



Горный институт

Отдел активной сейсмоакустики



Количественная оценка чувствительности оптоволоконных распределенных датчиков на основании данных межскважинного просвечивания

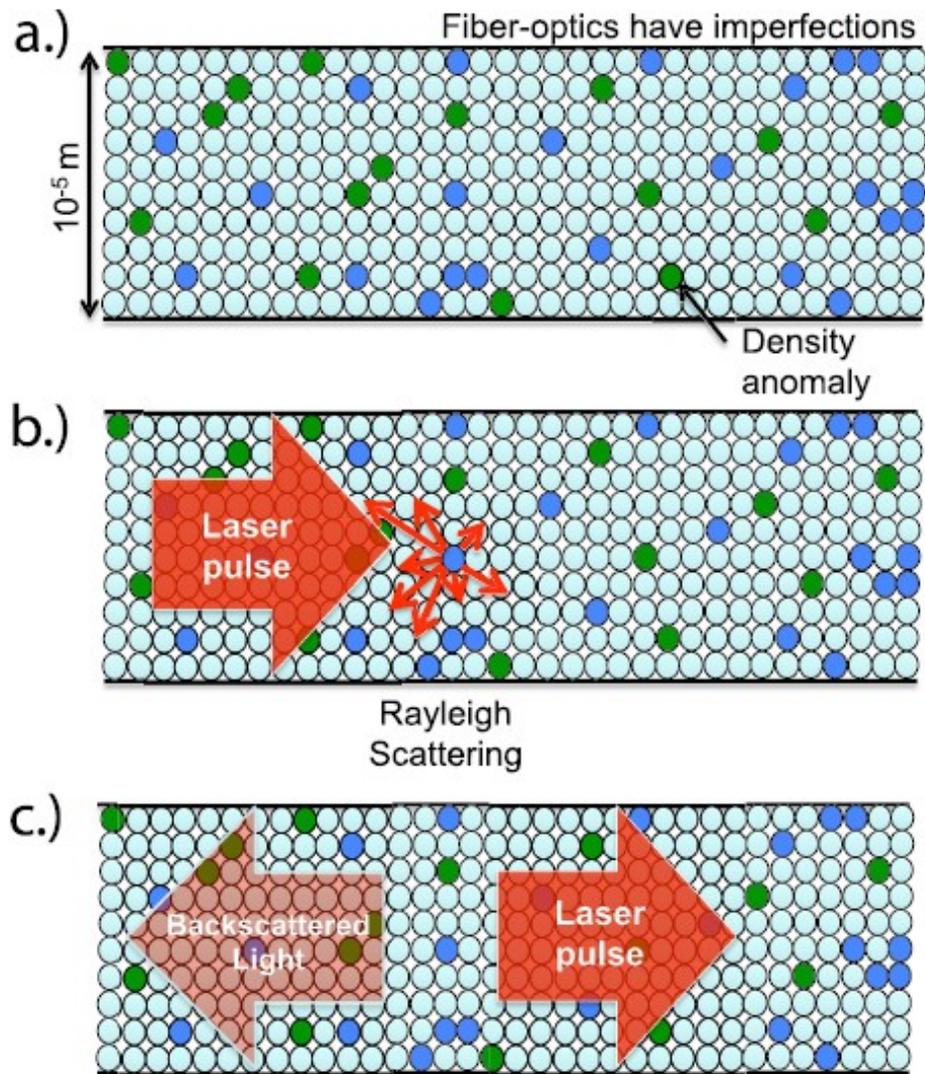
Чугаев Александр Валентинович¹

Симикин Денис Евгеньевич²

Тезиков Артемий Дмитриевич¹

¹ Горный институт УрО РАН

² ООО Петрофайбер



DAS – Distributed acoustic sensing
(Распределенные акустические датчики)

Lindsey, N. J., Rademacher, H., & Ajo-Franklin, J. B. (2020). On the broadband instrument response of fiber-optic DAS arrays. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125

