

## ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-223-231

УДК 681.787

### Исследование влияния ограничений динамического диапазона волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы на качество регистрируемых сейсмограмм

Алина Николаевна Аржаненкова<sup>1</sup>✉, Михаил Юрьевич Плотников<sup>2</sup>,  
 Георгий Петрович Мирошниченко<sup>3</sup>, Павел Юрьевич Дмитращенко<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> [11arzh11@gmail.com](mailto:11arzh11@gmail.com)✉, <https://orcid.org/0000-0003-4869-2838>

<sup>2</sup> [plotnikov-michael@yandex.ru](mailto:plotnikov-michael@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

<sup>3</sup> [gpmirosh@gmail.com](mailto:gpmirosh@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-4265-8818>

<sup>4</sup> [pdmitrashchenko@itmo.ru](mailto:pdmitrashchenko@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9250-4286>

#### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлены результаты оценки влияния ограничений динамического диапазона схемы обработки сигналов волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы на качество получаемых сейсмограмм. В отличие от существующих гидроакустических систем на пьезокерамических преобразователях, ограничения динамического диапазона в волоконно-оптической буксируемой косе приводят не к клипированию акустических сигналов, а к сложным нелинейным искажениям. Такие искажения оказывают влияние как на амплитудно-частотные, так и на фазочастотные характеристики регистрируемых сигналов. Основной задачей представленной работы является оценка искажений сейсмограмм, получаемых из акустических сигналов, регистрируемых в условиях ограничения динамического диапазона волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы. **Метод.** Для решения поставленной задачи использованы сейсмические сигналы, полученные во время натурных испытаний различных типов сейсмических кос в акватории Кольского залива. Акустические сигналы, зарегистрированные в виде цифровых отсчетов, пересчитаны в радианы с учетом известного коэффициента чувствительности гидрофонов буксируемой сейсмической косы и преобразованы в цифровые отчеты оптических интерференционных сигналов. Интерференционные сигналы в цифровом виде эквивалентны реальным оптическим сигналам, регистрируемым приемным трактом в блоке обработки сигналов волоконно-оптической косы. Цифровая форма зарегистрированных акустических сигналов позволяет усилить их за счет умножения на заданный коэффициент усиления, имитируя различные уровни энергии акустического источника. Полученные сигналы обработаны с применением специальной математической модели, с учетом фундаментального ограничения динамического диапазона. Эти ограничения обусловлены конечной частотой дискретизации интерференционного сигнала, фиксированной частотой вспомогательной фазовой модуляции и конечной полосой пропускания используемых фильтров низких частот. Выполнено моделирование процесса регистрации акустических сигналов волоконно-оптической буксируемой сейсмической косой без искажений и в условиях ограничения динамического диапазона. Сигналы с выхода модели использованы для построения сейсмограмм одного и того же участка шельфа с разными уровнями акустического усиления с применением метода отраженных волн. **Основные результаты.** Полученные результаты показали, что ограничения динамического диапазона схемы обработки сигналов волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы оказывают существенное влияние на качество сейсмограмм. Происходит снижение детализации сигналов, а также уменьшение более чем в 5 раз амплитуды регистрируемых волн. Показано, что значительно снижается качество сейсмограмм в областях резкого перехода между слоями с различной плотностью, дающими наиболее отчетливые и сильные отраженные сейсмические колебания. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют оценить влияние сложных нелинейных искажений акустических сигналов на получаемые сейсмограммы в условиях ограничения динамического диапазона схемы обработки сигналов. Актуальность работы обусловлена отсутствием мировых аналогов разрабатываемой волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы. Построенная модель тракта обработки сигналов позволяет по известной чувствительности волоконно-оптических гидрофонов косы выбирать оптимальную энергию акустического источника для

проведения сейсмической разведки с максимально эффективным использованием динамического диапазона волоконно-оптической косы.

#### Ключевые слова

волоконно-оптическая коса, сейсмоакустические исследования, интерферометрические измерения, динамический диапазон, метод отраженных волн, общая глубинная точка

#### Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»).

**Ссылка для цитирования:** Аржаненкова А.Н., Плотников М.Ю., Мирошниченко Г.П., Дмитращенко П.Ю. Исследование влияния ограничений динамического диапазона волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы на качество регистрируемых сейсмограмм // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 2. С. 223–231. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-223-231

## Investigation of the dynamic range restrictions influence of the fiber-optic towed seismic streamer on the seismogram quality

Alina N. Arzhanenkova<sup>1</sup>✉, Michael Yu. Plotnikov<sup>2</sup>, George P. Miroshnichenko<sup>3</sup>, Pavel Yu. Dmitraschenko<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> 11arzh11@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-4869-2838>

<sup>2</sup> plotnikov-michael@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>

<sup>3</sup> gpmirosh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4265-8818>

<sup>4</sup> pdmitrashchenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9250-4286>

