

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,  
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 550.34; 535.92

**ОПЫТ РЕГИСТРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ  
ЗОНЫ СУБДУКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ АКУСТИЧЕСКИМ  
ЗОНДИРОВАНИЕМ**

**©2026 г. А. А. Шакирова<sup>а,\*</sup>, Д. В. Чебров<sup>а</sup>, И. С. Ладыгин<sup>б</sup>,  
А. Р. Сагирова<sup>б</sup>, Д. А. Коваленко<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Камчатский филиал Федерального исследовательского центра  
“Единая геофизическая служба Российской академии наук”  
Россия, 683023, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9

<sup>б</sup> Отдел оптической сенсорики передовой инженерной школы  
Новосибирского государственного университета  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

\*e-mail: shaki@emsd.ru

Поступила в редакцию 14.10.2025 г.

После доработки 04.12.2025 г.

Принята к публикации 13.01.2026 г.

В сентябре-октябре 2024 г. проведен эксперимент по регистрации землетрясений в Курило-Камчатской зоне субдукции методом распределенного акустического зондирования (DAS). Оптоволоконная система мониторинга представляет собой независимую систему, состоящую из амплитудного оптоволоконного виброакустического датчика и оптоволоконного кабеля. Оптоволоконная линия развернута в здании Института вулканологии и сейсмологии в г. Петропавловск-Камчатский, кабель прочно прикреплен к фундаменту помещения для обеспечения связи с конструкцией здания. Записи землетрясений, полученные методом DAS, сопоставлены с данными сейсмической станции IVS. Для анализа отобраны четыре тектонических землетрясения, произошедших вблизи г. Петропавловск-Камчатский. Показано, что DAS-сигналы сохраняют основные особенности сейсмограмм, что позволяет использовать их в кинематических задачах сейсмологии.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время для решения задач сейсмологии все более популярным становится метод распределенного акустического зондирования (DAS, Distributed Acoustic Sensing) [1–4]. Это достаточно новый геофизический метод, использующий оптоэлектронный прибор с чувствительным элементом – оптоволоконным кабелем длиной до нескольких десятков километров для измерения деформации волокна. В этом приборе деформация эффективно

преобразуется в сейсмический массив. Метод DAS позволяет регистрировать как региональные землетрясения, так и микросейсмичность [5, 6]. В основе работы системы лежит принцип когерентной рефлектометрии, когда в волокно периодически вводятся оптические импульсы. Часть света рассеивается на естественных неоднородностях волокна (центрах рассеивания) и распространяется в обратном направлении. При микродеформациях волокна, вызванных виброакустическими воздействиями, параметры рассеянного сигнала изменяются. Анализируя изменения в интерференционной картине сигнала обратного рассеяния, можно определить место и характер воздействия на волокно. Как правило, оптоволоконный кабель, на котором проводят измерения, закапывается в грунт [4], либо используются существующие волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [7, 8].

Оптоволоконный мониторинг сейсмических воздействий имеет ряд преимуществ [2, 5, 9]. Оптоволоконно в целом представляет собой сейсмический датчик, поэтому реализация такого многоканального сбора сейсмической информации не требует дорогостоящих решений по организации электропитания отдельных каналов, их синхронизации между собой и цифровой телеметрии в точку сбора. DAS позволяет организовывать массив сейсмических пунктов большой протяженности, имеет высокое пространственное разрешение, широкий частотный диапазон, возможность непрерывной работы, нечувствительность оптоволоконного кабеля к электромагнитным полям, широкий температурный диапазон (от  $-60$  до  $250$  °C), работоспособность при высоком давлении (до 180 МПа) и высокую частоту дискретизации сигнала. DAS можно использовать на уже существующих телекоммуникационных ВОЛС, что позволяет быстро разворачивать новую сеть наблюдений с минимальным подключением нового оборудования. Распределенные датчики не требуют электропитания на всей длине линии – питание нужно только в месте установки прибора, что значительно упрощает эксплуатацию на производстве или в трудных условиях.

Оптоволоконные кабели используются в водной среде для мониторинга цунами и землетрясений [10, 11], на суше для мониторинга землетрясений [12], подвижности грунта, лавин и других геофизических воздействий. Также есть примеры использования оптоволоконных кабелей в вертикальном сейсмическом профилировании [13] и в мониторинге скважин [14]. Непрерывный распределенный мониторинг можно использовать в системах раннего предупреждения, так как скорость света в оптическом волоконном кабеле больше, чем скорость сейсмических волн в грунте [15].

В 2023 г. проводился глобальный эксперимент по сейсмомониторингу, основанному на DAS [6]. Эксперимент показал перспективность использования новой технологии для исследований сейсмичности и волновых форм сигналов на телесеизмических расстояниях.

Использование методик DAS для “классического” сейсмического мониторинга имеет ряд недостатков и нерешенных проблем:

- у DAS более высокий уровень шума, чем у обычных широкополосных сейсмометров, в том числе и потому, что условия прокладки кабелей промышленного назначения не включают в себя мероприятия по снижению сейсмических и акустических шумов;
- собственный шум DAS в настоящее время строго не оценивался;
- регистрируется только однокомпонентная осевая деформация оптоволоконна;
- конфигурации прокладки существующих кабелей имеют неоптимальную в смысле приемной системы геометрию;
- трудность оценки амплитуды сигнала приводит к сложностям при оценке магнитуды событий;
- задача оценки механизма землетрясений, по-видимому, не решается на основе данных DAS-мониторинга;
- присутствует дополнительная погрешность (чувствительность к изменениям температуры, влажности, давления, внешних нагрузок, промерзания/оттаивания и т.д.);
- разные участки кабеля имеют разные передаточные функции;
- полные передаточные функции DAS сложны, зависят от толщины волокна, угла падения и частотного состава сигнала;
- отношения сигнал/шум разных участков кабеля разные.

Несмотря на указанные проблемы, технология DAS остается перспективным направлением сейсмического мониторинга, а многие методические вопросы могут быть сняты в ближайшее время.

В Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН начаты эксперименты по использованию технологии DAS на Камчатке в одном из наиболее сейсмически активных регионов России. Разработанные в дальнейшем методики планируется внедрить в Камчатскую региональную систему сейсмологических наблюдений [16] с целью создания сегмента детального мониторинга сейсмических воздействий в пределах населенных пунктов.