Интеррогатор DAS



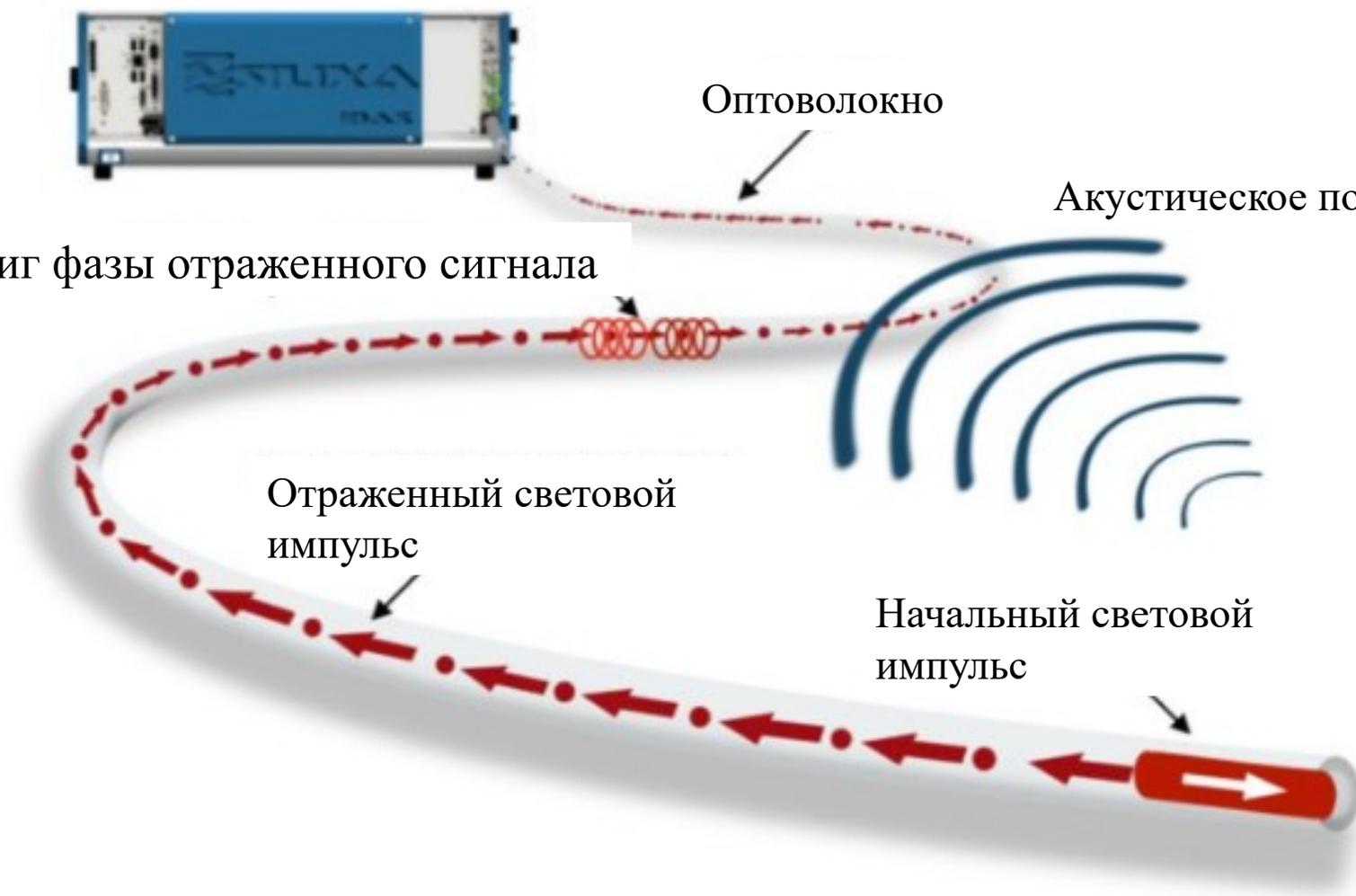
Оптоволокно

Акустическое поле

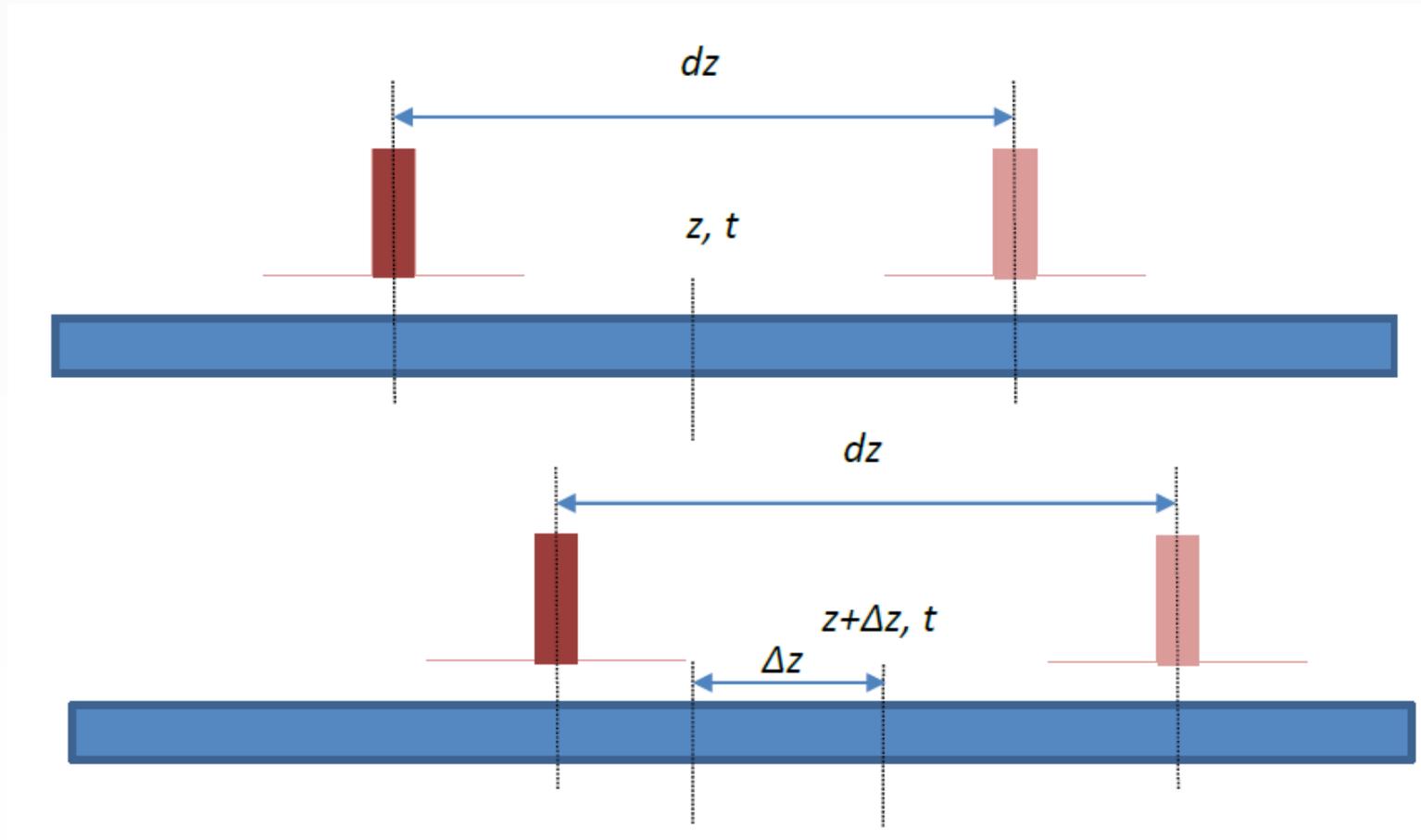
Сдвиг фазы отраженного сигнала

Отраженный световой импульс