#### Abstract

In this paper, we presented results of influence of the dynamic range in fiber-optic streamer signal processing circuit on the quality of recorded seismograms. By contrast with the existing hydroacoustic systems, which based on piezoceramic transducers, dynamic range limitations in a fiber-optic towed streamer do not lead to clipping of acoustic signals, but to complex nonlinear distortions that affect both the amplitude and phase frequency characteristics of the recorded signals. Therefore, main task of this work is to assess the distortion of seismograms obtained from acoustic signals recorded under limited dynamic range conditions of fiber-optic towed seismic streamer. To solve this problem, seismic signals obtained during field tests for various types of seismic streamers in the water area of Kola Bay are used. The recorded acoustic signals in the form of digital readings, converted into radians, taking into account the known sensitivity coefficient of hydrophones of the towed seismic streamer, are converted into digital reports of optical interference signals. Interference signals in digital form are equivalent to real optical signals recorded by the receiving path in the signal processing unit of the fiber optic streamer. The digital form of the recorded acoustic signals makes it possible to amplify them by multiplying them by a given gain factor, simulating various energy levels of an acoustic source. Further, these signals served as input data in the mathematical model of the signal processing circuit of the fiber-optic towed streamer, which takes into account the fundamental limitations of the dynamic range due to the finite sampling frequency of the interference signal, the fixed frequency of the auxiliary phase modulation, and the finite bandwidth of the low-pass filters used. Thus, it is possible to simulate the process of recording acoustic signals of a fiber-optic towed seismic streamer both without distortion and under conditions of limited dynamic range. As a result, signals from the output of the processing circuit model are used to construct seismograms of the same shelf area with different levels of acoustic amplification using the reflected wave method. The results demonstrate that the limitations of the dynamic range of signal processing circuit of fiber-optic towed seismic streamer have a significant impact on the quality of seismograms, on reducing the signals detailing, and also on decreasing the amplitudes of the recorded waves (in the presented data, the amplitude decreases by 5 times). The quality of seismograms drops significantly in areas of sharp transition between layers with different densities, which generate the most distinct and strong reflected seismic vibrations. The results obtained are of great practical importance, since they allow evaluating the effect of complex nonlinear distortions of acoustic signals under the conditions of limited dynamic range of the signal processing circuit of a fiber-optic towed seismic streamer on the received seismograms. These results are presented for the first time due to the lack of world analogues of the developed fiber-optic towed seismic streamer. In addition, taking into account the known sensitivity of the fiber-optic hydrophones of the streamer, the constructed model of the signal processing path allows choosing the optimal energy of the acoustic source for seismic exploration with the most efficient use of the dynamic range of the fiber-optic streamer.

#### Keywords

fiber-optic streamer, seismoacoustic research, interferometric measurements, dynamic range, reflected wave method, common depth point

#### Acknowledgements

This work was done in ITMO University and was financially supported by the Government of the Russian Federation (The Federal academic leadership program “Priority 2030”).

**For citation:** Arzhanenkova A.N., Plotnikov M.Yu., Miroshnichenko G.P., Dmitraschenko P.Yu. Investigation of the dynamic range restrictions influence of the fiber-optic towed seismic streamer on the seismogram quality. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 223–231 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-223-231

## Введение

В настоящее время волоконно-оптические технологии находят все большее применение в гидроакустических системах различного назначения: буксируемых гидроакустических антеннах [1, 2], системах охраны акваторий морских портов [3–5] и донных сейсмических косах [6–10]. Применение волоконно-оптических технологий в области гидроакустики обусловлено рядом преимуществ, которыми обладают волоконно-оптические датчики по сравнению с традиционными пьезокерамическими гидроакустическими преобразователями. Среди преимуществ выделяют высокую чувствительность, легкость в мультиплексировании, полную электрическую пассивность, отсутствие электрического питания для чувствительных элементов, небольшие вес и размеры, а также устойчивость к электромагнитным помехам [11–13].

В Университете ИТМО совместно с АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» и при участии АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» ведутся работы по созданию волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы (ВОК) для проведения инженерных изысканий [13]. Основные задачи проекта: разработка буксируемой сейсмической косы отечественного производства, построенной по современным волоконно-оптическим технологиям; повышение качества регистрируемых сейсмических данных за счет улучшения технических характеристик разрабатываемой буксируемой сейсмической косы по сравнению с известными зарубежными аналогами.

Разработанная в настоящей работе ВОК построена на разбалансированных интерферометрах Майкельсона. При воздействии акустических сигналов на чувствительные плечи интерферометра получено изменение оптических разностей хода интерферометрическим методом. Используя временное мультиплексирование волоконных интерферометров [14, 15], созданы группы чувствительных волоконно-оптических гидрофонов, размещенных на одном оптическом волокне в единой кабельной конструкции косы.

Регистрация сигналов с волоконно-оптических интерферометров основана на использовании вспомогательной фазовой модуляции интерференционных сигналов. Для этого в оптическую схему установлен фазовый модулятор, который осуществляет дополнительное периодическое изменение разности длин плеч интерферометров с фиксированной частотой модуляции [16, 17].

Несмотря на большое разнообразие существующих алгоритмов обработки оптических сигналов [17–24], их можно охарактеризовать общими параметрами: частотой опроса волоконно-оптических интерферометров; частотой вспомогательной фазовой модуляции; полосой пропускания используемых фильтров низких частот, выделяющих квадратурные компоненты интерференционных сигналов. Известно, что конечные частота опроса датчиков и полоса пропускания фильтров низких частот напрямую влияют на верхнюю границу динамического диапазона измерительной системы [25]. Возникающие при этом ограничения искажают демодулированные фазовые сигналы при

сильном акустическом воздействии на интерферометр [25]. Этот эффект приводит к некорректной регистрации акустических сигналов с большой амплитудой и, в случае с рассматриваемой ВОК, к искажению получаемых сейсмограмм. Таким образом, исследование влияния ограничений динамического диапазона схемы обработки сигналов ВОК на качество регистрируемых сейсмограмм является актуальной задачей.

## Ограничения динамического диапазона в волоконно-оптической буксируемой сейсмической косе

Чувствительные волоконно-оптические интерферометры располагаются в едином грузонесущем кабеле буксируемой сейсмической косы группами по 8 каналов [14, 26].

Общее число волоконно-оптических гидрофонов в рассматриваемой буксируемой косе составляет 96 штук с расстоянием между центрами гидрофонов — 1,56 м, что удовлетворяет современным мировым стандартам в области инженерной сейсморазведки.

Для реализации временного мультиплексирования волоконно-оптических гидрофонов источник оптического излучения работает в импульсном режиме оптического излучения. В качестве источника излучения используется полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) [27] с центральной длиной волны 1550 нм. Оптические импульсы от источника излучения длительностью 10 нс и периодом следования 500 нс, последовательно попадают на все волоконно-оптические гидрофоны косы, формируя оптический импульсный отклик с каждого интерферометра [27]. В результате на фотоприемник (ФП) с каждого волоконно-оптического интерферометра (гидрофона) приходят интерференционные оптические импульсы, содержащие информацию об акустическом воздействии на чувствительное плечо интерферометра. Эти оптические импульсы независимо оцифровываются с помощью быстродействующего аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и попадают в цифровой форме в программируемую логическую интегральную схему, установленную на плате обработки сигналов.

