



## СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-10>

УДК 550.834.08

**Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна**

А. В. Чугаев , М. В. Тарантин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация

[chugaev@mi-perm.ru](mailto:chugaev@mi-perm.ru)**Аннотация**

При проведении настоящего исследования была поставлена цель проанализировать возможности распределенных датчиков DAS при решении горнотехнических задач, сравнить с существующими сейсмоакустическими системами сбора данных и подготовить основу для проведения сейсмоакустических исследований с регистрацией оптоволоконной распределенной системой. Рассмотрены возможности регистрации сейсмоакустических сигналов с помощью оптоволоконных распределенных акустических систем. На основании физико-геометрического анализа получены амплитудно-частотные характеристики регистрируемых продольных волн для прямого и спирального волокна. Для спирального волокна амплитудно-частотные характеристики зависят от нескольких ключевых факторов: интегрирования измеряемого значения вдоль волокна на базе измерения, угла падения волны на кабель и угла намотки волокна в кабеле. Увеличение угла намотки повышает равномерность амплитудно-частотной характеристики продольных волн как по частотам, так и по углам падения. В то же время спиральная намотка меняет эффективную базу измерения сигнала, что позволяет путем суммирования сигналов прямого и спирального волокна за счет перекрытия спектров выполнять регистрацию частот, подавляемых при отдельной записи. По результатам исследования предложена конструкция кабеля для регистрации широкополосных сейсмоакустических сигналов, с помощью которых можно решать обширный круг горнотехнических и инженерных задач, выполняя сейсморазведочные исследования как в скважинах, так и на поверхности.

**Ключевые слова**

распределенный акустический датчик, оптоволоконный сенсор, сейсморазведка, скважинная сейсмоакустика, рассеяние Рэлея, диаграмма направленности приемника

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №20-45-596032.

**Для цитирования**

Chugaev A. V., Tarantin M. V. Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):13–21. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-10>

## MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

**Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS)**

A. V. Chugaev , M. V. Tarantin

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

[chugaev@mi-perm.ru](mailto:chugaev@mi-perm.ru)**Abstract**

The goals of this study were to analyze the capabilities of DAS (distributed sensors) in resolving mining problems, compare them with existing seismoacoustic data collection systems, and prepare the basis for conducting seismoacoustic studies with recording by a fiber optic distributed system. This paper considers the capabilities of recording seismoacoustic responses using fiber optic distributed acoustic systems (DAS). Based on physical and geometrical analysis, the amplitude-frequency responses (characteristics) of recorded longitudinal waves for straight and helically-wound fibers were obtained. In the case of helically-wound fiber, the frequency response depends on several key factors: integrating the measured value along the fiber based on the measurement; the angle of incidence on the cable; and the winding angle of the fiber in the cable. An increase in the winding angle increases the uniformity of the amplitude-frequency characteristics of longitudinal waves both in terms



of frequencies and angles of incidence. At the same time, helical winding changes the effective response spacing (gauge length). This makes it possible, by summing the responses of the straight and helically-wound fibers due to the overlap of the spectra, to record frequencies that are suppressed in case of separate recording.

Based on the study results, a cable design was proposed to record broadband seismoacoustic responses enabling a wide range of mining and engineering problems to be resolved, and for seismic surveys both in wells and on the surface to be carried out.

#### Keywords

distributed acoustic sensor, fiber optic sensor, seismic exploration, borehole seismoacoustics, Rayleigh scattering, receiver directivity pattern

#### Acknowledgments

The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research and the Perm Territory, Project Number 20-45-596032.

#### For citation

Chugaev A. V., Tarantin M. V. Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):13–21. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-10>

### Введение

Распределенные системы регистрации акустических сигналов с помощью оптоволоконна (DAS – distributed acoustic sensing) хорошо известны уже несколько лет [1–3]. Однако их внедрение в практику геофизических исследований требует решения определенных практических задач, связанных с физико-геометрическими особенностями таких систем.

Регистрация акустического сигнала в системе DAS осуществляется за счет анализа спектра рэлеевского рассеяния света в оптоволокне, которое возникает при прохождении светового импульса заданной длины волны и длительности. Продольная деформация волокна приводит к изменению амплитудных и фазовых компонент частотных спектров отраженного оптического сигнала [2]. Оптическая интерферометрия позволяет вычислять величину деформации на определенном участке, положение которого может быть найдено по времени прихода отраженного оптического импульса при известной скорости света в волноводе [4, 5]. Единичная база приема  $L$  (Gauge Length), на которой производятся измерения, определяется оптоэлектронными характеристиками регистратора. В результате вычисляется профиль распределения напряжений в волокне в определенный момент времени. Повторный опрос ограничивается временем прихода отраженного сигнала от самого удаленного участка оптоволоконной магистрали. Скорость распространения света в оптоволокне составляет  $2 \times 10^8$  м/с, и для линии 1 км двойное время пробега импульса света составляет  $10^{-5}$  с, а для 100 км –  $10^{-3}$  с, что на данный момент является ограничением дискретизации регистрируемого сигнала по времени.

При проведении настоящего исследования была поставлена цель проанализировать возможности распределенных датчиков DAS при решении горнотехнических задач, сравнить с существующими сейсмоакустическими системами сбора данных и подготовить основу для проведения сейсмоакустических исследований с регистрацией оптоволоконной распределенной системой.