## 2. МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ АМПЛИТУДНЫМ ОПТОВОЛОКОННЫМ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ

Оптоволоконная система мониторинга (система DAS) представляет собой независимую систему, состоящую из амплитудного оптоволоконного виброакустического датчика (АОВД) и оптоволоконного кабеля (рис. 1). АОВД был предоставлен передовой инженерной школой Новосибирского государственного университета [17]. АОВД используется для обнаружения механического или акустического воздействия на оптоволоконный кабель, который является

и чувствительным элементом, и способом передачи информации (рассеянного сигнала) обратно в АОВД.

**Рис. 1.** Внешний вид амплитудного оптоволоконного виброакустического датчика

Амплитудный оптоволоконный виброакустический датчик содержит размещенные в общем корпусе оптически последовательно соединенные источник периодической последовательности оптических импульсов, включающий оптически соединенные лазер, акустооптический модулятор и оптический усилитель прямого излучения, спектральный фильтр с источником излучения накачки, оптический интерфейс с тремя выходами, приемник рассеянного излучения с оптическим усилителем рассеянного излучения, и электрически соединенный с акустооптическим модулятором и приемником рассеянного излучения блок обработки с аналого-цифровым преобразователем. При этом амплитудный оптоволоконный виброакустический датчик дополнительно содержит размещенный в звуковиброизолированном корпусе внутри корпуса эталонный оптоволоконный чувствительный элемент заданных параметров, оптически соединенный одной стороной с одним из выходов оптического интерфейса, а другой стороной – с установленным в стенке общего корпуса оптическим соединителем. Принципиальная схема приведена на рис. 2.

**Рис. 2.** Принципиальная схема амплитудного оптоволоконного виброакустического датчика

Работа АОВД представлена на рис. 2, 3, она осуществляется следующим образом. Формируются периодические последовательности оптических импульсов прямоугольной формы при помощи акустооптического модулятора 1 (рис. 2) из непрерывного излучения лазера 2 (рис. 2, 3), которые затем усиливаются в оптическом усилителе 3, объединяются при помощи спектрального фильтра 4 с источником излучения 5 рамановской накачки и поступают на первый выход оптического интерфейса 6, далее через его второй выход излучение поступает в эталонный оптоволоконный чувствительный элемент 7, затем через оптический соединитель 9 во внешний распределенный чувствительный оптоволоконный элемент 11, являющийся основным сенсором для регистрации виброакустических воздействий.

Рассеянное от естественных неоднородностей распределенного чувствительного оптоволоконного элемента 11 и эталонного оптоволоконного чувствительного элемента 7 излучение возвращается на второй выход оптического интерфейса 6 и через третий выход поступает в усилитель 12 рассеянного излучения и далее в приемник 13 рассеянного излучения, где рассеянный акустооптический сигнал превращается в электрический и через аналого-цифровой преобразователь 15 поступает в блок обработки 14.

При этом наличие эталонного оптоволоконного чувствительного элемента 7 позволяет провести базовую калибровку устройства один раз непосредственно после производства ввиду известности его фактических параметров и отсутствия влияния на них различных внешних помех за счет размещения элемента 7 в звукоизолированном коробе 8 (проводимые периодические поверки осуществляют в соответствии с требованиями регламента через промежутки времени, которые фактически являются существенными и абсолютно не связаны с размещением устройства на новом объекте с другими характеристиками внешнего распределенного чувствительного оптоволоконного элемента 11).

Непосредственно перед эксплуатацией с каждым новым внешним чувствительным оптоволоконным элементом 11 (с неизвестными параметрами) донастройка заявляемого устройства при необходимости обеспечивается исключительно программным образом с помощью блока обработки 14 без использования дополнительного специализированного оборудования (например внешних стандартизированных оптических каналов и/или специфичных виброакустических стендов больших габаритов).

### Рис. 3. Принцип работы DAS

Одними из основных характеристик АОВД являются дальность действия (длина чувствительного элемента) и диапазон частот регистрируемых воздействий. Эти характеристики связаны между собой. Пространственное разрешение и шаг дискретизации определяются техническими возможностями приемника рассеянных сигналов и зависят от длительности световых импульсов и частоты дискретизации АЦП соответственно.

Сигналы представляют собой проекцию компоненты тензора деформаций, обусловленную проходящей сейсмической волной, на ось максимальной чувствительности оптоволоконного датчика, т.е. вдоль него. Свет, рассеянный на каждом из участков волокна, поступает обратно на фотоприемник в последовательные моменты времени, так получается пространственно-временная рефлектограмма рассеянного света, далее просто рефлектограмма. Заметные изменения формы рефлектограммы происходят при изменении геометрии волокна на величину, сопоставимую с длиной волны излучения лазера, т. е. на доли микрометра, чем и объясняется высокая чувствительность АОВД.

В испытываемом приборе излучение происходит на длине волны 1550 нм. Из-за обратной линейной зависимости между пространственным разрешением и чувствительностью АОВД в качестве длительности зондирующего импульса взята величина 100 нс, что соответствует приемлемому отношению сигнал/шум и пространственному разрешению 10 м. Частота зондирования составляла 100 Гц, осуществлялось усреднение четырех рефлектограмм, пространственный шаг дискретизации сигнала равен примерно одному метру.

Мониторинг сейсмических колебаний АОВД проводился с 24.09.2024 по 12.10.2024 г. в ходе первого этапа эксперимента по DAS-мониторингу на Камчатке. В испытаниях использован одномодовый кабель, предоставленный ООО “Инкаб”, длиной 200 м со спиралевидным закручиванием, что увеличивает чувствительность волокна к виброакустическим воздействиям [18]. Для первоначальной отладки комплекса оборудования использовалась линия со следующими условиями прокладки: оптоволоконный кабель был растянут в подвальном помещении здания Института вулканологии и сейсмологии (г. Петропавловск-Камчатский) в несколько проходов (рис. 3в) и прочно прикреплен к фундаменту помещения для обеспечения связи с конструкцией здания, точки крепления были расположены через каждый метр. Начальный участок кабеля (от прибора до первой точки монтажа, первые 3 м) протянут свободно. Часть кабеля (со 105 м) свернута в моток и также оставлена в свободном размещении. Для эксперимента планировалось использовать только закрепленные участки кабеля. На практике наилучшие результаты показал участок 55–105 м, вероятно, за счет более надежного крепления к несущим конструкциям здания.

