07	-73.25	-66.75	-106.51	126.99
event_mag	5.00	6.10	5.00	5.30	6.70	5.10	5.40	5.20	5.00	5.10
event_time	2023-01-20T17:49...	2023-01-20T11:23...	2023-01-20T05:48...	2023-01-20T12:41...	2023-02-23T00:37...	2023-02-23T00:55...	2023-02-23T10:23...	2023-02-23T13:01...	2023-02-23T17:21...	2023-01-21T20:06...
kmfromorigin	9,340.61	9,927.90	7,801.87	16,135.71	2,635.49	2,618.85	14,489.87	13,343.44	14,865.06	9,346.32
location	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
n_rms	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
network	T8DAS	T8DAS	T8DAS	T8DAS	T8DAS	T8DAS	T8DAS	T8DAS	T8DAS	T8DAS
npts	375244	375243	375243	375243	410981	410981	410981	410982	393111	375244
o	2023-01-20T17:49...	2023-01-20T11:23...	2023-01-20T05:48...	2023-01-20T12:41...	2023-02-23T00:37...	2023-02-23T00:55...	2023-02-23T10:23...	2023-02-23T13:01...	2023-02-23T17:21...	2023-01-21T20:06...
o_ar1_name	P	P	P	Pdiff	P	P	Pdiff	Pdiff	Pdiff	P
o_ar1_time	2023-01-20T18:02...	2023-01-20T11:36...	2023-01-20T05:59...	2023-01-20T12:58...	2023-02-23T00:42...	2023-02-23T01:00...	2023-02-23T10:39...	2023-02-23T13:16...	2023-02-23T17:38...	2023-01-21T20:19...
o_clst_err	-74.14	-15.17	-29.11	9.06	-31.42	54.52	-40.72	-40.38	19.09	11.44
o_clst_name	sP	sP	PP	Pdiff	PP	P	sPKIKP	sPdiff	Pdiff	P
o_clst_time	759.15	815.01	821.51	1,025.31	338.62	310.13	1,156.04	957.86	974.33	747.68
oname	Molucca Sea	Guadeloupe regio...	near the east co...	Kermadec islands...	Gorno-Badakhshan...	Gorno-Badakhshan...	Off the coast of...	Jujuy, Argentina	central East Pac...	Molucca Sea
s_amp	20.29	118.27	15.80	23.29	70.88	21.54	21.68	27.13	17.86	14.82
s_rms	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
s_time	2023-01-20T18:03...	2023-01-20T11:37...	2023-01-20T06:02...	2023-01-20T12:58...	2023-02-23T00:43...	2023-02-23T00:59...	2023-02-23T10:43...	2023-02-23T13:17...	2023-02-23T17:37...	2023-01-21T20:19...
sampling_rate	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
starttime	2023-01-20T17:17...	2023-01-20T10:53...	2023-01-20T05:16...	2023-01-20T12:10...	2023-02-23T00:25...	2023-02-23T00:43...	2023-02-23T10:11...	2023-02-23T12:49...	2023-02-23T17:11...	2023-01-21T19:35...
station	D0025	D0025	D0025	D0025	D0025	D0025	D0025	D0025	D0025	D0025
snr_db	-1.56	-6.68	-0.82	1.18	25.39	-13.55	-2.16	1.18	3.45	-0.56