Спектральный состав сигналов, регистрируемых оптоволоконными датчиками с линейным воло-

ном, рассмотрен в работах [6–8]. Поскольку измерения DAS предполагают осреднение измеряемого параметра на базе приема  $L$ , возникает искажение спектра акустического сигнала при частотах выше 150–300 Гц [7, 9, 10]. Сигналы со спектром, не превышающим эти значения, подходят для решения задач нефтяной сейсморазведки [3, 11, 12] и мониторинга рудных месторождений [13, 14]. В скважинной и шахтной сейсморазведке верхняя граница частотного диапазона полезного сигнала составляет 1000 Гц и выше [15–17], поэтому необходимо рассмотреть возможности применения распределенных оптоволоконных систем для решения горнотехнических задач, сравнить с существующими сейсмоакустическими системами сбора данных. Кроме того, на данный момент в литературе отсутствует анализ амплитудно-частотных характеристик кабеля со спиральным уложением волокна.

### Диаграмма акустической направленности прямого оптоволоконна

Системы DAS измеряют деформацию оптоволоконна вдоль его оси, таким образом, для продольных волн диаграмма направленности определяется как  $D_p(\alpha) = A_0 \cos^2 \alpha$ , для поперечных волн  $D_s(\alpha) = A_0 |\sin 2\alpha|$  [1, 18], где  $\alpha$  – угол между волокном и вектором распространения волны;  $A_0$  – амплитуда падающей волны. Падение сейсмической волны на линейный участок оптоволоконна рассмотрено в работах [3, 11, 19]. Такая диаграмма направленности существенно ограничивает круг возможных решаемых сейсморазведочных задач, в частности, во многих стандартных случаях сейсмических исследований целевые волны приходят по нормали к приемной линии.

Применение специальных кабелей с нестандартным уложением волокна может расширить возможности оптоволоконных систем для решения сейсмоакустических задач. Варианты конструкции кабеля приведены в патенте [20]. Для производства наиболее доступным способом уложения волокна в кабеле является спиральная намотка, натурные измерения описаны в работах [21, 22].

### Влияние угла намотки на эффективную базу приема кабеля

При спиральной намотке длина волокна, уложенного в кабеле, будет больше, чем длина кабеля. Таким образом, будет изменяться и эффективное значение  $L_H$  связанного с кабелем породного массива.

Уменьшение базы приема пропорционально косинусу угла намотки:

$$L_H = L \cos \theta, \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол отклонения направляющей волокна от оси кабеля (для прямого волокна  $\theta = 0^\circ$ )<sup>1</sup>;  $L$  – база приема вдоль волокна;  $L_H$  – база приема вдоль кабеля со спиральной намоткой волокна.

### Влияние угла намотки на чувствительность кабеля

При изменении диаграммы направленности кабеля за счет намотки можно представить единичный отрезок спирали в виде линейного участка с эквивалентным распределением чувствительности по осям (рис. 1). В параметрическом виде энергия сигнала будет распределяться следующим образом:

$$E_z = E \cos^2 \theta; \quad (2)$$

$$E_r = E \sin^2 \theta; \quad (3)$$

$$E_{x,y} = \frac{1}{2} E \sin^2 \theta, \quad (4)$$

где  $E$  – полная чувствительность;  $E_z, E_r, E_x, E_y$  – чувствительности соответственно по оси  $z$ , в плоскости, перпендикулярной оси  $z$ , по осям  $x$  и  $y$ .

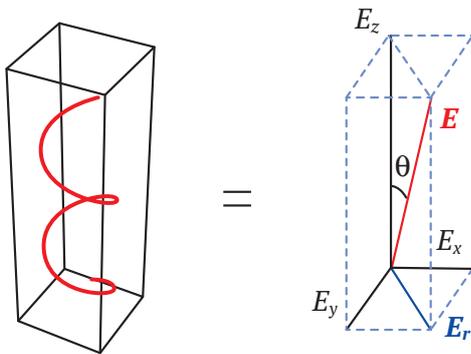


Рис. 1. Распределение чувствительности по осям при спиральной намотке волокна

На единице длины кабеля увеличение зарегистрированной энергии будет происходить за счет увеличения длины волокна и количества трасс вследствие уменьшения эффективной базы приема согласно формуле (1).

<sup>1</sup> В литературе существует два различных способа отсчета угла намотки. Кувшинов, Braid, Innpaen и др. принимают для прямого волокна  $90^\circ$ , в то время как в работах Егорова, Тертышников и др. прямому волокну соответствует  $0^\circ$ . Мы придерживаемся последнего варианта нотации.

Алгоритм численного расчета диаграммы направленности кабеля за счет намотки приведен в работах [23, 24].

С увеличением угла намотки волокна появляется чувствительность системы по нормали к оси кабеля. Диаграмма направленности для продольных волн меняется с диаграммы одноосевого датчика в сторону диаграммы датчика давления, имеющего равномерную (сферическую) диаграмму.

Чувствительность равномерно распределяется по осям при значении угла намотки

$$\theta = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \approx 54,7^\circ \quad [19, 23].$$

Таким образом, при равномерной диаграмме направленности (шарообразной) по одной оси зарегистрированная энергия будет в  $\sqrt{3}$  раза меньше и амплитуда сигнала уменьшится в  $\sqrt{3}$  раз.

Суммарный сигнал от воздействия сейсмической волны со спиральным волокном складывается из ее взаимодействия с эквивалентными участками, разложенными по ортогональным осям. Для продольных волн сигналы будут складываться, а для поперечных – вычитаться (рис. 2).