## 2. ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Исходный массив данных с АОВД имеет большой объем. Для его уменьшения и увеличения точности получаемых данных массив данных с АОВД подвергался следующей обработке: проводилось вычисление усредненной по четырем рефлектограммы по следующей формуле:

$$R_t(x)=(R_{t_1}(x)+R_{t_2}(x)+R_{t_3}(x)+R_{t_4}(x))/4.$$

Затем массив данных необходимо было визуализировать для обработки и сравнения. Одним из методов визуализации данных, полученных с помощью виброакустических волоконных датчиков, является построение водопада, каждая точка которого  $(t, x)$  соответствует времени сбора рефлектограммы  $t$  в точке волокна  $x$ . По оси  $X$  откладывается время в секундах от начала измерения, по оси  $Y$  – точка оптоволоконного кабеля в метрах. Для виброакустических волоконных датчиков применяются различные методы для вычисления водопада. Два наиболее распространенных: метод *Diff*, когда для каждой точки водопада вычисляется разница между значением интенсивности рассеянного света в текущий и в предыдущий моменты времени и метод *Average*, когда вычисляется среднее значение интенсивности в точке волокна за все время, а затем вычитается значение интенсивности в текущий момент времени.

## 3. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВОДОПАДА

Метод *Diff*:

в каждой точке  $x$  водопада  $WF(t, x)$  вычислено значение  $R_t(x) - R_{t-\Delta t}(x)$ :

$$WF(t, x) = R_t(x) - R_{t-\Delta t}(x), 0 \leq x \leq L.$$

Метод *Average*:

сначала вычисляется среднее значение в каждой точке  $x$  по всем рефлектограммам  $\bar{R}(x)$ , затем вычисляется разность между средним значением и значением рефлектограммы в момент времени  $t$ :

$$WF(t, x) = \bar{R}(x) - R_t(x), \forall x, t.$$

Здесь введены следующие обозначения:  $L$  – длина подключенного к прибору оптоволоконного кабеля;  $T$  – конечный момент рассматриваемого временного интервала;  $\Delta t$  – разница во времени между двумя последовательно записанными рефлектограммами;  $R_t(x)$  – значение интенсивности рассеянного света (координата  $Y$  рефлектограммы) в момент времени  $t$  в точке  $x$ ;  $\bar{R}(x)$  – среднее значение интенсивности в точке  $x$  за весь рассматриваемый временной интервал;  $WF(t, x), 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq T$  – значение вычисленного водопада в точке  $t, x$ .

Для прямого сравнения измерений волоконно-оптического датчика и сейсмометра выбирается канал DAS с наилучшим отношением сигнал/шум (SNR, signal-to-noise ratio). Здесь под каналом подразумевается фиксированный участок кабеля, которому соответствует массив дискретных точек рассеянного сигнала во времени (различных рефлектограмм). SNR вычислялся следующим способом: пусть  $x_1, \dots, x_n$  – исходный массив данных одного канала (значение интенсивности рассеянного сигнала с участка волокна в разные моменты времени),  $n$  – размер этого массива. Пусть `signal_start` – номер (индекс элемента массива), где началось землетрясение, `signal_end` – номер (индекс элемента массива), где закончилось землетрясение.

Вычисление SNR проводится по формуле

$$SNR \text{ [дБ]} = 10 \lg_{10} \frac{\sqrt{\frac{(x_{\text{signal\_start}}^2 + \dots + x_{\text{signal\_end}}^2)}{N_{\text{signal}}}}}{\sqrt{\frac{(x_1^2 + \dots + x_{\text{signal\_start}}^2)}{N_{\text{noise}}}}},$$

где  $N_{\text{signal}}$  – количество точек в массиве данных, который считается за сигнал ( $x_{\text{signal\_start}}^2, \dots, x_{\text{signal\_end}}^2$ ), т.е.

$$N_{\text{signal}} = \text{signal\_end} - \text{signal\_start} + 1$$

– количество точек в массиве данных, который считается за шум ( $x_1^2, \dots, x_{\text{signal\_start}}^2$ ), т.е.

$$N_{\text{noise}} = \text{signal\_start}.$$

Поскольку в данной работе АОВД амплитудный, для обработки массива данных не использовались ни вейвлет-преобразование, ни эмпирическая, ни вариационная модовая декомпозиция, ни остальные методики, применяемые в фазовых АОВД.

Волоконно-оптические датчики измеряют деформацию, в то время как наиболее распространенные сейсмоприемники измеряют скорость или ускорение колебаний грунта. В первом приближении можно считать, что деформация прямо пропорциональна скорости смещения грунта. Это значит, что DAS-сигналы можно сравнивать с каналами скорости.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольший интерес для нашей экспериментальной установки представляют землетрясения, ощутимые в точке регистрации. Несмотря на то, что на Камчатке каждый год регистрируется около 10000 тектонических землетрясений, лишь некоторые из них производят заметные сотрясения в Петропавловске-Камчатском.

Для анализа отобраны четыре землетрясения, произошедшие за период наблюдений, с магнитудами  $4.6 \leq ML \leq 6.2$  (рис. 4а, табл. 1). Три из них относятся к афтершоковой последовательности Шипунского землетрясения (17.08.2024,  $MW = 7.0$ ,  $\varphi = 52.791^\circ$  с. ш.,  $\lambda = 160.376^\circ$  в. д., глубина 43.3 км) [19], их эпицентральное расстояние составляет около 100–120 км, глубина гипоцентров составляет 16–40 км. Кроме того, добавлено еще одно событие, произошедшее в субдуцирующей океанической плите на глубине 161 км, в 80 км к ССВ от Петропавловска-Камчатского.