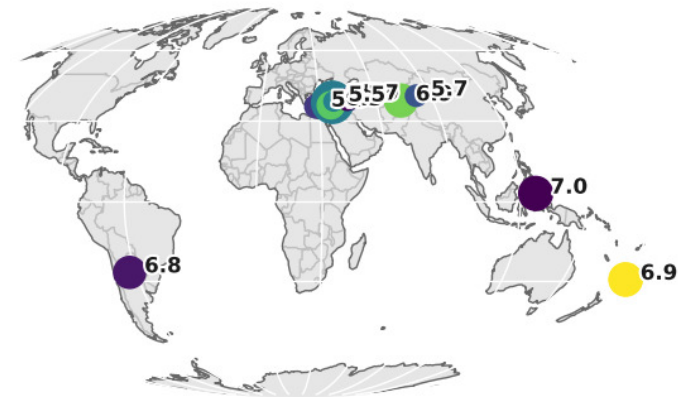


# Анализ: Чувствительность кабеля в грунте



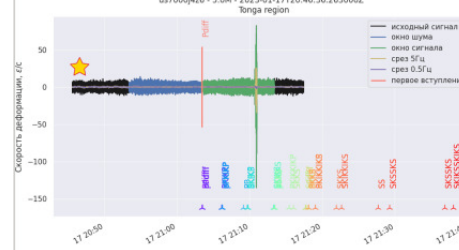
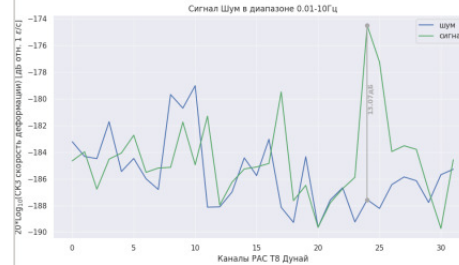
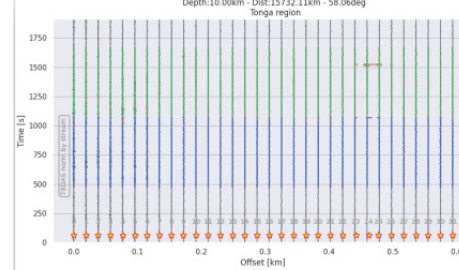
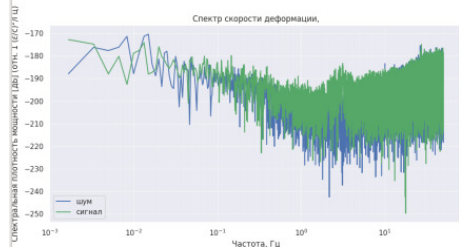
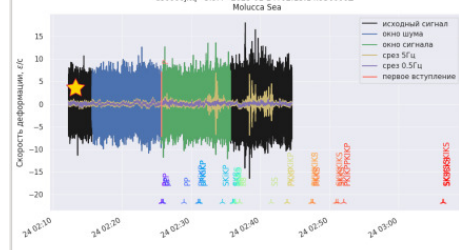
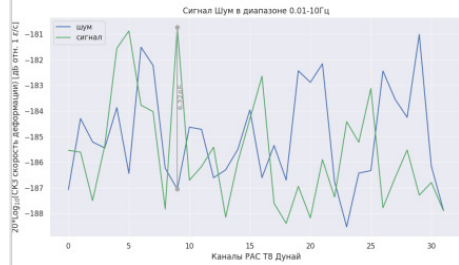
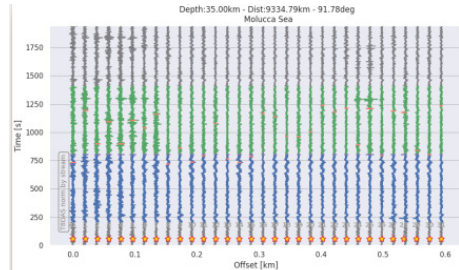
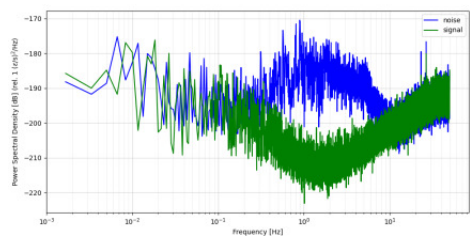
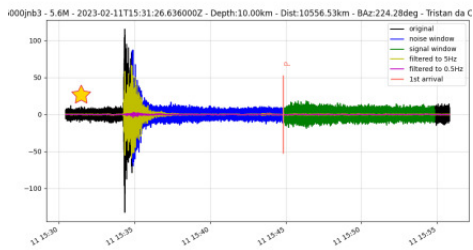
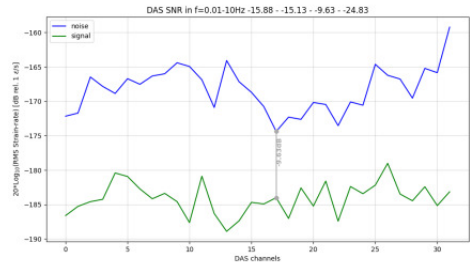
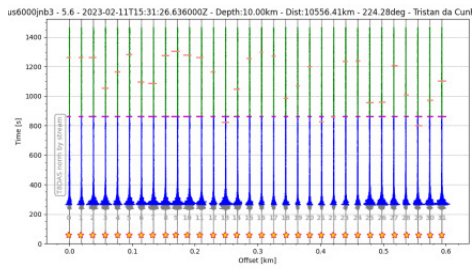
Осталось 19 событий