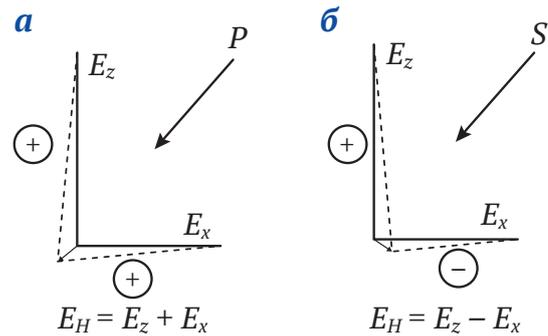


Рис. 2. Схема изменения длины волокна под воздействием продольных (а) и поперечных (б) волн

Диаграмма направленности симметрична относительно оси кабеля и зависит от углов намотки и падения сейсмической волны в соответствии с выражениями (2–4):

$$D_p(\alpha, \theta) = \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + \frac{1}{2} \sin^2 \alpha \cos^2 \theta; \quad (5)$$

$$D_s(\alpha, \theta) = \left| \sin 2\alpha \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin^2 \theta \right|, \quad (6)$$

где  $D_p, D_s$  – направленность соответственно для  $P$  и  $S$  волн;  $\alpha$  – угол между кабелем и лучом сейсмической волны. В графическом виде диаграммы приведены на рис. 3.

Заметим, что полученные данные отличаются от приведенных в работе [23], где полярность сигнала  $S$ -волн меняется в зависимости от направления распространения оптического сигнала в волокне. Однако это означало бы, что измерения на одном и том же участке кабеля путем подключения с разных концов оптической линии давали бы различные результаты.

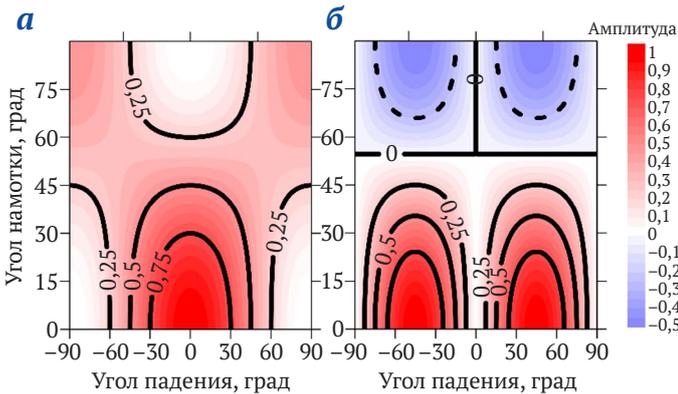


Рис. 3. Зависимости чувствительности кабеля со спиральным уложением волокна от углов падения волны и намотки волокна для P (а) и S (б) волн

### Частотные характеристики регистрируемого сигнала для прямого волокна

Рассмотрим момент времени, когда монохроматическая упругая волна с частотой колебаний  $f$  создала продольные напряжения в волокне, растянутом вдоль оси  $z$ . В этом случае амплитуда регистрируемого сигнала будет изменяться согласно выражению

$$A(x) = A_0 \sin(kz),$$

где  $k = 2\pi f/V$  – волновое число;  $A_0$  – максимальная амплитуда сигнала.

Амплитуда сигнала, измеренного на отрезке длины  $L$ , равна сумме амплитуд вдоль этого отрезка:

$$A_L = A_0 \int_0^L \sin(kz) dz = A_0 \frac{V}{2\pi f} \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi f L}{V}\right) \right). \quad (7)$$

Здесь мы видим, что, во-первых, с ростом частоты амплитуда сигнала падает. Во-вторых, в точках, удовлетворяющих условию  $L = n\lambda$ ,  $n \in Z$ , функция принимает нулевое значение. В результате амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) осложнена участками ослабления сигнала в результате действия прямоугольного оконного фильтра, каким представляется протяженный линейный приемник. АЧХ для продольных волн, распространяющихся вдоль волокна со скоростью  $V = 2500$  м/с, и базы измерения  $L = 10$  м приведена на рис. 4.

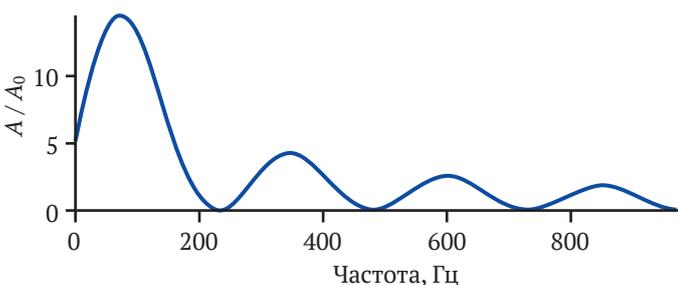


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика участка прямого волокна при прохождении волны вдоль него

### Зависимость амплитудно-частотных характеристик от угла падения волны

При расположении линейного приемника в поле гармонической волны (рис. 5) видимый период будет увеличиваться при увеличении угла  $\alpha$  между направлением распространения волны и линией приема от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Видимая частота, в свою очередь, будет уменьшаться:

$$f_a = f |\cos \alpha|. \quad (8)$$

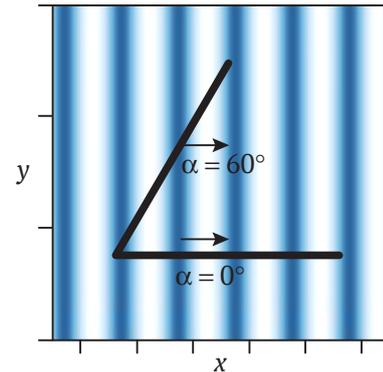


Рис. 5. Изменение видимого периода при разных углах подхода волны

Для участка прямого волокна и произвольного угла падения волны  $\alpha$  зависимость АЧХ от угла падения может быть найдена как произведение амплитудной характеристики (7) и диаграммы направленности, с учетом видимой частоты вместо действительной (8):

$$A_L(\alpha, f) = A_0 \frac{V}{2\pi f_a} \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi L f_a}{V}\right) \right) D(\alpha). \quad (9)$$

Изображение данной зависимости для продольных и поперечных волн при  $L = 10$  м,  $V_p = 2500$  м/с,  $V_s = 1500$  м/с представлено на рис. 6. На изображении обращают на себя внимание участки режекции в виде «улыбок» и малая чувствительность при углах, близких к  $90^\circ$ .