**Рис. 4.** Опытная система оптоволоконного мониторинга землетрясений Курило-Камчатской зоны субдукции...

**Таблица 1.** Параметры четырех землетрясений, произошедших в 2024 г. по данным Камчатского регионального каталога землетрясений [20]

№	Дата, дд.мм	Время, чч:мм:сс	Долгота $\lambda$ (в.д.)	Широта $\varphi$ (с.ш.)	Глубина, км	Удаленность от города, км	$ML$	Азимут на источник	Угол падения	Инструментальная интенсивность в пункте IVS	Макросейсмичность, Петропавловск-Камчатский
1	27.09	22:22:49	53.72°	159.17°	161	80	4.6	25°	14°	–	–
2	30.09	12:21:56	52.92°	160.46°	41	100	6.2	96°	85°	4.0	4

3	30.09	23:38:46	52.61°	160.39°	40	100	4.8	111°	100°	0.9	2
4	01.10	10:11:45	52.56°	160.77°	16	120	5.3	110°	99°	1.2	2

Рассмотрим водопады, соответствующие временам землетрясений (рис. 5).

**Рис. 5.** Сейсмические записи четырех землетрясений с Курило-Камчатской зоны субдукции с  $4.6 \leq ML \leq 6.2$  в сентябре – октябре 2024 г. сейсмостанцией IVS (канал ВНЗ) и соответствующие им водопады.

Сопоставление водопадов проводилось с сейсмической записью землетрясения, зарегистрированного широкополосной сейсмической станцией IVS Института вулканологии и сейсмологии (рис. 4б). Каналы скорости были восстановлены по записям акселерометра IVS HN (E,N,Z).

Все четыре отображенные землетрясения отчетливо зарегистрировались оптоволоконной системой. Наиболее ярко сейсмическая запись проявляется на водопадах, построенных разностным методом *Diff* (рис. 5). Для удобства их сопоставления с записью с сейсмостанции по оси *x* водопада отложено время, по оси *y* – расстояние. На рисунке видно, что сейсмический сигнал зафиксирован по длине тестовой оптоволоконной линии неравномерно. Вероятно, высокое соотношение сигнал/шум связано с точками крепления к конструкции здания, а низкое – со свободными участками и макроизгибами. Лучшее соответствие записей DAS записям сейсмического прибора наблюдается для трех землетрясений афтершокового процесса (№ 2–4) (рис. 5б-г). Землетрясение №1, имеющее наименьшую магнитуду и наибольшее гипоцентральное расстояние, записалось менее отчетливо (рис. 5а).

Для дальнейшего анализа выбирался канал DAS с лучшим SNR на выбранном участке кабеля 55–100 м (рис. 6б). Один канал примерно соответствует 1 м кабеля, т. е. условно имеется набор виртуальных датчиков через каждый метр оптоволоконной линии. По результатам анализа записей четырех землетрясений (табл. 1) установлено, что волновая форма, записанная методом DAS, соотносится с каналом скорости записи землетрясения (рис. 6в). Запись DAS имеет канонические признаки сейсмограммы и похожую огибающую сигнала: для всех землетрясений можно наблюдать хорошее, отчетливое вступление *P*-волн; идентифицируются вступления группы *S*-волны; совпадают положения максимумов колебаний; наблюдается плавно затухающая сейсмическая волна. В частности записи не идентичны друг другу, что объясняется существенно различными условиями регистрации (в здании и на отдельно стоящем постаменте).

Полученные результаты подтверждают пригодность АОВД от передовой инженерной школы Новосибирского государственного университета для детектирования землетрясений и других кинематических задач, см. [15, 21, 22].

**Рис. 6.** Регистрация волновых форм от землетрясения №4...

Рассмотрим спектральный состав записей методом DAS землетрясений №№ 1, 2 по сравнению с записями сейсмическим прибором. Записи предварительно профильтрованы физически реализуемым фильтром Баттерворта второго ранга с полосой пропускания (0.5–20) Гц. На рис. 7 нанесены спектры скорости по данным станции IVS и спектры записей DAS, нормированные на максимум. Дополнительно показаны спектры записей DAS для шума (в отсутствие сигнала сейсмического события), нормированные на тот же коэффициент, что и запись землетрясения.

Запись DAS по форме спектра лучше соответствует вертикальному каналу сейсмической станции на частотах до 2–3 Гц (рис. 7). В более высокочастотной области сигнал, записанный методом DAS, показывает более высокий уровень. При этом с ростом магнитуды события (и, соответственно, интенсивности сотрясений) относительный уровень сигнала повышается (№2 на рис. 7). Это может быть связано с более слабым затуханием высокочастотного излучения в конструкциях здания, либо с особенностями передаточной функции мониторинговой системы DAS.

**Рис. 7.** Спектр Фурье четырех землетрясений, зарегистрированных DAS, в сравнении со спектрами скорости движения грунта (по данным сейсмической станции IVS)

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен первый этап эксперимента по организации сейсмического мониторинга на Камчатке с применением методики DAS при размещении волоконно-оптических линий в здании. Постановка данного эксперимента отличается от таковой в большинстве проведенных работ, в которых используются либо свободно проложенные линии (существующие промышленные волоконно-оптические линии связи), либо специально смонтированные закопанные в грунт линии вне зданий и сооружений.

Основной задачей эксперимента была проверка принципиальной возможности использования технологии DAS для задач мониторинга землетрясений Камчатской сейсмофокальной зоны и регистрации сейсмических воздействий на здания и сооружения.

В ходе работы создан макет мониторинговой системы DAS в здании Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и проведена непрерывная запись в течение двух месяцев. За время функционирования комплекса удалось зарегистрировать несколько ощутимых землетрясений, в настоящей работе проанализированы четыре землетрясения.

Установлено, что датчиком DAS уверенно регистрируются землетрясения с различными углами падения на оптоволоконную регистрирующую линию. Этот результат

довольно важен, потому что промышленные оптоволоконные линии, на которых возможно разворачивание системы DAS-мониторинга, прокладываются максимально прямолинейно.

Записи DAS в целом сохраняют важнейшие особенности сейсмограмм. Это дает возможность в случае внедрения подсистемы DAS в систему сейсмических наблюдений использовать эти данные в качестве вспомогательных при локализации сейсмических событий. Несмотря на то, что уровень шума у DAS выше, чем у широкополосной станции, высокое SNR на записи волокна позволяет точно выделять время прибытия *P*-волны с качеством, аналогичным полученному из данных сейсмометра. Однако для разных сейсмических событий наблюдаются разные участки кабеля с лучшими значениями SNR, что усложняет обработку сигнала в автоматическом режиме.