Обработка интерференционных сигналов выполняется с помощью метода гомодинной демодуляции [18, 19]. Демодуляция интерференционного сигнала с каждого интерферометра состоит в последовательном выполнении математических операций согласно схеме, представленной на рис. 1, где введены обозначения: ОГ — опорный генератор, ФНЧ — фильтр низких частот, X/Y — операция деления, atan — операция вычисления значений функции арктангенса, БДФ — блок доворачивания фазы, ФВЧ — фильтр высоких частот.

Интерференционный сигнал с каждого волоконно-оптического гидрофона сэмплирован с частотой 2 МГц и определяется согласно выражению [27]:

$$I(t) = A + B \cos [C \cos(\omega_0 t) + \varphi(t)], \quad (1)$$

где  $A$  и  $B$  — константы, определяемые интенсивностью и видностью оптического излучения;  $C$  и  $\omega_0$  — глубина

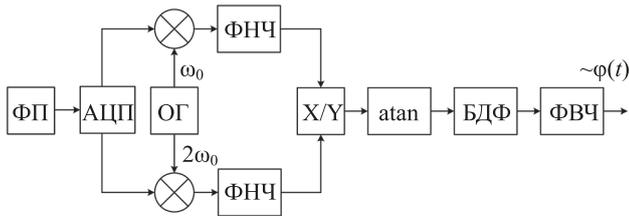


Рис. 1. Схема гомодинной демодуляции

Fig. 1. PGC (phase generated carrier)-method scheme

и циклическая частота вспомогательной фазовой модуляции;  $\varphi(t)$  — измеряемый фазовый сигнал.

После аналого-цифрового преобразования интерференционный сигнал умножается на сигналы с ОГ, после чего проходит через ФНЧ с фиксированной полосой пропускания, равной половине частоты вспомогательной фазовой модуляции. В результате сигнал на выходе блока деления принимает вид [28]:

$$S_{\text{div}}(t) = \frac{-BJ_1(C)\sin(\varphi(t))}{-BJ_2(C)\cos(\varphi(t))} = \frac{J_1(C)}{J_2(C)}\text{tg}(\varphi(t)),$$

где  $J_1(C)$  и  $J_2(C)$  — функции Бесселя первого и второго порядка от глубины фазовой модуляции  $C$ .

В ходе работы схемы гомодинной демодуляции глубина модуляции  $C$  в сигналах интерферометров сравнивается с величиной 2,63 рад [28], при которой  $J_1(C) = J_2(C)$ . Таким образом, после вычисления значения функции арктангенса и операции разворачивания фазы [28], сигнал принимает следующий вид:

$$S_{\text{atan}}(t) = \arctg\left(\frac{J_1(C)}{J_2(C)}\text{tg}(\varphi(t))\right) = \varphi(t).$$

Известно, что в используемой схеме демодуляции ограничения частоты дискретизации интерференционного сигнала, а также конечная полоса пропускания используемых ФНЧ, приводят к ограничениям динамического диапазона схемы обработки сигналов. Указанное ограничение имеет нелинейный характер, и при превышении динамического диапазона в регистрируемом сигнале наблюдаются амплитудные искажения, которые не позволяют корректно оценить величину

регистрируемых акустических колебаний [24]. Общий характер ограничений динамического диапазона продемонстрирован на рис. 2.

На рис. 2, *a* представлена оценка динамического диапазона рассматриваемой схемы демодуляции в зависимости от частоты [29]. Видно, что верхняя граница динамического диапазона схемы обратно пропорциональна частоте измеряемого сигнала. При превышении этой границы наблюдается уменьшение амплитуды демодулированного сигнала, т. е. амплитудная характеристика схемы демодуляции нелинейна и зависит от частоты измеряемого воздействия ( $f_{\text{sig}}$ ) [24, 30] (рис. 2, *b*).

Эксплуатация ВОК предполагает использование мощных специализированных источников сейсмических сигналов для обеспечения большой проникающей способности акустических волн в придонные слои шельфа. В связи с этим возникает необходимость оценки искажения регистрируемых акустических сигналов в схеме обработки и результирующих сейсмограмм.

### Методика получения сейсмических данных

Для получения реальных сейсмических данных проводились натурные испытания разработанной ВОК на базе иностранного аналога — 48-канальной пьезокерамической косой Geo-Sense Light-weight 24–48 Channel Streamer производства Geo Marine Survey Systems (Нидерланды). Схема испытаний представлена на рис. 3.

В качестве источника акустических колебаний использован спаркер Geo Source 200–400 производства Geo Marine Survey Systems (Нидерланды).

Для оценки влияния ограничений динамического диапазона схемы обработки на регистрируемые акустические сигналы и получаемые сейсмограммы, записанные с косы Geo-Sense, данные проходили ряд преобразований, приводящих их к виду согласно формуле (1).

Эти преобразования включали в себя: пересчет сигнала с косы Geo-Sense показаний  $S'$  (единиц младшего разряда), в  $S$  (рад) согласно известной чувствительно-

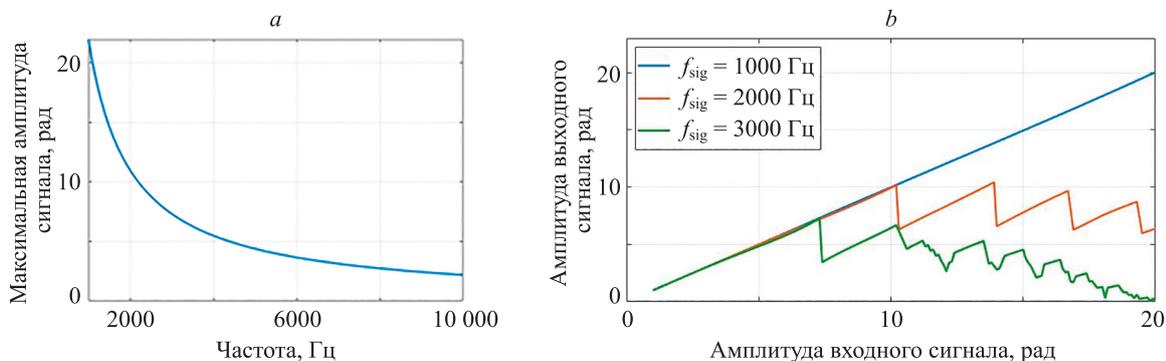


Рис. 2. Характер ограничений динамического диапазона: частотная зависимость верхней границы динамического диапазона (*a*); амплитудная характеристика схемы демодуляции на различных частотах (*b*)