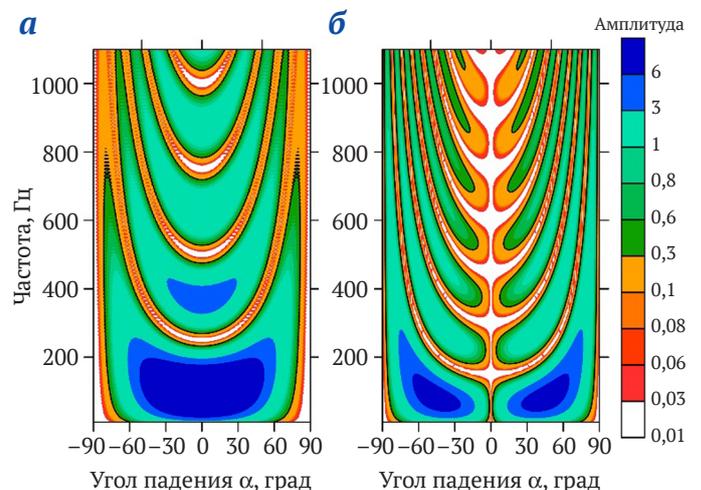


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика участка прямого волокна при различных углах падения упругой волны для P (а) и S (б) волн

### Амплитудно-частотный отклик спирального волокна

Далее рассмотрим кабель радиуса  $r$  со спиральным уложением волокна, на который волна падает под углом  $\alpha$ . Угол падения волны на отдельные малые участки равен  $\alpha + \varphi(z)$  (рис. 7), где  $\varphi(z)$  можно найти через производную функции, описывающей спиральное волокно в плоскости  $(z, x)$ :

$$x(z) = r \sin\left(z \operatorname{tg} \frac{\theta}{r}\right), \quad (10)$$

откуда

$$\varphi(z) = \arctg\left(\operatorname{tg} \theta \cos\left(z \operatorname{tg} \frac{\theta}{r}\right)\right). \quad (11)$$

Функция  $\varphi(z)$  принимает значения от  $-\theta$  до  $\theta$ , и при условии, что длина волны намного больше шага между витками в кабеле, отклик будет равен сумме

$$A_H(f, \theta, \alpha) = \sum_{\varphi=-\theta}^{\theta} A_L(f, \alpha + \varphi(z)) \Delta L(\varphi)/L, \quad (12)$$

где множитель  $\Delta L(\varphi)/L$  выполняет роль весового коэффициента, зависящего от доли участков с фиксированным значением угла  $\varphi$  в общей длине волокна. Распределение углов можно найти путем вычисления производной функции  $z(x) = r \operatorname{ctg} \theta \arcsin(x/r)$ :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\sqrt{1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2}}, \quad (13)$$

для которой  $x \in [-r, r]$  и углы меняются от  $-\theta$  до  $\theta$ . Пример распределения  $\varphi$  для угла намотки  $45^\circ$  приведен на рис. 8.

Для продольных волн по формуле (12) получены амплитудно-частотные характеристики для различных углов намотки волокна в кабеле (рис. 9). С увеличением угла намотки полосы режекции размываются,

в результате отклик становится более равномерным по углам падения. По частотам присутствуют провалы чувствительности, хотя и менее выраженные, чем для прямого волокна, что оставляет возможности для отбеливания спектра.

Важным случаем здесь является угол падения волны  $90^\circ$ , отклик при котором вынесен отдельно на рис. 10. Из графиков видно, что есть полосы частот, в которых происходит увеличение амплитуды сигнала при увеличении угла намотки, и полосы, где усиление не происходит.

С увеличением угла намотки эффективная база приема уменьшается в соответствии с формулой (1), что, в свою очередь, приводит к увеличению частоты первого минимума в суммарном частотном отклике. Данный факт позволяет при суммировании сигналов с прямого и спирального волокна получить более равномерную частотную характеристику в большом диапазоне углов падения волны на кабель (рис. 11), за исключением углов падения, близких  $90^\circ$ , где АЧХ зависит только от спирального волокна.

### Радиус изгиба волокна в спиральном кабеле

Стандартное телекоммуникационное волокно имеет определенную линейку типоразмеров и маркировок, при этом одной из основных характеристик является зависимость коэффициента затухания сигнала от радиуса изгиба волокна.

Радиус изгиба определяется в плоскости, в которой он максимален. При равномерной спиральной намотке радиус кривизны постоянный и совпадает с радиусом минимальной кривизны эллипса, образуемого при сечении кабеля плоскостью под тем же углом, что и угол намотки (рис. 12). Таким образом, эффективный радиус кривизны волокна будет зависеть от радиуса заложения волокна в кабеле  $r$  и угла намотки  $\theta$ :