Обнаружено сходство в спектральном составе записей DAS со скоростью грунта, зарегистрированного близлежащим сейсмометром. Запись DAS по форме спектра лучше соответствует вертикальному каналу сейсмической станции на частотах до 2–3 Гц. Дальнейший спектральный анализ записей DAS может позволить выводить величины событий аналогично сейсмометрам даже при невозможности калибровки абсолютной реакции кабеля на движение грунта из-за неизвестных параметров связи волокна с грунтом.

Важную роль в качестве получаемых данных DAS играет прокладка кабеля. Наш анализ показал, что кабель, прочно закрепленный на фундаменте, адекватно передает спектральный состав записанных землетрясений. Из этого можно сделать вывод о том, что закапывание волоконно-оптического кабеля в грунт может быть нецелесообразным в связи с тем, что деформация внешней оболочки кабеля может искажать фактическую деформацию.

Поскольку значительная часть оптоволоконных линий проложена в населенной местности, целесообразно попробовать решить задачи оценки сейсмических воздействий на основе DAS-мониторинга.

Несмотря на очевидные трудности в анализе полученных данных DAS и сопоставлении их с данными сейсмометра, наши исследования показывают, что для получения информации, необходимой для локализации землетрясений, можно использовать амплитудные оптоволоконные виброакустические датчики, подключенные к существующим волоконно-оптическим линиям, либо создавать линии, прочно прикрепляя кабель к элементам зданий и сооружений. Вопрос о возможности оперативной оценки сейсмических воздействий по-прежнему остается открытым, поскольку зависимость амплитуды DAS-сигнала от амплитуды сейсмического сигнала слишком сложна и связана с углом падения сейсмической волны, конфигурацией укладки оптоволоконного кабеля и др.

Можно обозначить основные дальнейшие направления в применении технологии DAS для решения сейсмологических задач:

- необходимость метрологической стандартизации, в том числе разработки методов калибровки DAS по традиционным сейсмометрам с возможностью совместной работы;
- необходимость корректных измерений истинных амплитуд движения грунта;
- решение ряда проблем, связанных с архивированием и анализом большого объема данных, так как сбор данных происходит с относительно высокой частотой дискретизации в течение длительных периодов времени.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № 075-00604-25 с использованием данных с УНУ (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

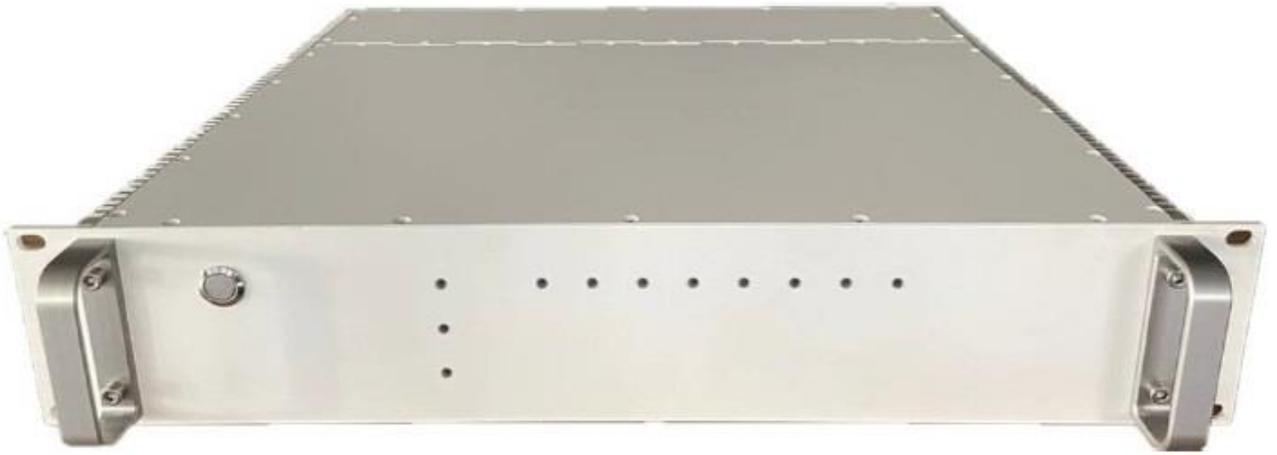
1. *Farghal N.S., Saunders J.K., Parker G.A.* // Bull. Seismol. Soc. Am. 2022. V. 112. № 3. P. 1416. <https://doi.org/10.1785/0120210214>
2. *Fernández-Ruiz M.R., Soto M.A., Williams E.F. et al.* // Apl. Photonics. 2020. V. 5. № 3. P. 1. <https://doi.org/10.1063/1.5139602>
3. *Lindsey N.J., Martin E.R.* // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2021. V. 49. № 1. P. 309. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-072420-065213>
4. *Mjehovich J., Jin G., Martin E.R., Shragge J.* // J. Geotech. Geoenviron. Eng. 2023. V. 149. № 5. P. 04023027. <https://doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-10896>
5. *Кислов К.В., Гравиров В.В.* // Наука и технологические разработки. 2023. Т. 102. № 4. С. 4. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60237681>
6. *Спиридонов Е.П., Наний О.Е., Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Трещиков В.Н.* // Наука и технологические разработки. 2023. Т. 102. № 4. С. 75. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60237694>
7. *Li Z.* // Earthquake Sci. 2021. V. 34. № 2. P. 177. <https://doi.org/10.29382/eqs-2021-0011>
8. *Shinohara M., Yamada T., Akihara T., Mochizuki K., Sakai S.I.* // Front. Mar. Sci. 2022. V. 9. P. 1. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.844506>
9. *Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M.* // First Break. 2014. V. 32. № 2. P. 61. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034>
10. *Горшков Б.Г., Ильинский Д.А., Симикин Д.Е., Таранов М.А.* // Наука и технологические разработки. 2023. Т. 102. № 4. С. 38. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60237690>