Fig. 2. Characterization of dynamic range limitations: frequency dependence of the upper limit of dynamic range (*a*); amplitude characteristic of demodulation circuit at different frequencies (*b*)

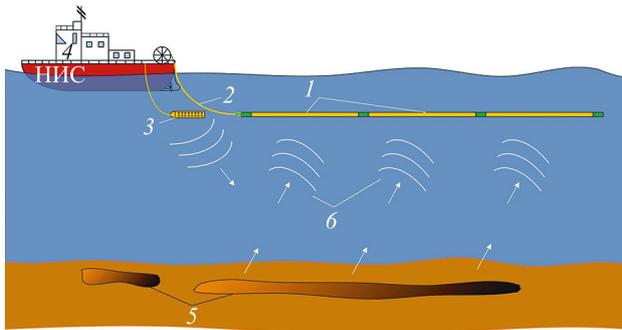


Рис. 3. Схема многоканальных сейсмоакустических наблюдений на акватории:

- 1 — чувствительная кабельная секция; 2 — кабель-буксир;
- 3 — источник акустических сигналов; 4 — научно-исследовательское судно (НИС); 5 — геологические неоднородности; 6 — регистрируемые косой сейсмические сигналы, отраженные от неоднородностей донных слоев

Fig. 3. Multichannel seismoacoustic scheme of observations in the water area:

- 1 — sensitive cable section; 2 — tug cable; 3 — source of acoustic signals; 4 — research vessel; 5 — geological heterogeneities; 6 — recorded reflected signals

сти гидрофонов волоконно-оптической косы по формуле:

$$S = K \left( \frac{S'}{2^N} \right) V_{\text{ref}} \frac{R_0}{R_n},$$

где  $K$  — коэффициент усиления сигнала;  $2^N$  — максимальное значение разрядной сетки АЦП с учетом бита знака, используемого для оцифровки гидроакустических сигналов в косе Geo-Sense;  $V_{\text{ref}}$  — опорное напряжение АЦП косы Geo-Sense;  $R_n$  — чувствительность косы Geo-Sense к гидроакустическому давлению;  $R_0$  — чувствительность волоконно-оптической косы к гидроакустическому давлению.

Для нашего случая принято  $N = 23$ ,  $V_{\text{ref}} = 10$  В,  $R_n = 267$  мкВ/Па,  $R_0 = 0,34$  рад/Па. С целью исследования влияния ограничений динамического диапазона на выходные сигналы косы коэффициент усиления сигнала  $K$  изменялся в пределах от 1 до 30.

Произведена интерполяция сигнала с косы Geo-Sense до 2 МГц — частоты сэмплирования данных с волоконно-оптической косы; формирование интерференционного сигнала согласно формуле (1), содержащего в качестве полезного измеряемого фазового сигнала интерполированные данные с косы Geo-Sense; демодуляцию интерференционного сигнала согласно схеме обработки (рис. 1); построение сейсмограммы по полученным данным.

### Методика построения скоростных разрезов

Временные разрезы получены с помощью обработки сейсмограмм методом отраженных волн общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) [31, 32]. Суть МОВ-ОГТ заключается в том, что источник и приемник симметрично разносятся от центра установки (ОГТ, рис. 4).

Формула кривой отраженной волны имеет вид:

$$t(x) = \frac{\sqrt{x^2 + 4h^2}}{V_1},$$

где  $h$  — глубина отражающей границы,  $x$  — расстояние источник-приемник.

Суммирование по ОГТ позволяет повысить соотношение сигнал/шум, так как синфазно суммируются полезные сигналы. Перед суммированием выполняется фильтрация сейсмограмм с целью избавления от волн-помех, сортировка звуковых дорожек по ОГТ (преобразование сейсмограмм, на которых записи отнесены к нулевому времени регистрации  $t_0$ , вместо зафиксированного времени) и добавление в каждый канал кинематических поправок, учитывающих удаление источника-приемника:

$$\Delta t_k = \frac{\cos^2 \varphi}{2V_{\text{cp}}^2 t_0},$$

где  $t_0(x/2) = t(x) - t_k$  — время, которое относится к середине расстояния между пунктами возбуждения и приема;  $V_{\text{cp}}$  — средняя скорость, которая определяется как частное значение от деления пути волны на время прохождения этого пути;  $\varphi$  — угол наклона пластов.

После ввода кинематических поправок выполняется скоростной анализ (процедура определения скоростей волн по сейсмограммам ОГТ), кинематические поправки корректируются, и производится суммирование сейсмограмм. В результате получают временные разрезы ОГТ (в координатах  $x, y, t$ ) [32], обработка которых выполнена в среде MATLAB.

### Результаты исследований

На рис. 5 представлена одиночная звуковая дорожка с одного гидрофона косы Geo-Sense, записанная после выстрела спаркера без ограничения динамического диапазона (оригинальный интерполированный сигнал

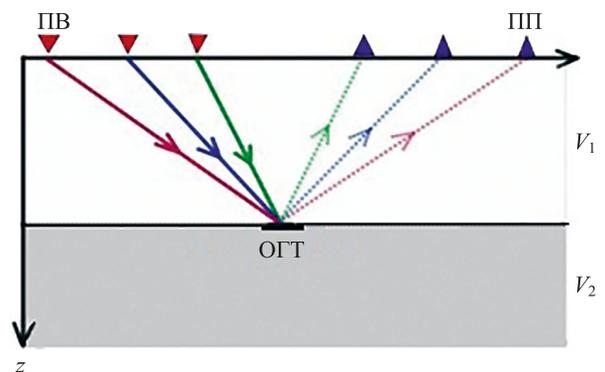


Рис. 4. Метод отраженных волн общей глубинной точки (ОГТ).