$$R_e = \frac{r}{\sin^2 \theta}. \quad (14)$$

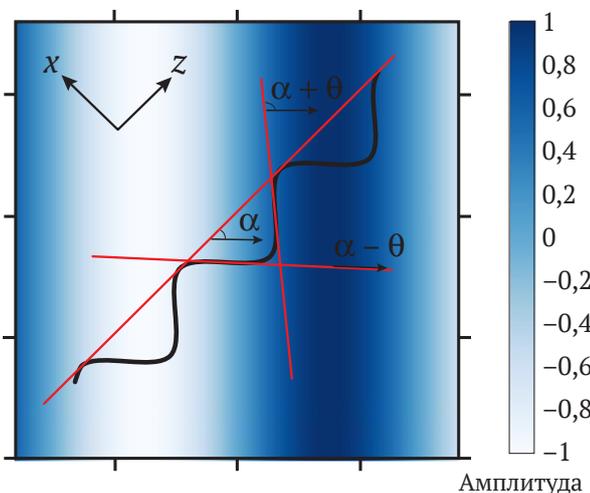


Рис. 7. Спиральное волокно в поле плоской упругой монохроматической волны

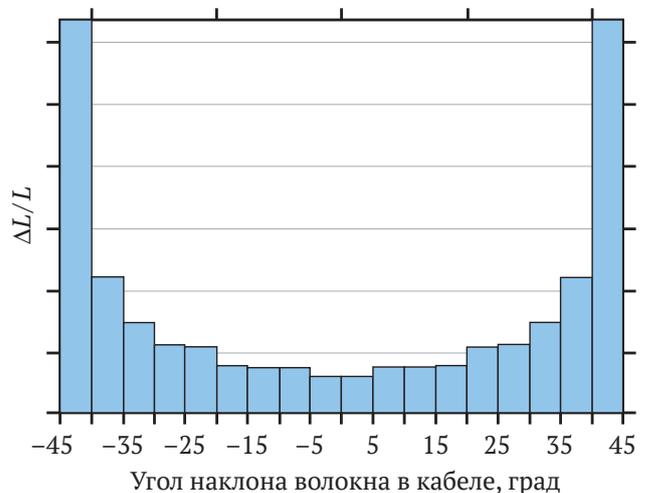


Рис. 8. Распределение углов наклона волокна относительно оси кабеля при спиральной намотке  $45^\circ$

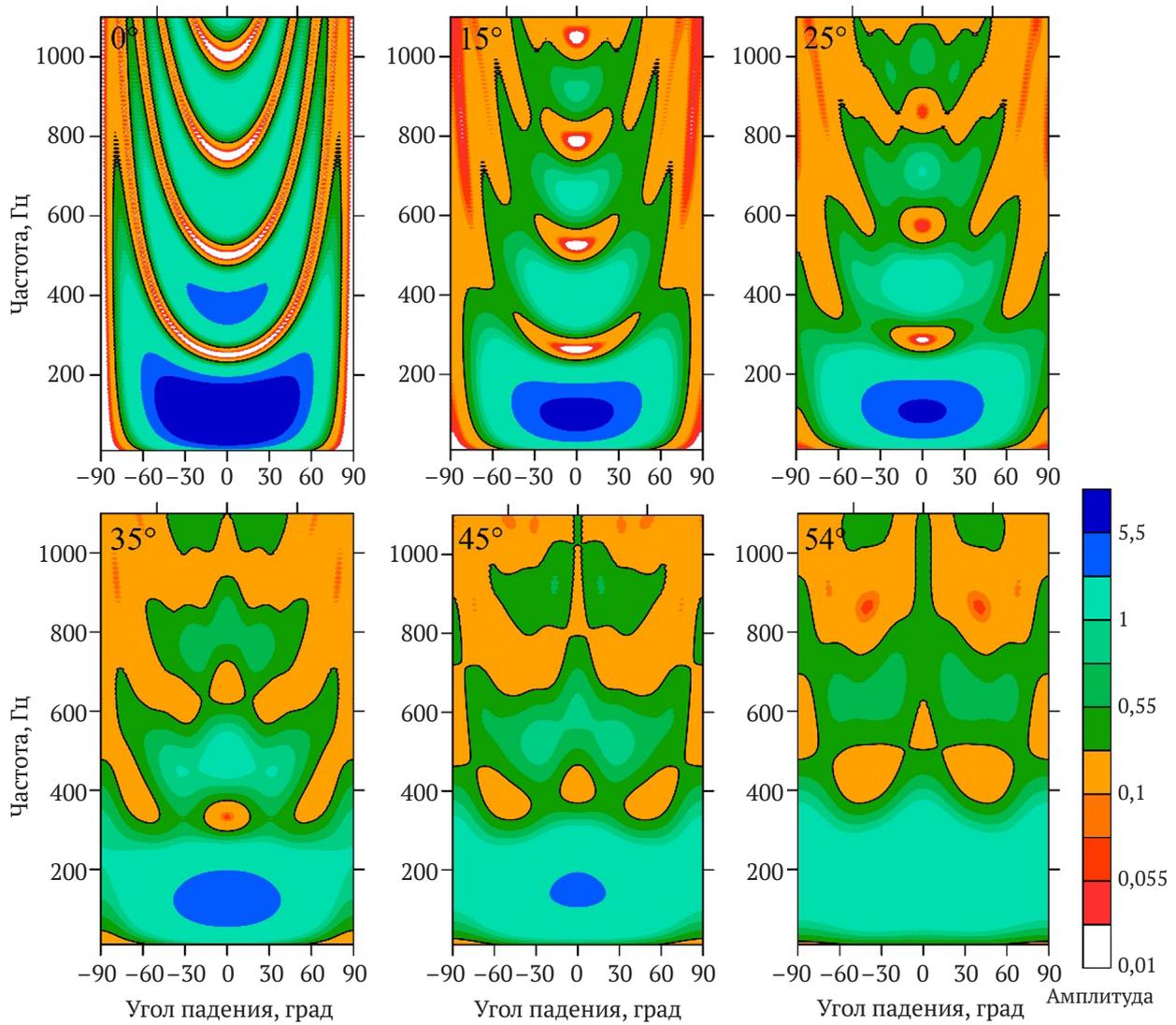


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики кабеля для различных углов намотки волокна