События с ОСШ > 3дБ, зарегистрированные DAS T8 "Дунай"



25 и 8 каналы  
ОСШ > 3 дБ

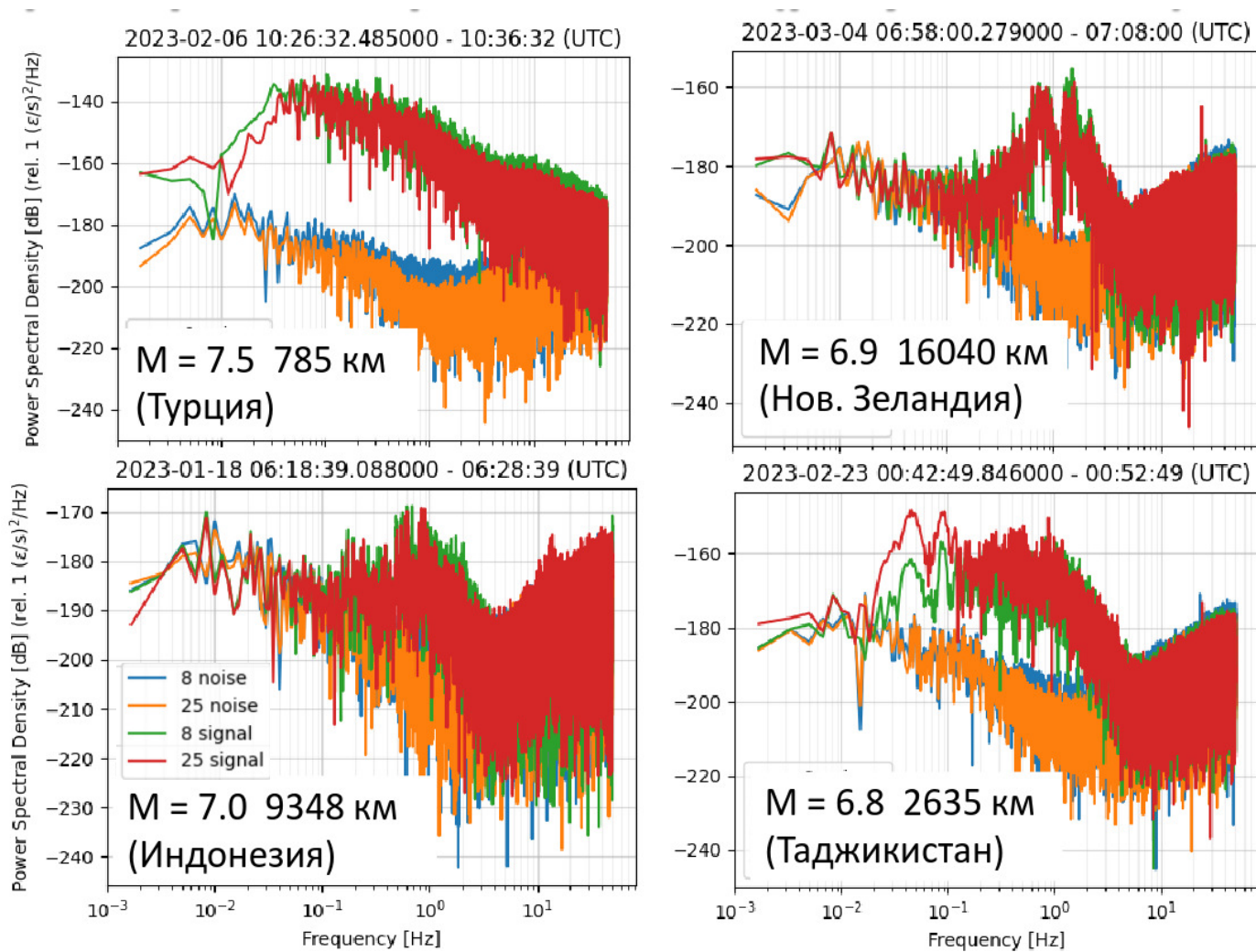
# Анализ: Валидация данных



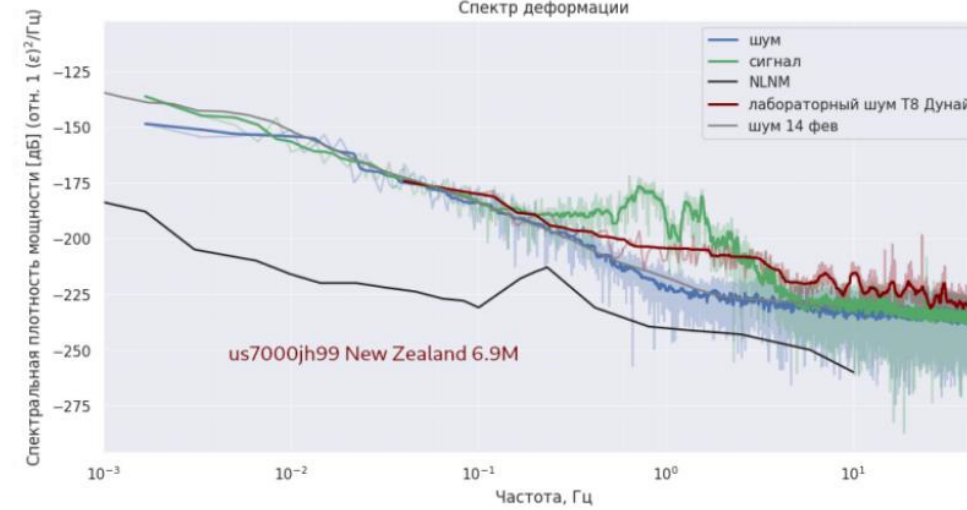
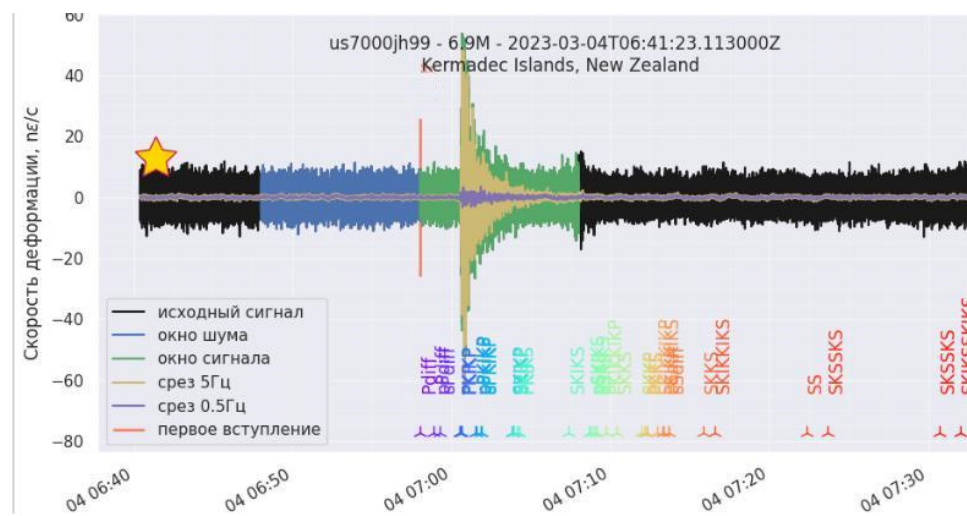
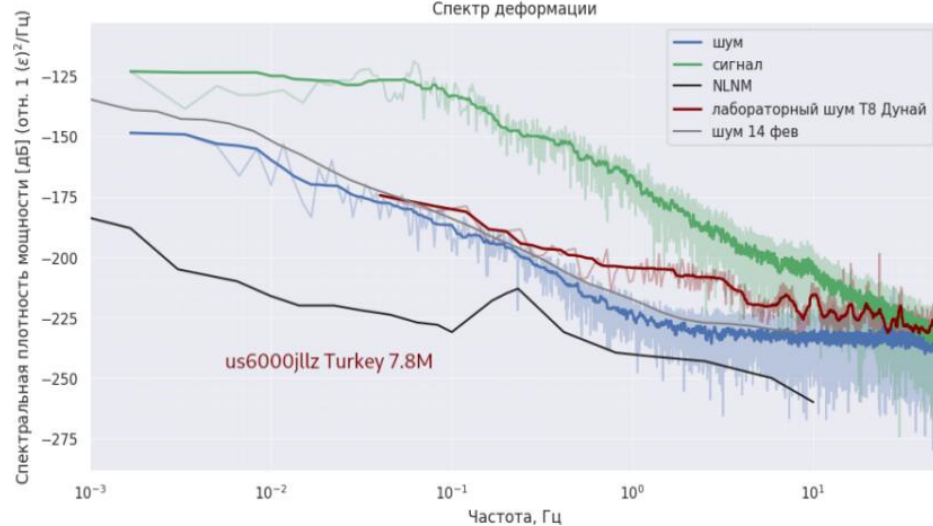