$V_1$  и  $V_2$  — скорости соответствующих слоев, ПВ — источник (пункт взрыва), ПП — приемник (пункт приема)

Fig. 4. The method of reflected waves of the common depth point (OГТ).

$V_1$  and  $V_2$  are the velocities of the corresponding layers, ПВ is the source (explosion point), ПП is the receiver (reception point)

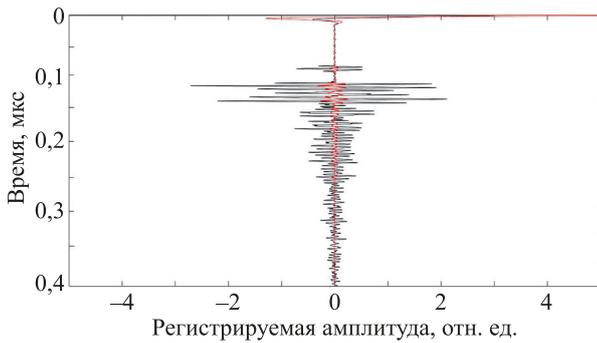


Рис. 5. Одиночная звуковая дорожка до (черный цвет) и после (красный цвет) ограничения динамического диапазона

Fig. 5. Single audio track before (black) and after (red) dynamic range limitation

с косы Geo-Sense), и дорожка с ограничением динамического диапазона, прошедшая через схему обработки сигналов согласно рис. 1. Для получения второй дорожки в ходе обработки сигнал с косы Geo-Sense дополнительно усилен в 30 раз, что позволило сделать более явными эффекты от ограничения динамического диапазона в схеме демодуляции.

На рис. 5 видно сильное уменьшение регистрируемой амплитуды акустического сигнала при ограни-

чении динамического диапазона. Полезный сигнал выражен слабо по сравнению с исходными данными. По сейсмограмме и временному разрезу, полученным на основании данных при ограничении динамического диапазона, невозможно сделать геологические выводы о строении изучаемого региона.

Суммарный разрез также не позволяет оценить линию дна.

На сейсмограмме без ограничения динамического диапазона (рис. 6, *a*) хорошо просматривается кривая прямой волны (волна, распространяющаяся между пунктами возбуждения и приема по траектории с минимальным временем пробега), отраженная от дна волна, а также кратные волны. В то же время на сейсмограмме после обработки с ограничением динамического диапазона слабо прослеживаются прямая и отраженная волны, форма сигнала искажена, в результате волновая картина выглядит нечетко (рис. 6, *b*).

Результат преобразования сейсмограмм во временные разрезы показан на рис. 7. На рис. 7, *a* изображен временной разрез по данным без ограничения динамического диапазона датчиков. В этом случае четко прослеживается линия дна, и заметны интенсивные кратные волны.

На рис. 7, *b* временной разрез, полученный по данным с ограничением динамического диапазона, практически не читаем: линия дна плохо прослеживается, от-

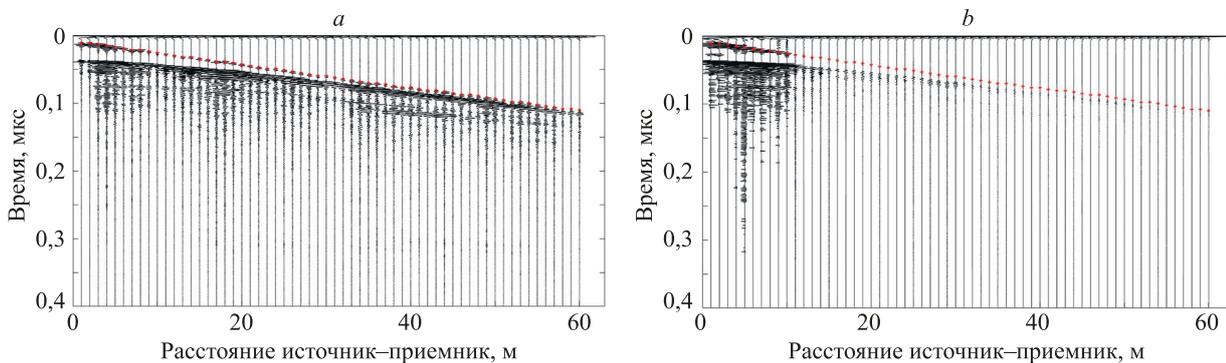


Рис. 6. Сейсмограммы, полученные по данным без ограничений (*a*) и с ограничениями (*b*) динамического диапазона. Красными точками обозначены прослеживаемые времена прихода прямой волны

Fig. 6. Seismograms obtained from data without restrictions (*a*) and with restrictions (*b*) of the dynamic range. The red dots indicate the traced arrival times of the direct wave

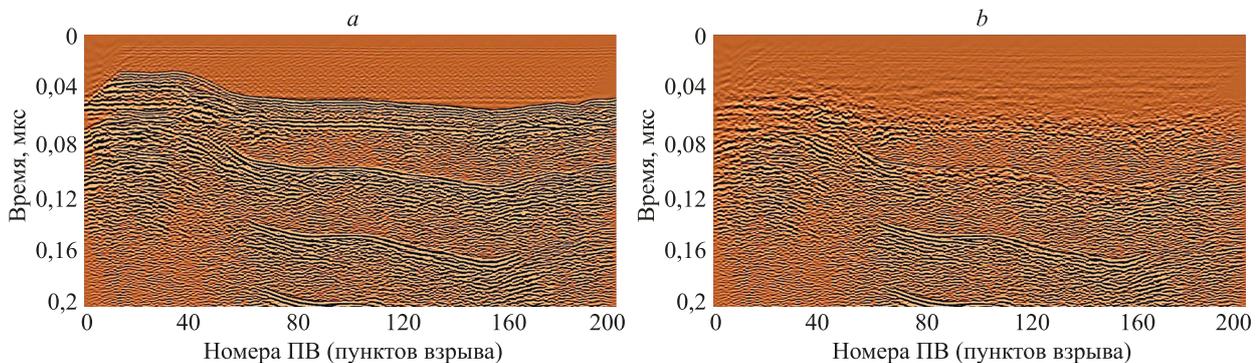


Рис. 7. Временные разрезы по данным без ограничения (*a*) и с ограничениями (*b*) динамического диапазона

Fig. 7. Time sections according to data without limitation (*a*) and with limitations (*b*) of the dynamic range

раженная волна слабее по интенсивности, чем кратные ей волны. Дальнейшая обработка картину не улучшила. Можно сделать вывод, что геологическая интерпретация такого разреза невозможна.