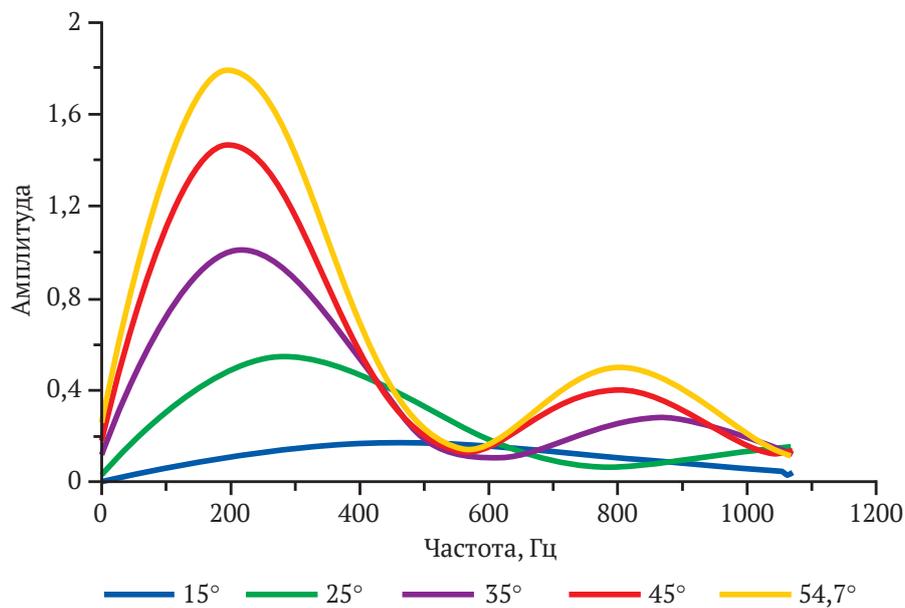


Рис. 10. Поперечная чувствительность кабеля со спиральным уложением волокна при различных углах намотки

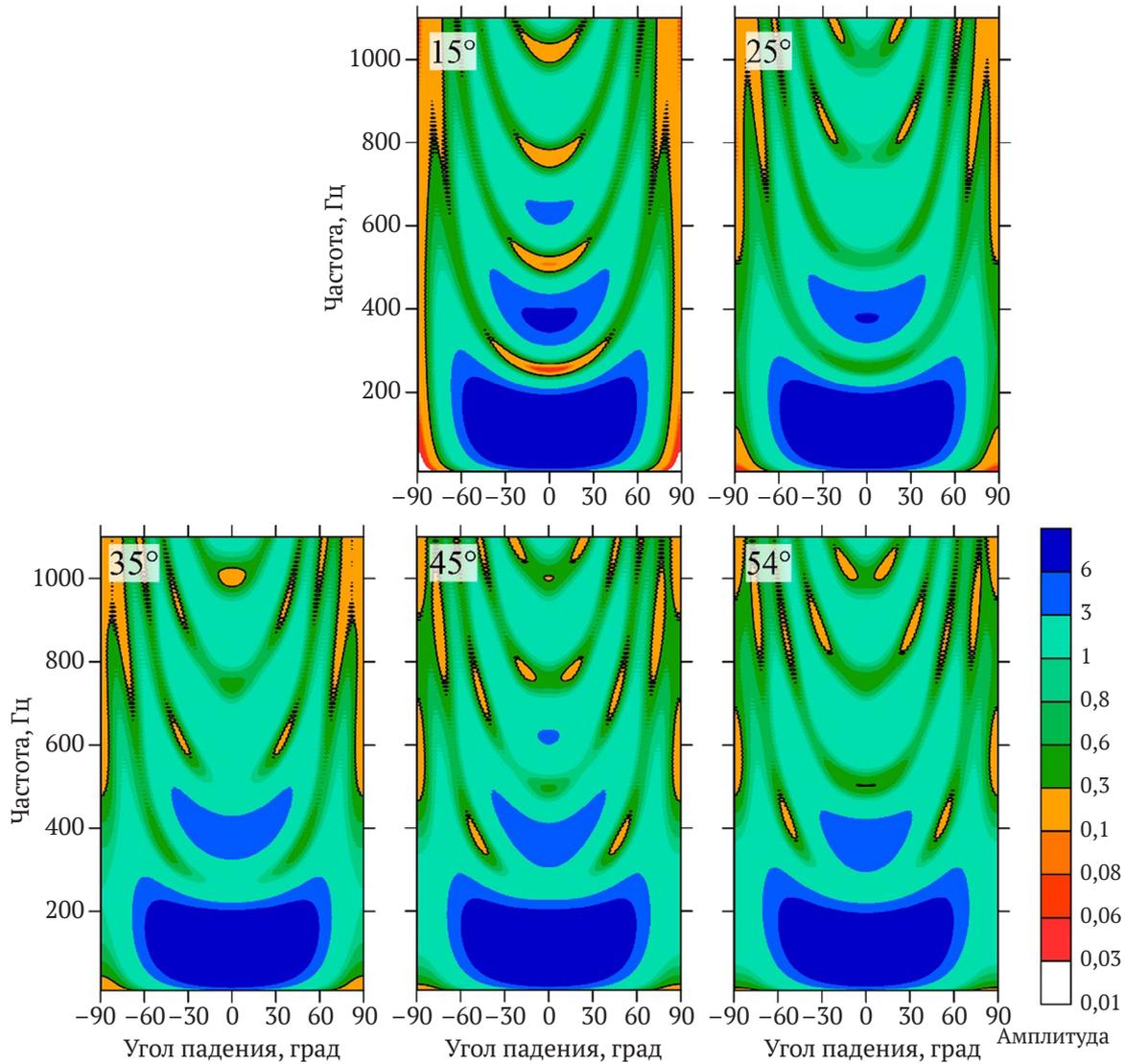


Рис. 11. Амплитудно-частотные характеристики суммарного сигнала с прямого и спирального волокна с различными углами намотки