11. *Stolyarov V.E., Chernikov A.D., Eremin N.A., Abramov A.V.* Application of fiber-optic technologies for seismic monitoring of offshore oil and gas fields. // Proc. IV International Geological and Geophysical Conference and Exhibition “GeoEurasia-2021”. Tver: LLC PoliPRESS. 2021. V. II. P. 92.
12. *Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Simikin D.E., Taranov M.A., Zhukov K.M., Potapov V.T.* // Sensors. 2022. № 22. P. 9482. <https://doi.org/10.3390/s22239482>
13. *Шнеерсон М.Б.* // Экспозиция Нефть Газ. 2017. № 1. С. 23. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28774834>
14. *Чугаев А.В., Кузнецов А.И.* // ПТЭ. 2023. № 5. С.167. <https://doi.org/10.31857/S0032816223050087> [Chugaev A.V. Kuznetsov A.I. // ИЕТ. 2023. № 5. P. 868. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050081>]
15. *Zhai Q., Yin J., Yang Y., Atterholt J.W., Li J., Husker A., Zhan Z.* // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2025. V. 130. Iss. 4. P. 1. <https://doi.org/10.1029/2024JB030288>
16. *Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Яцук В.В.* // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>
17. *Коваленко Д.А., Ладыгин И.С.* РФ Патент 235247, 2025.
18. *Rafi M., Mohd Noh K.A., Abdul Latiff A.H., Otchere D.A., Tackie-Otoo B.N., Putra A.D., Riyadi Z.A., Asfha D.T.* // Appl. Sci. 2024. V. 14. № 13. P. 5560. <https://doi.org/10.3390/app14135560>
19. *Конвисар А.М., Тимошкина Е.П., Тутков Н.Н., Михайлов В.О., Волкова М.С., Смирнов В.Б., Чебров Д.В.* // Вестник КАУНЦ. Науки о Земле. 2025. № 1. № 65. С. 18. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-1-65-18-27>
20. *Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В.* // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66–91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
21. *Bozzi E., Piana Agostinetti P., Fichtner A. et al.* // Geophys. J. Int. 2024. V. 239. № 3. P. 1928. <https://doi.org/10.1093/gji/ggae364>
22. *Yin J., Zhu W., Li J. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2023. V. 50. № 10. P. 1. <https://doi.org/10.1029/2023GL103045>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Внешний вид амплитудного оптоволоконного виброакустического датчика.
- Рис. 2.** Принципиальная схема амплитудного оптоволоконного виброакустического датчика: 1 – акустооптический модулятор, 2 – лазер, 3 – оптический усилитель прямого излучения, 4 – спектральный фильтр, 5 – источник излучения накачки, 6 – оптический интерфейс с тремя выходами, 7 – эталонный оптоволоконный чувствительный элемент, 8 – звуковиброизолированный короб, 9 – оптический соединитель, 10 – корпус прибора, 11 – распределенный чувствительный оптоволоконный элемент, 12 – усилитель рассеянного излучения, 13 – приемник рассеянного излучения, 14 – блок обработки, 15 – аналого-цифровой преобразователь [22].
- Рис. 3.** Принцип работы DAS.
- Рис. 4.** Опытная система оптоволоконного мониторинга землетрясений Курило-Камчатской зоны субдукции: **а** – эпицентры землетрясений, записанных DAS, относительно г. П-Камчатский, землетрясения – красные кружки; **б** – местоположение размещения оптоволоконной системы мониторинга: желтый квадрат – пристройка к зданию Института вулканологии и сейсмологии, IVS – широкополосная сейсмическая станция Института вулканологии и сейсмологии; **в** – схема прокладки оптоволоконного кабеля, стрелками указано направление, прямоугольник – виброакустический датчик.
- Рис. 5.** Сейсмические записи четырех землетрясений Курило-Камчатской зоны субдукции с  $4.6 \leq M_L \leq 6.2$  с сентября по октябрь 2024 г. сейсмостанцией IVS (канал ВНЗ) (**б, г, е, з**) и соответствующие им водопады (**а, в, д, ж**). Красным цветом обозначены максимальные положительные (по знаку) изменения, синим – максимальные отрицательные, серым цветом обозначены области, в которых изменения незначительны. Красная вертикальная линия – время вступления *P*-волны на канале ВНЗ и момент начала значительных деформаций волокна.
- Рис. 6.** Регистрация волновых форм от землетрясения №4: **а** – водопад DAS с записью землетрясения, **б** – SNR волоконно-оптической линии с выбранным для анализа участком кабеля (желтый прямоугольник, точка соответствует лучшему SNR); **в** – сигнал, зарегистрированный на сейсмостанции IVS (каналы скорости движения грунта), в сравнении с сигналом, зарегистрированным виброакустическим датчиком на канале с лучшим SNR.

**Рис. 7.** Спектр Фурье двух землетрясений и шума, зарегистрированных методом DAS, в сравнении со спектрами скорости движения грунта и шума (по данным сейсмической станции IVS).



**Рис. 1.**

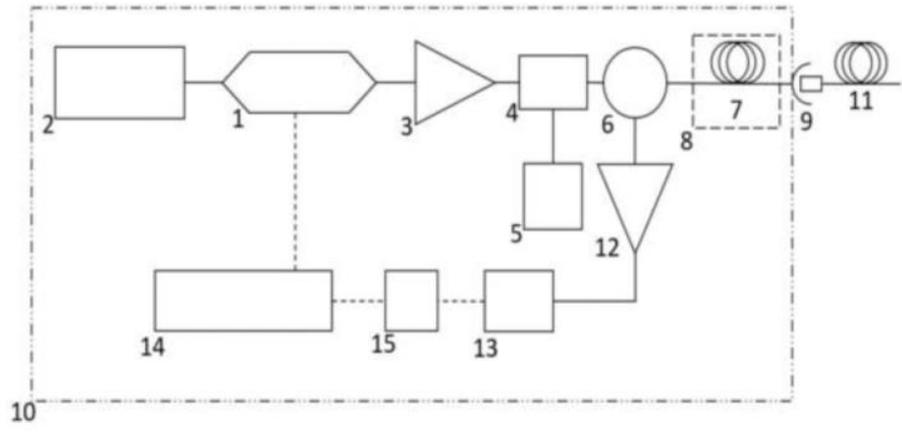


Рис. 2.