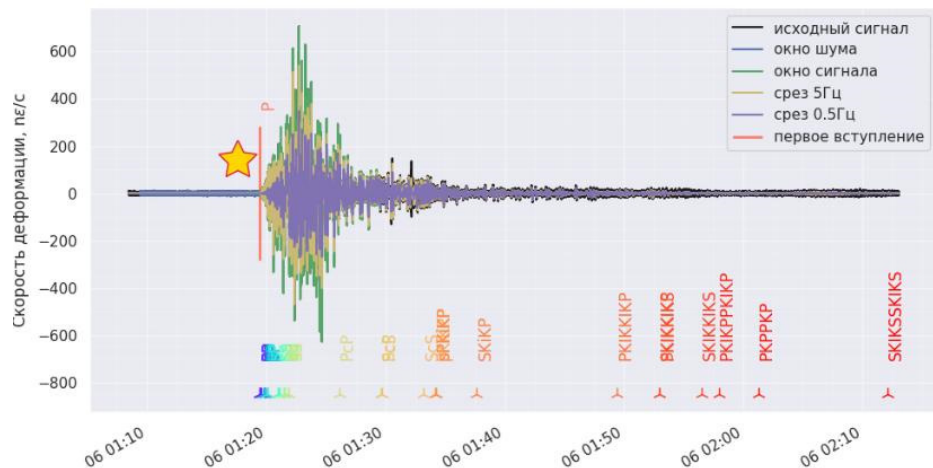
## Факторы возможных ошибок::

- Посторонние локальные воздействия
- смежные события
- неоптимальная длительность окна

# Анализ: Спектральный анализ



# Анализ: Спектральный анализ



# Анализ: Корреляция параметров



За основу взята сейсмологическая модель источника Брюна [23, 24]. В этой модели оценка спектральной амплитуды объемной волны  $\Omega(f)$  на эпицентральном расстоянии  $r_h$  от источника с величиной сейсмического момента  $M_0$  с учетом допустимых упрощений параметров определяется как