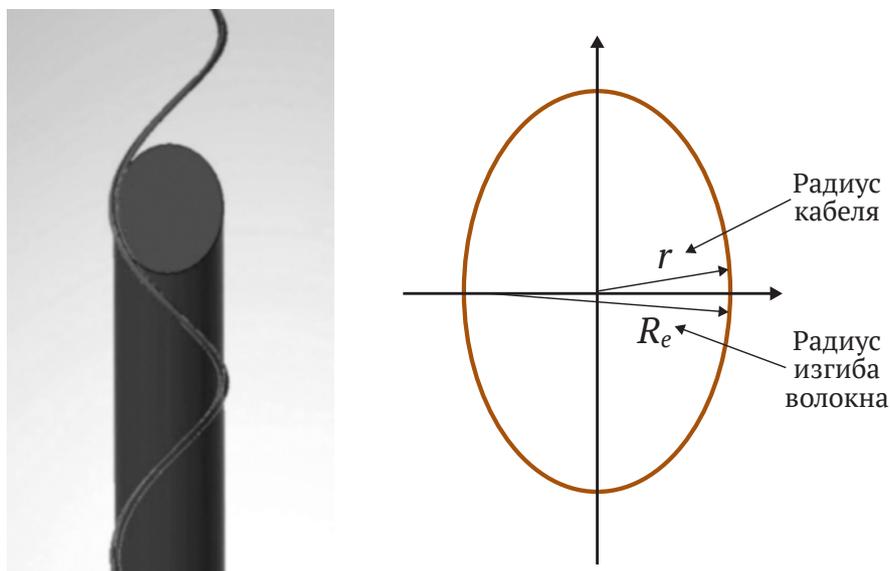


Рис. 12. Схема определения эффективного радиуса изгиба волокна



Принимая  $R_c$  в качестве фиксированного значения, определяемого выбранным типом волокна, можно получить зависимость радиуса кабеля от угла намотки  $\theta$ :  $r = R_c \sin^2 \theta$ . Масса такого кабеля будет пропорциональна  $\sin^4 \theta$ .

Для волокна стандарта G657.A2 радиус изгиба, при котором не возникает потерь на значительном количестве витков, составляет 30 мм. Исходя из такого значения радиуса и угла намотки  $45^\circ$  спроектирован кабель, содержащий одновременно прямое и спиральное волокно. Внешний диаметр кабеля составляет 32,6 мм, масса 721 кг/км. Такой кабель может быть использован как для поверхностных сейсмических измерений, так и для скважинных.

### Заключение

Анализ физико-геометрических процессов регистрации акустических сигналов распределенной оптоволоконной системой позволил получить пространственно-временные характеристики таких систем для прямого и спирального уложения волокна в кабеле.

Амплитудно-частотные характеристики сигналов, регистрируемых спирально закрученным волокном, зависят от нескольких ключевых факторов: интегрирования измеряемого значения вдоль волокна на базе измерения, угла падения волны на кабель и угла намотки волокна в кабеле. Удалось показать, что увеличение угла намотки повышает равномерность амплитудно-частотной характеристики продольных волн как по частотам, так и по углам падения.

В то же время спиральная намотка меняет эффективную базу измерения сигнала, что позволяет путем суммирования сигналов прямого и спирального волокна за счет перекрытия спектров выполнять регистрацию частот, подавляемых при отдельной регистрации.

По результатам исследования предложена конструкция кабеля для регистрации широкополосных сейсмоакустических сигналов, с помощью которых можно выполнять сейсморазведочные исследования как в скважинах, так и на поверхности, и решать обширный круг горнотехнических и инженерных задач.

### Список литературы / References

1. Mateeva A., Mestayer J., Cox B. et al. Advances in distributed acoustic sensing (DAS) for VSP. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*. Society of Exploration Geophysicists; 2012. <https://doi.org/10.1190/segam2012-0739.1>
2. Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M. Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications. *First Break*. 2014;32(2):61–69. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034>
3. Wu X., Willis M.E., Palacios W. et al. Compressional- and shear-wave studies of distributed acoustic sensing acquired vertical seismic profile data. *The Leading Edge*. 2017;36(12):987–993. <https://doi.org/10.1190/tle36120987.1>
4. Hartog A., Kotov O.I., Liokumovich L.B. The optics of distributed vibration sensing. In: *Second EAGE Workshop on Permanent Reservoir Monitoring 2013 – Current and Future Trends*. Netherlands: EAGE Publications BV; 2013. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20131301>
5. Shatalin S.V., Treschikov V.N., Rogers A.J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing. *Applied Optics*. 1998;37(24):5600–5604. <https://doi.org/10.1364/AO.37.005600>
6. Dean T., Papp B., Hartog A. Wavenumber response of data recorded using distributed fibre-optic systems. In: *3rd EAGE Workshop on Borehole Geophysics*. Netherlands: EAGE Publications BV; 2015. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201412215>
7. Dean T., Cuny T., Hartog A. H. The effect of gauge length on axially incident P-waves measured using fibre optic distributed vibration sensing: Gauge length effect on incident P-waves. *Geophysical Prospecting*. 2017;65(1):184–193. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12419>
8. Bona A., Dean T., Correa J. et al. Amplitude and phase response of DAS receivers. In: *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*. Netherlands: EAGE Publications BV; 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701200>
9. Stork A.L., Baird A.F., Horne S.A. et al. Application of machine learning to microseismic event detection in distributed acoustic sensing data. *Geophysics*. 2020;85(5):KS149–KS160. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0774.1>
10. Näsholm S.P., Iranpour K., Wuestefeld A. et al. Array signal processing on distributed acoustic sensing data: Directivity effects in slowness space. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2022;127(2). <https://doi.org/10.1029/2021JB023587>
11. Willis M.E., Barfoot D., Ellmauthaler A., Wu X. et al. Quantitative quality of distributed acoustic sensing vertical seismic profile data. *The Leading Edge*. 2016;35(7):605–609. <https://doi.org/10.1190/tle35070605.1>
12. Судакова М.С., Белов М.В., Понимаскин А.О. и др. Особенности обработки данных вертикального сейсмического профилирования морских малоглубинных скважин с волоконно-оптическими распределенными системами. *Геофизика*. 2021;(6):110–118.
13. Riedel M., Cosma C., Enescu N. et al. Features of processing vertical seismic profiling data of offshore shallow wells with fiber-optic distributed systems. *Journal of Geophysics*. 2021;(6):110–118. (In Russ.)
14. Riedel M., Cosma C., Enescu N. et al. Underground Vertical Seismic Profiling with conventional and fiber-optic systems for exploration in the Kylylahti polymetallic mine, eastern Finland. *Minerals (Basel)*. 2018;8(11):538. <https://doi.org/10.3390/min8110538>