### Заключение

В работе представлены результаты оценки влияния ограничений динамического диапазона схемы обработки сигналов волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы на качество регистрируемых данных и сейсмограмм.

Демодуляция сигнала с ограничением динамического диапазона методом PGC (phase generated carrier) и последующая обработка с целью получения временного сейсмического разреза исследуемой территории демонстрируют существенное различие в качестве получаемых данных по сравнению с данными без ограничения динамического диапазона.

Сейсмограммы, построенные по данным с ограничением динамического диапазона, практически не передают полезную информацию: кривая отраженной

волны плохо прослеживается, амплитуды волн сильно уменьшены. По сравнению с амплитудами волн в данных без ограничения динамического диапазона, после двухсотого отсчета по времени амплитуда сигнала сильно уменьшается и остается примерно одинаковой на протяжении всей записи. В результате обработки таких данных полученный временной разрез исследуемой геологической среды непригоден для интерпретации: линия дна не просматривается, в то время как кратные волны, наоборот, достаточно интенсивны.

Полученные результаты продемонстрировали значительное влияние ограничений динамического диапазона на волоконно-оптической буксируемой сейсмической косы на качество регистрируемых данных и сейсмограмм. Построенная модель тракта косы позволяет оценивать степень искажений сильных акустических сигналов при их прохождении через тракт обработки сигналов косы. На основе этих данных могут быть выработаны рекомендации по выбору оптимальной чувствительности волоконно-оптических гидрофонов косы и мощности сейсмических сигналов, используемых в ходе проведения сейсморазведочных работ.

### Литература

1. Kirkendall C., Barock T., Tveten A., Dandridge A. *Fiber optic towed arrays*. Technical Report / Naval Research Laboratory, Washington, DC, USA, 2007.
2. Souto F. Fibre optic towed array: The high tech compact solution for naval warfare // Proc. of the Annual Conference of the Australian Acoustical Society 2013, Acoustics 2013: Science, Technology and Amenity. 2013. P. 297–301.
3. Stolkin R., Sutin A., Radhakrishnan S., Bruno M., Fullerton B., Ekimov A., Raftery M. Feature based passive acoustic detection of underwater threats // Proceedings of SPIE. 2006. V. 6204. P. 620408. <https://doi.org/10.1117/12.663651>
4. Crickmore R.I., Nash P.J., Wooler J.P.F. Fiber optic security systems for land- and sea-based applications // Proceedings of SPIE. 2004. V. 5611. P. 79–87. <https://doi.org/10.1117/12.578904>
5. Borowski B., Sutin A., Roh H.-S., Bunin B. Passive acoustic threat detection in estuarine environments // Proceedings of SPIE. 2008. V. 6945. P. 694513. <https://doi.org/10.1117/12.779177>
6. De Freitas J.M. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks // Measurement Science and Technology. 2011. V. 22. N 5. P. 052001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/5/052001>
7. Zhang M., Ma X., Wang L., Lai S., Zhou H., Zhao H., Liao Y. Progress of optical fiber sensors and its application in harsh environment // Photonic Sensors. 2011. V. 1. N 1. P. 84–89. <https://doi.org/10.1007/s13320-010-0012-1>
8. Paulsson B.N.P., Toko J.L., Thornburg J.A., Slopko F., He R., Zhang C. A high performance fiber optic seismic sensor system // Proc. of the 38<sup>th</sup> Workshop Geothermal Reservoir Engineering. 2013. P. 8.
9. Kringelbotn J.T., Nakstad H., Morten E. Fibre optic ocean bottom seismic cable system: From innovation to commercial success // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7503. P. 75037U. <https://doi.org/10.1117/12.837636>
10. Berg C., Langhammer J., Nash P. Lifetime stability and reliability of fibre-optic seismic sensors for permanent reservoir monitoring // Proc. of the Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 82<sup>nd</sup> Annual Meeting (SEG). 2012. P. 1472–1476. <https://doi.org/10.1190/segam2012-1236.1>
11. Meng Z., Chen W., Wang J., Hu X., Chen M., Zhang Y. Recent progress in fiber-optic hydrophones // Photonic Sensors. 2021. V. 11. N 1. P. 109–122. <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0618-5>
12. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists* / ed. by E. Udd, W.B. Spillman. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011. 512 p.