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot e^{-\frac{\pi f r_h}{Q\sqrt{V_r V_s}}}, \quad (1)$$

где  $f$  – частота объемной волны,  $f_c$  – частота среза амплитудного спектра объемных волн, взятая здесь равной 0.15 Гц, а  $\Omega_0$  – низкочастотная асимптота амплитудного спектра объемной волны, пропорциональная сейсмическому моменту:

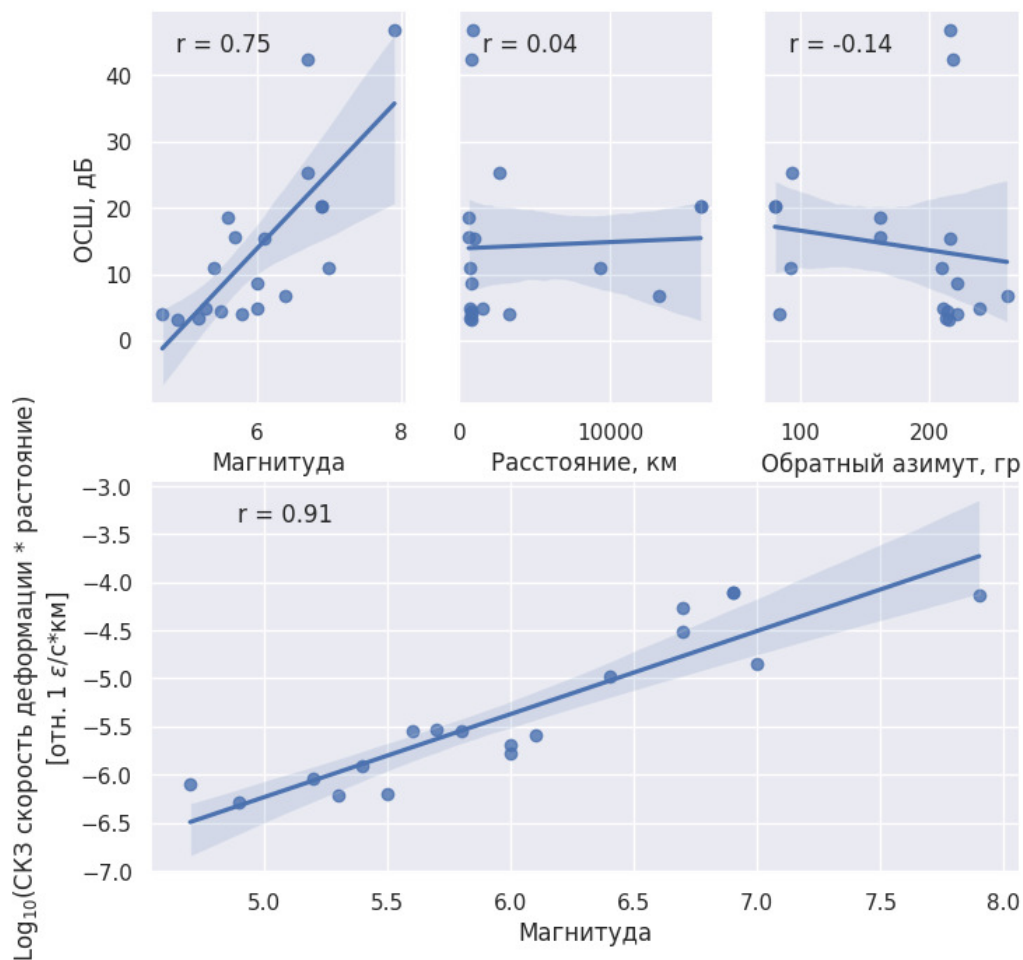
$$\Omega_0 = \frac{F_R S_a}{4\pi\sqrt{\rho_r \rho_s} V_r V_s^3} \left( \frac{M_0}{r_h} \right). \quad (2)$$

Здесь  $V_s$ ,  $V_r$ , и  $\rho_s$ ,  $\rho_r$  – соответственно скорости объемных волн и плотности геологических пород в источнике и приемнике,  $Q$  – добротность среды, характеризующая неупругое затухание волны вдоль пути распространения и взятая для приведенной оценки равной 400, наконец,  $F_R$  и  $S_a$  – два безразмерных параметра, связанных с диаграммой направленности сейсмического излучения и с особенностями размещения приемника сейсмических колебаний на поверхности Земли или на некоторой глубине от нее.