14. Bellefleur G., Schetselaar E., Wade D. et al. Vertical seismic profiling using distributed acoustic sensing with scatter-enhanced fibre-optic cable at the Cu–Au New Afton porphyry deposit, British Columbia, Canada. *Geophysical Prospecting*. 2020;68(1):313–333. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12828>

15. Yaroslavtsev A. G., Fatkin K. B. Mine seismic surveys for the control of safety pillars in potash mines. In: *Engineering and Mining Geophysics 2020*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2020. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202051043>

16. Санфи́ров И.А., Яро́славцев А.Г., Чу́гаев А.В. и др. Контроль формирования ледопородного ограждения шахтного ствола комплексом наземных и скважинных сейсморазведочных методов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2020;(3):34–46. <https://doi.org/10.15372/FTRPI20200304>

Sanfirov I. A., Yaroslavtsev A. G., Chugaev A. V. et al. Frozen wall construction control in mine shafts using land and borehole seismology techniques. *Journal of Mining Science*. 2020;56(3):359–369. <https://doi.org/10.1134/S1062739120036641>

17. Chugaev A. V., Sanfirov I. A., Lisin V. P. et al. The integrated borehole seismic surveys at the verkhnekamskoye potassium salt deposit. In: *Lecture Notes in Networks and Systems*. Vol. 342. Cham: Springer International Publishing; 2022. Pp. 255–269. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89477-1\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89477-1_25)

18. Correa J., Egorov A., Tertyshnikov K. et al. Analysis of signal to noise and directivity characteristics of DAS VSP at near and far offsets – A CO2CRC Otway Project data example. *The Leading Edge*. 2017;36(12):962–1044. <https://doi.org/10.1190/tle36120994a1.1>

19. Kuvshinov B. N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves. *Geophysical Prospecting*. 2016;64(3):671–688. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12303>

20. den Boer J. J., Mateeva A., Pearce J. G. et al. *Detecting broadside acoustic signals with a fiber optical distributed acoustic sensing (DAS) assembly*. Standard Patent WO2013/090544/A1, 2013. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6a/52/dc/6513f050b2f66c/AU2012352253C1.pdf>

21. Tertyshnikov K., Bergery G., Freifeld B., Pevzner R. Seasonal effects on DAS using buried helically wound cables. In: *EAGE Workshop on Fiber Optic Sensing for Energy Applications in Asia Pacific*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2020. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202070007>

22. Stork A. L., Chalari A., Durucan S. et al. Fibre-optic monitoring for high-temperature Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) projects at geothermal energy sites. *First Break*. 2020;38(10):61–67. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020075>

23. Baird A. Modelling the response of helically wound DAS cables to microseismic arrivals. In: *First EAGE Workshop on Fibre Optic Sensing*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2020. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202030019>

24. Egorov A., Charara M., Alfataierge E., Bakulin A. Realistic modeling of surface seismic and VSP using DAS with straight and shaped fibers of variable gauge length. In: *First International Meeting for Applied Geoscience & Energy Expanded Abstracts*. Tulsa, OK, USA: Society of Exploration Geophysicists; 2021. Pp. 184–193. <https://doi.org/10.1190/segam2021-3576626.1>

### Информация об авторах

**Александр Валентинович Чу́гаев** – кандидат технических наук, заведующий сектором малоглубинных скважинных исследований отдела активной сейсмоакустики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7494-4042](https://orcid.org/0000-0002-7494-4042), Scopus ID [6602559950](https://scopus.com/authorid/6602559950); e-mail [chugaev@mi-perm.ru](mailto:chugaev@mi-perm.ru)

**Михаил Викторович Тарантин** – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела активной сейсмоакустики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; Scopus ID [36601605800](https://scopus.com/authorid/36601605800); e-mail [muxaul20@rambler.ru](mailto:muxaul20@rambler.ru)

### Information about the authors

**Alexander V. Chugaev** – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector of Shallow Well Research of the Department of Active Seismic Acoustics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7494-4042](https://orcid.org/0000-0002-7494-4042), Scopus ID [6602559950](https://scopus.com/authorid/6602559950); e-mail [chugaev@mi-perm.ru](mailto:chugaev@mi-perm.ru)

**Mikhail V. Tarantin** – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Department of Active Seismic Acoustics; Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; Scopus ID [36601605800](https://scopus.com/authorid/36601605800); e-mail [muxaul20@rambler.ru](mailto:muxaul20@rambler.ru)

Поступила в редакцию	04.06.2022	Received	04.06.2022
Поступила после рецензирования	01.09.2022	Revised	01.09.2022
Принята к публикации	13.12.2022	Accepted	13.12.2022