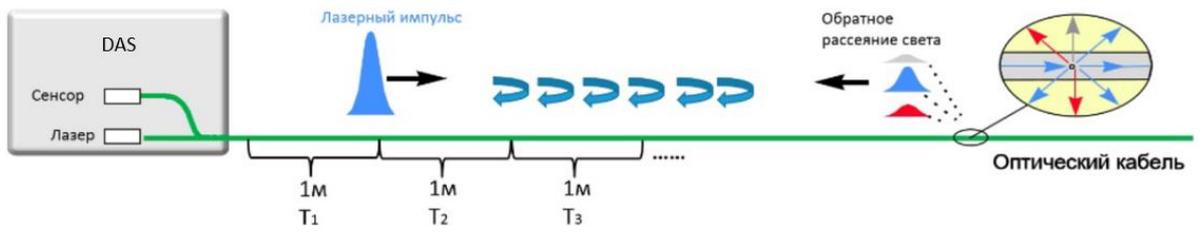


Рис. 3.

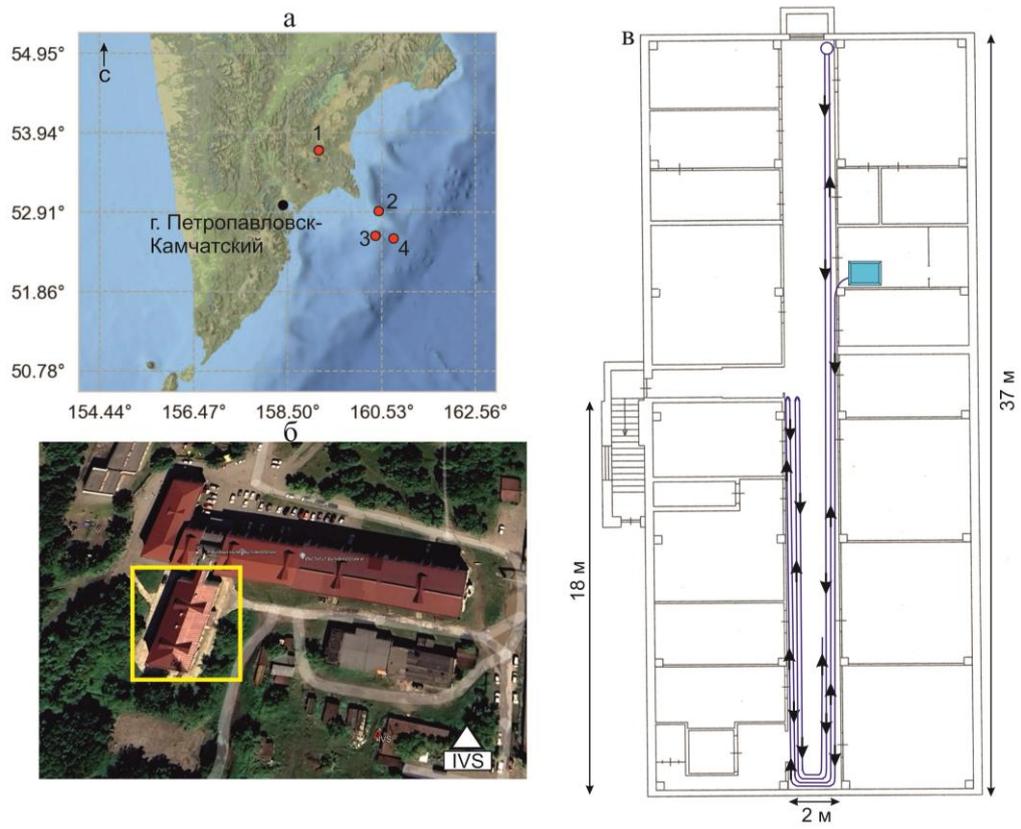


Рис. 4.

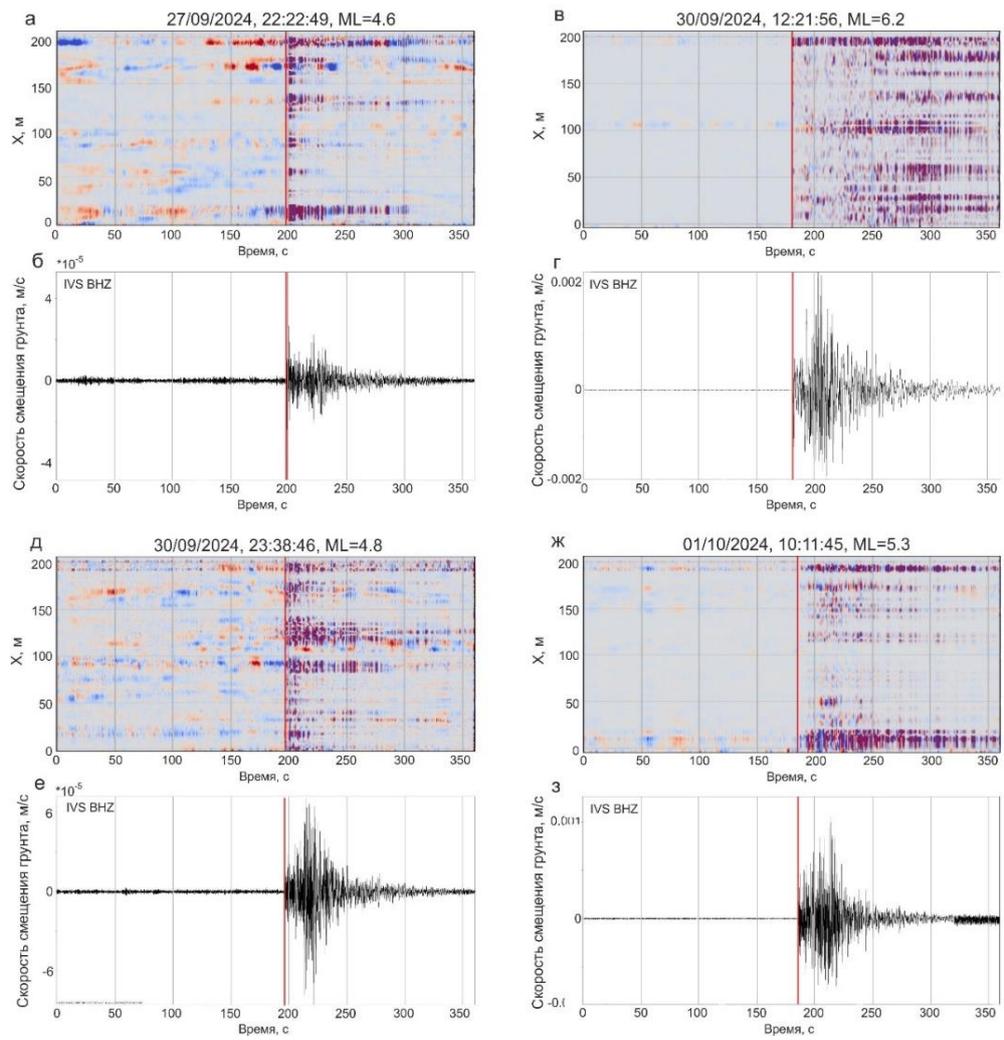


Рис. 5.