### References

1. Kirkendall C., Barock T., Tveten A., Dandridge A. *Fiber optic towed arrays*. Technical Report. Naval Research Laboratory, Washington, DC, USA, 2007.
2. Souto F. Fibre optic towed array: The high tech compact solution for naval warfare. *Proc. of the Annual Conference of the Australian Acoustical Society 2013, Acoustics 2013: Science, Technology and Amenity*, 2013, pp. 297–301.
3. Stolkin R., Sutin A., Radhakrishnan S., Bruno M., Fullerton B., Ekimov A., Raftery M. Feature based passive acoustic detection of underwater threats. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6204, pp. 620408. <https://doi.org/10.1117/12.663651>
4. Crickmore R.I., Nash P.J., Wooler J.P.F. Fiber optic security systems for land- and sea-based applications. *Proceedings of SPIE*, 2004, vol. 5611, pp. 79–87. <https://doi.org/10.1117/12.578904>
5. Borowski B., Sutin A., Roh H.-S., Bunin B. Passive acoustic threat detection in estuarine environments. *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6945, pp. 694513. <https://doi.org/10.1117/12.779177>
6. De Freitas J.M. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks. *Measurement Science and Technology*, 2011, vol. 22, no. 5, pp. 052001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/5/052001>
7. Zhang M., Ma X., Wang L., Lai S., Zhou H., Zhao H., Liao Y. Progress of optical fiber sensors and its application in harsh environment. *Photonic Sensors*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 84–89. <https://doi.org/10.1007/s13320-010-0012-1>
8. Paulsson B.N.P., Toko J.L., Thornburg J.A., Slopko F., He R., Zhang C. A high performance fiber optic seismic sensor system. *Proc. of the 38<sup>th</sup> Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, 2013, pp. 8.
9. Kringelbotn J.T., Nakstad H., Morten E. Fibre optic ocean bottom seismic cable system: From innovation to commercial success. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7503, pp. 75037U. <https://doi.org/10.1117/12.837636>
10. Berg C., Langhammer J., Nash P. Lifetime stability and reliability of fibre-optic seismic sensors for permanent reservoir monitoring. *Proc. of the Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 82<sup>nd</sup> Annual Meeting (SEG)*, 2012, P. 1472–1476. <https://doi.org/10.1190/segam2012-1236.1>
11. Meng Z., Chen W., Wang J., Hu X., Chen M., Zhang Y. Recent progress in fiber-optic hydrophones. *Photonic Sensors*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 109–122. <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0618-5>
12. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Ed. by E. Udd, W.B. Spillman. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2011, 512 p.

13. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. *Fiber Optic Sensors*. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008. 496 p.
14. Дмитрищенко П.Ю., Плотников М.Ю., Лавров В.С., Волков А.В., Шарков И.А., Годовова А.С. Компенсация шумов буксировки волоконно-оптической сейсмической косы с использованием вспомогательного интерферометра // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 9. С. 69–74. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-09-69-74>
15. Cranch G.A., Nash P.J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM // *Journal of Lightwave Technology*. 2001. V. 19. N 5. P. 687–699. <https://doi.org/10.1109/50.923482>
16. Kersey D., Dandridge A. Comparative analysis of multiplexing techniques for interferometric fiber sensors // *Proceedings of SPIE*. 1989. V. 1120. P. 236–246. <https://doi.org/10.1117/12.960993>
17. Беликин М.Н., Плотников М.Ю., Стригалев В.Е., Куликов А.В., Киреевков А.Ю. Экспериментальное сравнение алгоритмов гомодинной демодуляции сигналов для фазового волоконно-оптического датчика // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 6. С. 1008–1014. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014>
18. Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H. Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors // *Proceedings of SPIE*. 1994. V. 2191. P. 324–336. <https://doi.org/10.1117/12.173962>
19. Dandridge A., Tveten A.B., Giallorenzi T.G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1982. V. 18. N 10. P. 1647–1653. <https://doi.org/10.1109/JQE.1982.1071416>
20. He J., Wang L., Li F., Liu Y. An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability // *Journal of Lightwave Technology*. 2010. V. 28. N 22. P. 3258–3265. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2081347>
21. Tong Y., Zeng H., Li L., Zhou Y. Improved phase generated carrier demodulation algorithm for eliminating light intensity disturbance and phase modulation amplitude variation // *Applied Optics*. 2012. V. 51. N 29. P. 6962–6967. <https://doi.org/10.1364/AO.51.006962>
22. Yan L., Zhang Y., Xie J., Lou Y., Chen B., Zhang S., Zhou Y. Nonlinear error compensation of PGC demodulation with the calculation of carrier phase delay and phase modulation depth // *Journal of Lightwave Technology*. 2021. V. 39. N 8. P. 2327–2335. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3049481>
23. Sun Z., Liu K., Jiang J., Xu T., Wang S., Guo H., Zhou Z., Xue K., Huang Y., Liu T. Dynamic phase extraction in an ameliorated distributed vibration sensor using a highly stable homodyne detection // *IEEE Sensors Journal*. 2021. V. 21. N 23. P. 27005–27014. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3122133>
24. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovskiy I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique // *Advances in Optical Technologies*. 2014. P. 815108. <https://doi.org/10.1155/2014/815108>
25. Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications // *IEEE Sensors Journal*. 2019. V. 19. N 9. P. 3376–3382. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2894323>
26. Rissons A., Mollier J.C. The vertical-cavity surface emitting laser (VCSEL) and electrical access contribution // *Optoelectronics-Devices and Applications*. 2011. P. 227–254. <https://doi.org/10.5772/18299>
27. Gdeisat M., Lilley F. *One-Dimensional Phase Unwrapping Problem*. Liverpool John Moores University, 2012.
28. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2017. V. 17. N 13. P. 4143–4150. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287>
29. Wang G.Q., Xu T.W., Li F. PGC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2012. V. 24. N 23. P. 2093–2096. <https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2220129>
30. Hou L., Peng F., Yang J., Yuan Y., Yan D., Wu B., Yuan L. An improved PGC demodulation method to extend dynamic range and compensate low-frequency drift of modulation depth // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9634. P. 96345Y. <https://doi.org/10.1117/12.2195867>
31. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. *Сейсморазведка: учебник для вузов*. Тверь: АИС, 2006. 744 с.
31. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. *Fiber Optic Sensors*. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2008, 496 p.
14. Dmitrashchenko P.Yu., Plotnikov M.Yu., Lavrov V.S., Volkov A.V., Sharkov I.A., Godovova A.S. Compensation of the towing noise of a fiber-optic streamer using an additional interferometer. *Journal of Optical Technology*, 2021, vol. 88, no. 9, pp. 532–535. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000532>
15. Cranch G.A., Nash P.J. Large-scale multiplexing of interferometric fiber-optic sensors using TDM and DWDM. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, vol. 19, no. 5, pp. 687–699. <https://doi.org/10.1109/50.923482>
16. Kersey D., Dandridge A. Comparative analysis of multiplexing techniques for interferometric fiber sensors. *Proceedings of SPIE*, 1989, vol. 1120, pp. 236–246. <https://doi.org/10.1117/12.960993>
17. Belikin M.N., Plotnikov M.Yu., Strigalev V.E., Kulikov A.V., Kireenkov A.Yu. Experimental comparison of homodyne demodulation algorithms for phase fiber-optic sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 6, pp. 1008–1014. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-6-1008-1014>
18. Christian T.R., Frank P.A., Houston B.H. Real-time analog and digital demodulator for interferometric fiber optic sensors. *Proceedings of SPIE*, 1994, vol. 2191, pp. 324–336. <https://doi.org/10.1117/12.173962>
19. Dandridge A., Tveten A.B., Giallorenzi T.G. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 18, no. 10, pp. 1647–1653. <https://doi.org/10.1109/JQE.1982.1071416>
20. He J., Wang L., Li F., Liu Y. An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, vol. 28, no. 22, pp. 3258–3265. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2081347>
21. Tong Y., Zeng H., Li L., Zhou Y. Improved phase generated carrier demodulation algorithm for eliminating light intensity disturbance and phase modulation amplitude variation. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 29, pp. 6962–6967. <https://doi.org/10.1364/AO.51.006962>
22. Yan L., Zhang Y., Xie J., Lou Y., Chen B., Zhang S., Zhou Y. Nonlinear error compensation of PGC demodulation with the calculation of carrier phase delay and phase modulation depth. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, vol. 39, no. 8, pp. 2327–2335. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3049481>
23. Sun Z., Liu K., Jiang J., Xu T., Wang S., Guo H., Zhou Z., Xue K., Huang Y., Liu T. Dynamic phase extraction in an ameliorated distributed vibration sensor using a highly stable homodyne detection. *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, no. 23, pp. 27005–27014. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3122133>
24. Plotnikov M.J., Kulikov A.V., Strigalev V.E., Meshkovskiy I.K. Dynamic range analysis of the phase generated carrier demodulation technique. *Advances in Optical Technologies*, 2014, pp. 815108. <https://doi.org/10.1155/2014/815108>
25. Plotnikov M.Y., Lavrov V.S., Dmitraschenko P.Y., Kulikov A.V., Meshkovskiy I.K. Thin cable fiber-optic hydrophone array for passive acoustic surveillance applications. *IEEE Sensors Journal*, 2019, vol. 19, no. 9, pp. 3376–3382. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2894323>
26. Rissons A., Mollier J.C. The vertical-cavity surface emitting laser (VCSEL) and electrical access contribution. *Optoelectronics-Devices and Applications*, 2011, pp. 227–254. <https://doi.org/10.5772/18299>
27. Gdeisat M., Lilley F. *One-Dimensional Phase Unwrapping Problem*. Liverpool John Moores University, 2012.
28. Volkov A.V., Plotnikov M.Y., Mekhregin M.V., Miroshnichenko G.P., Aleynik A.S. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 13, pp. 4143–4150. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2704287>
29. Wang G.Q., Xu T.W., Li F. PGC demodulation technique with high stability and low harmonic distortion. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, vol. 24, no. 23, pp. 2093–2096. <https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2220129>
30. Hou L., Peng F., Yang J., Yuan Y., Yan D., Wu B., Yuan L. An improved PGC demodulation method to extend dynamic range and compensate low-frequency drift of modulation depth. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9634, pp. 96345Y. <https://doi.org/10.1117/12.2195867>
31. Boganik G.N., Gurvich I.I. *Seismic Surveying*. Tver, AIS Publ., 2006, 744 c. (in Russian)