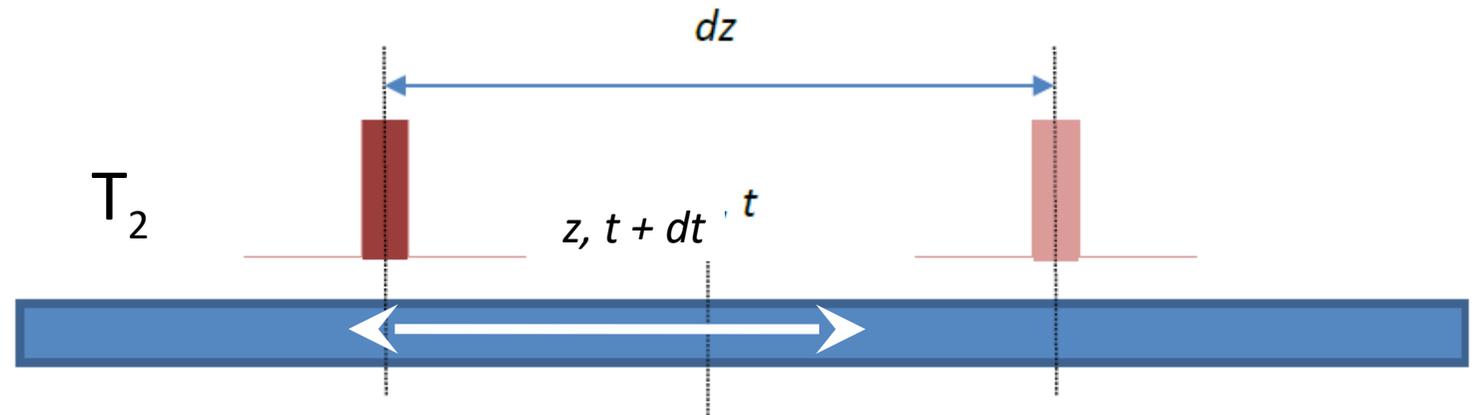
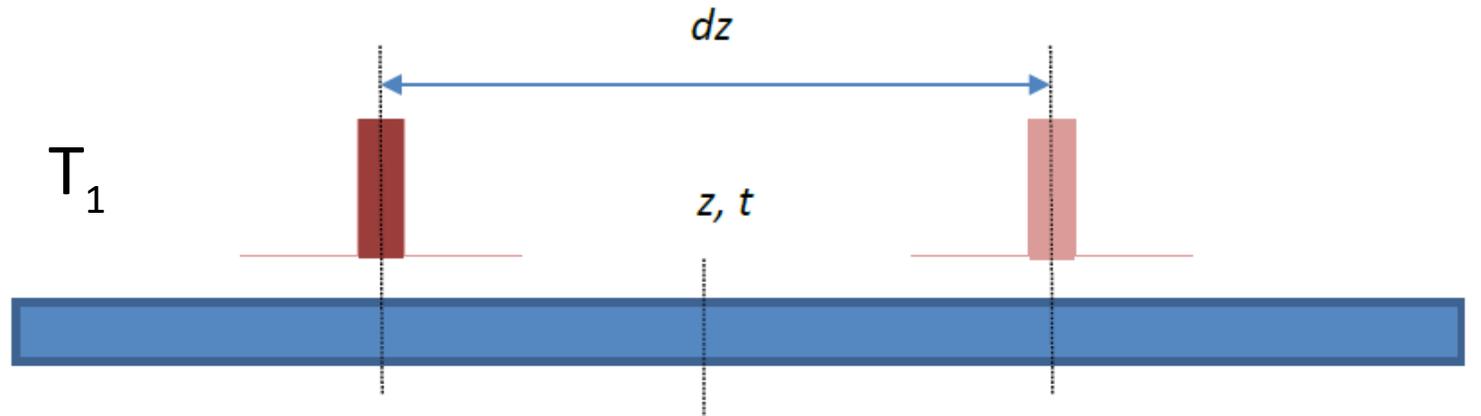
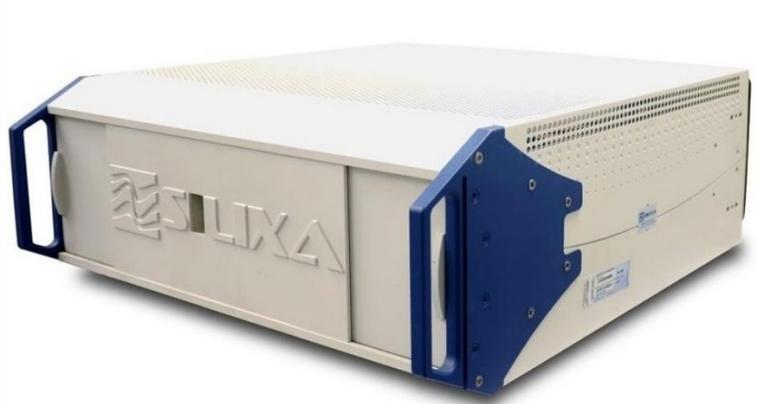
Начальный световой импульс



База приема (Gauge length) и шаг смещения



Измеряемые параметры



$$\left[u\left(z + \frac{dz}{2}, t + dt\right) - u\left(z - \frac{dz}{2}, t + dt\right) \right] - \left[u\left(z + \frac{dz}{2}, t\right) - u\left(z - \frac{dz}{2}, t\right) \right]$$