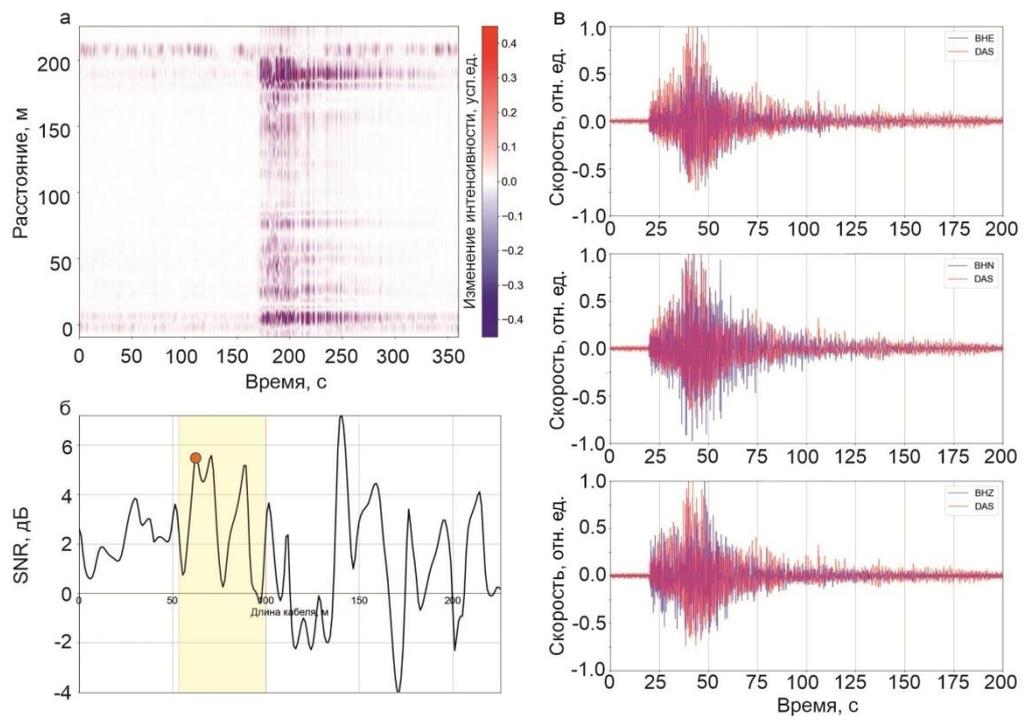
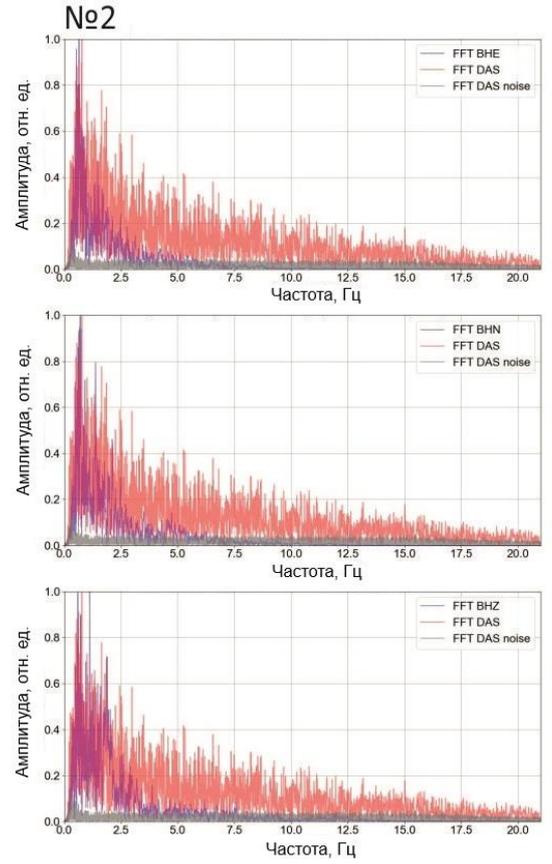
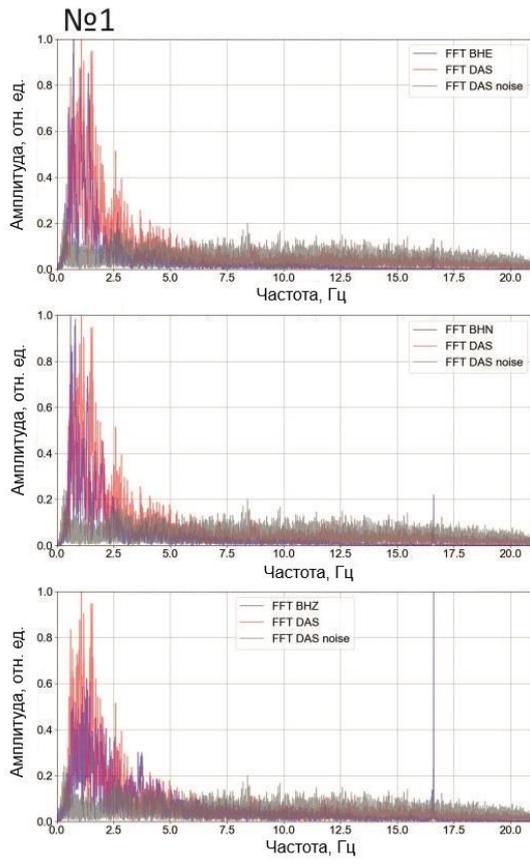


Рис. 6.



**Рис. 7.**