Сейсмическая магнитуда  $M_w$  связана с сейсмическим моментом  $M_0$ , выраженным в Н/м, соотношением [24]

$$M_w = \frac{2}{3}(\lg(M_0) - 9), \quad (3)$$

Регрессионные модели характеристик событий



## Заключение: Выводы



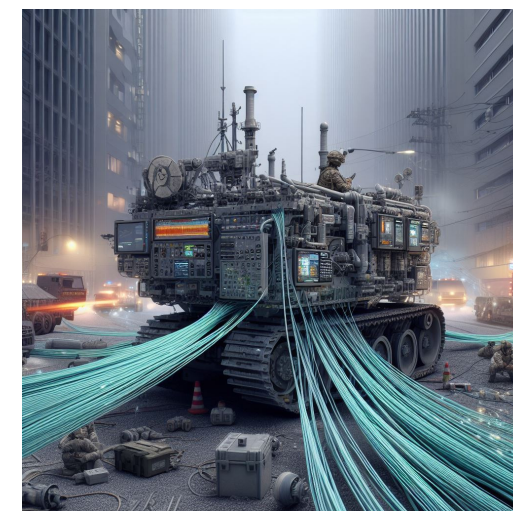
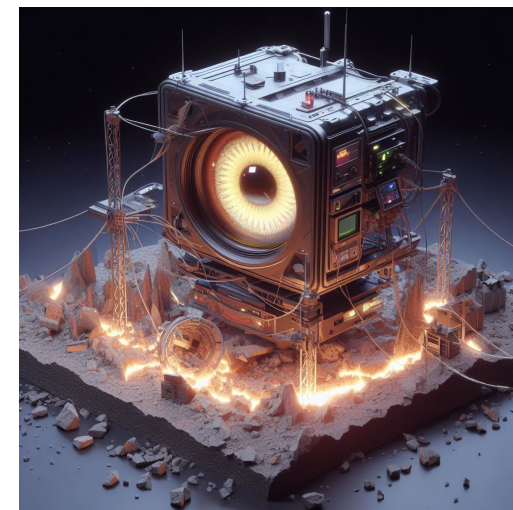
- Теоретическая оценка спектральной амплитуды объёмной волны согласуется с результатами эксперимента
- Широкие возможности привлечения оптоволоконной технологии для решения традиционных задач сейсмического мониторинга
- Сложная зависимость диаграммы направленности для различных типов волн, а также от угла между направлением линейного положения сегмента волокна и направлением прихода сейсмической волны
- Температурные флуктуации вносят значительную погрешность в низкочастотном сейсмическом диапазоне
- Требуется методика оценки качества данных

## Планы и перспективы

- Совершенствование алгоритмов оценки ОСШ
- Выявление других характерных признаков обнаружения первых вступлений
- Сравнение с другими DAS
- Моделирование
- Различные геометрические конфигурации волокна (топология)
- Оценка передаточной характеристики грунт-кабель-волокно
- Разработка методики валидации данных
- Сравнение с классическим сейсмометром
- Алгоритмы обработки сейсмических массивов
- Шумоподавление
- Машинное обучение



# Размышления ИИ на тему оперативного развертывания DAS «Дунай» в зонах регистрации афтершоковой активности





Т8 СЕНСОР | СЕЙСМИКА

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Егор Спиридонов

Ведущий специалист по цифровой обработке сигналов

ООО «Т8 Сенсор», Москва, [spiridonov@t8.ru](mailto:spiridonov@t8.ru),  
<http://www.t8-sensor.ru>