=

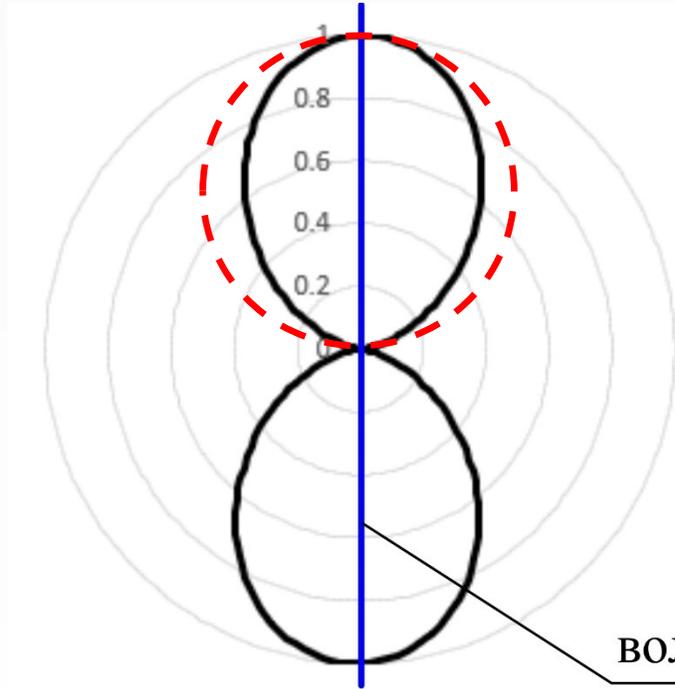
Daley et al., 2015

Диаграммы направленности оптоволоконных датчиков

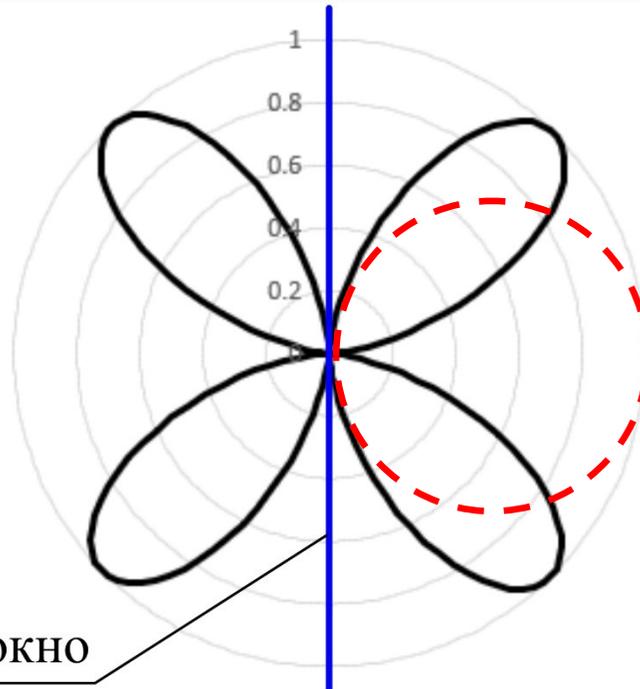
$$A = A_0 \cos^2 \alpha$$

$$A = A_0 \cos \alpha$$

$$A = A_0 |\cos \alpha \sin \alpha|$$



Продольная волна



Поперечная волна

ВОЛОКНО

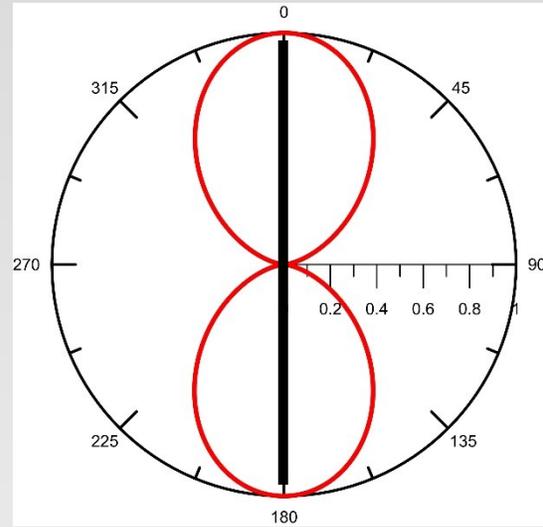


α

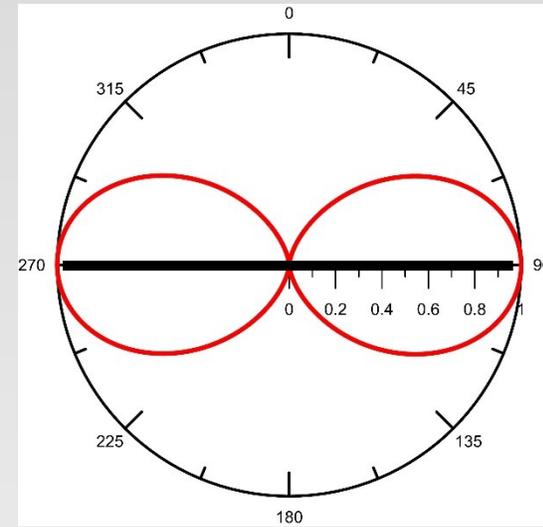
луч
падающей
волны

По материалам: Mateeva et al., 2012; Kuvshinov et al., 2016; Willis et al., 2016

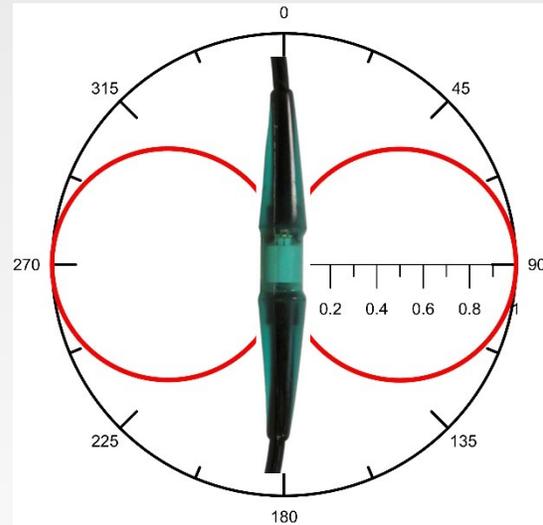
Кабель в скважине



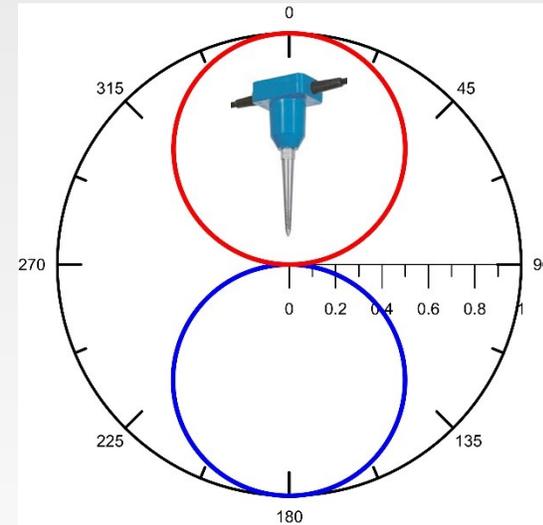
Кабель на поверхности



Гидрофон в скважине



Геофон Z



Способы изменения диаграммы направленности

(*den Boer, Meteeva A., Kuvshinov B. et al., 2013; Innanen, 2017*)