32. Гайнанов В.Г. Практикум по обработке данных сейсморазведки МОВ-ОГТ: Руководство к практическим занятиям по курсу «Сейсморазведка»: учебное пособие. 2-е изд, перераб. М.: КДУ, Добросвет, 2018.

32. Gainanov V.G. *Workshop on Seismic Data Processing Using Reflection Wave Method and CMP-method. A Guide to Practical Exercises for the Course "Seismic Surveying"*. 2<sup>nd</sup> ed., Moscow, KDU, Dobrosvet Publ., 2018. (in Russian)

#### Авторы

**Аржаненкова Алина Николаевна** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4869-2838>, [11arzh11@gmail.com](mailto:11arzh11@gmail.com)

**Плотников Михаил Юрьевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57193069973](https://orcid.org/0000-0003-2506-0379), <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>, [plotnikov-michael@yandex.ru](mailto:plotnikov-michael@yandex.ru)

**Мирошниченко Георгий Петрович** — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 55401299600](https://orcid.org/0000-0002-4265-8818), <https://orcid.org/0000-0002-4265-8818>, [gpmirosh@gmail.com](mailto:gpmirosh@gmail.com)

**Дмитращенко Павел Юрьевич** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-9250-4286>, [pdmitrashchenko@itmo.ru](mailto:pdmitrashchenko@itmo.ru)

#### Authors

**Alina N. Arzhanenkova** — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4869-2838>, [11arzh11@gmail.com](mailto:11arzh11@gmail.com)

**Michael Yu. Plotnikov** — PhD, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57193069973](https://orcid.org/0000-0003-2506-0379), <https://orcid.org/0000-0003-2506-0379>, [plotnikov-michael@yandex.ru](mailto:plotnikov-michael@yandex.ru)

**George P. Miroshnichenko** — D.Sc. (Physics & Mathematics), Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 55401299600](https://orcid.org/0000-0002-4265-8818), <https://orcid.org/0000-0002-4265-8818>, [gpmirosh@gmail.com](mailto:gpmirosh@gmail.com)

**Pavel Yu. Dmitraschenko** — PhD, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9250-4286>, [pdmitrashchenko@itmo.ru](mailto:pdmitrashchenko@itmo.ru)

*Статья поступила в редакцию 26.12.2021*  
*Одобрена после рецензирования 09.03.2022*  
*Принята к печати 31.03.2022*

*Received 26.12.2021*  
*Approved after reviewing 09.03.2022*  
*Accepted 31.03.2022*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»