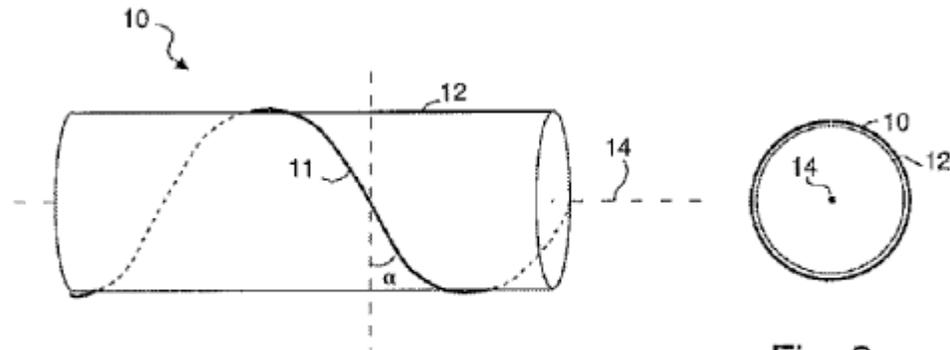


Fig. 1

Fig. 2

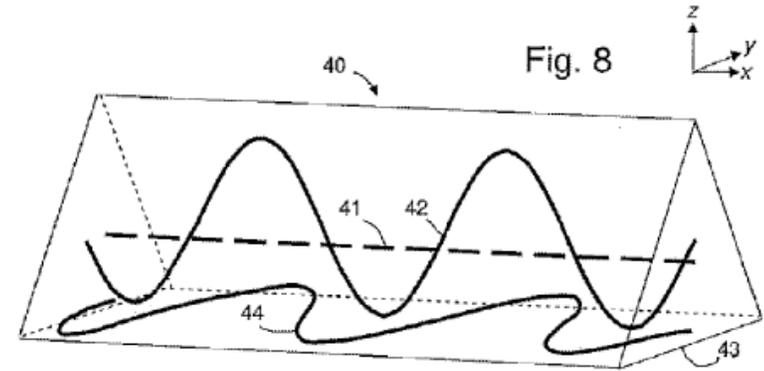
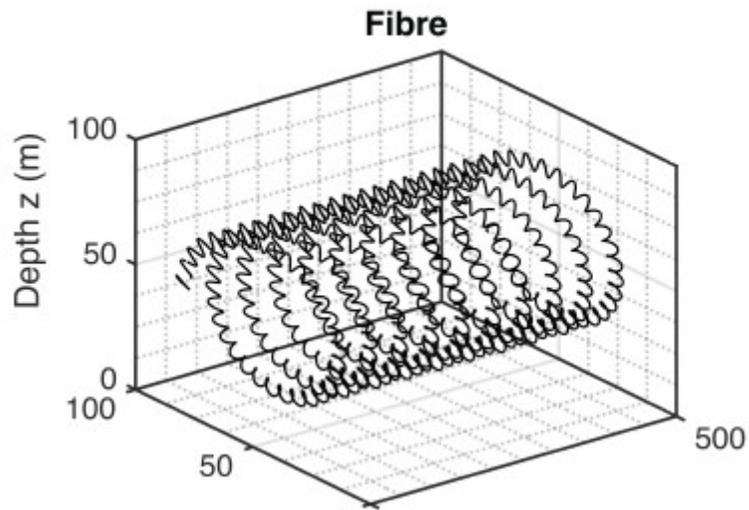


Fig. 8

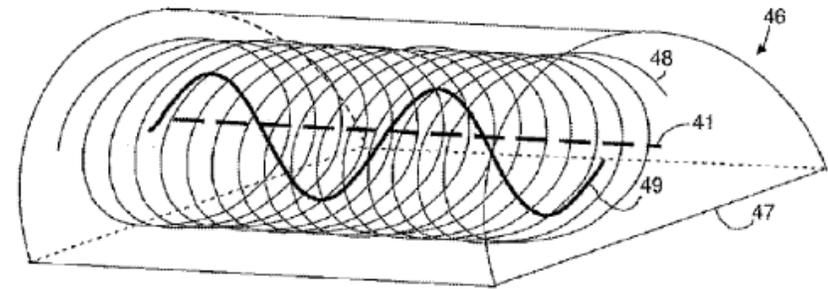
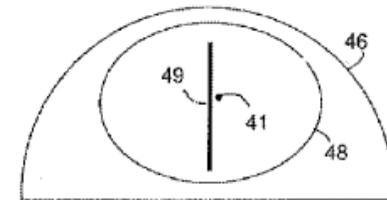
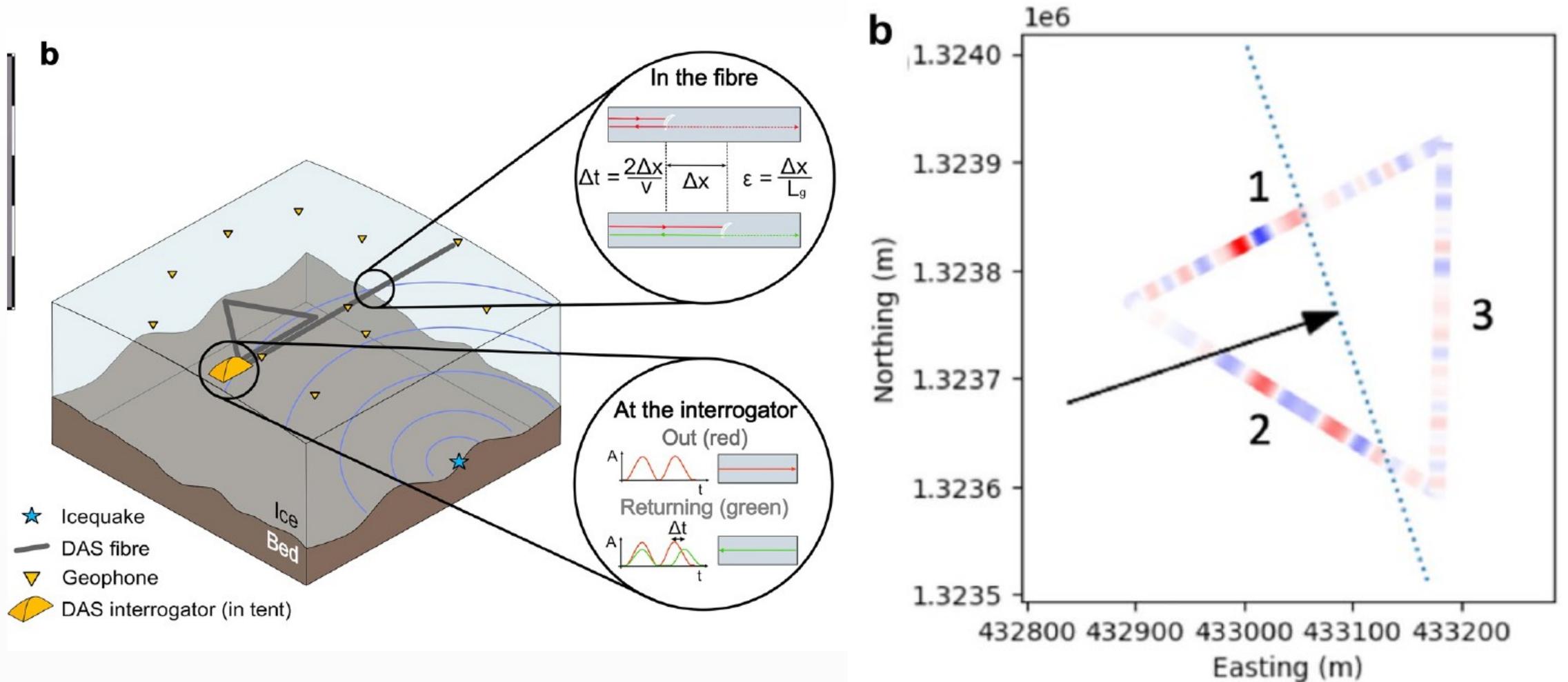


Fig. 9

Fig. 10



Вариативность систем наблюдений



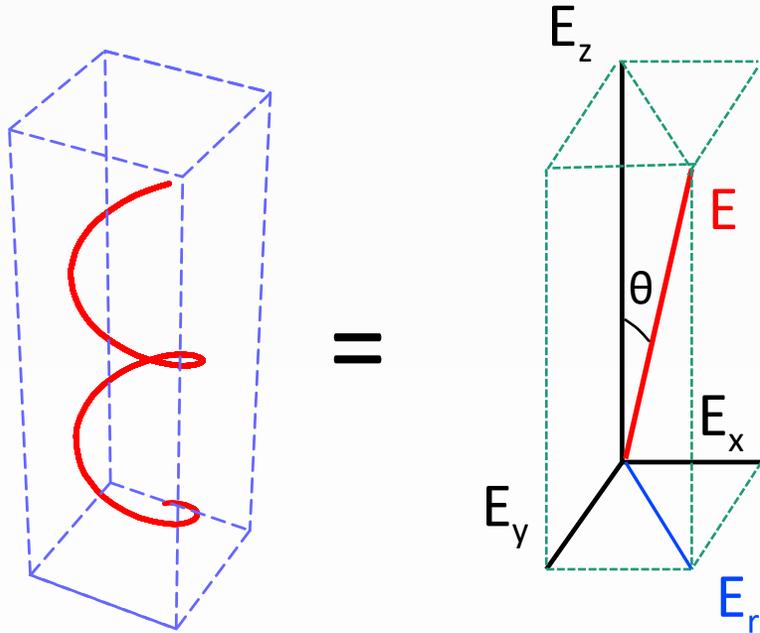
Hudson, T. S., Baird, A. F., Kendall, J. M., Kufner, S. K., Brisbourne, A. M., Smith, A. M., et al. (2021).

Distributed Acoustic Sensing (DAS) for natural microseismicity studies: A case study from Antarctica.

Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126, e2020JB021493.

<https://doi.org/10.1029/2020JB021493>

Чувствительность спирального волокна и зависимость от угла намотки

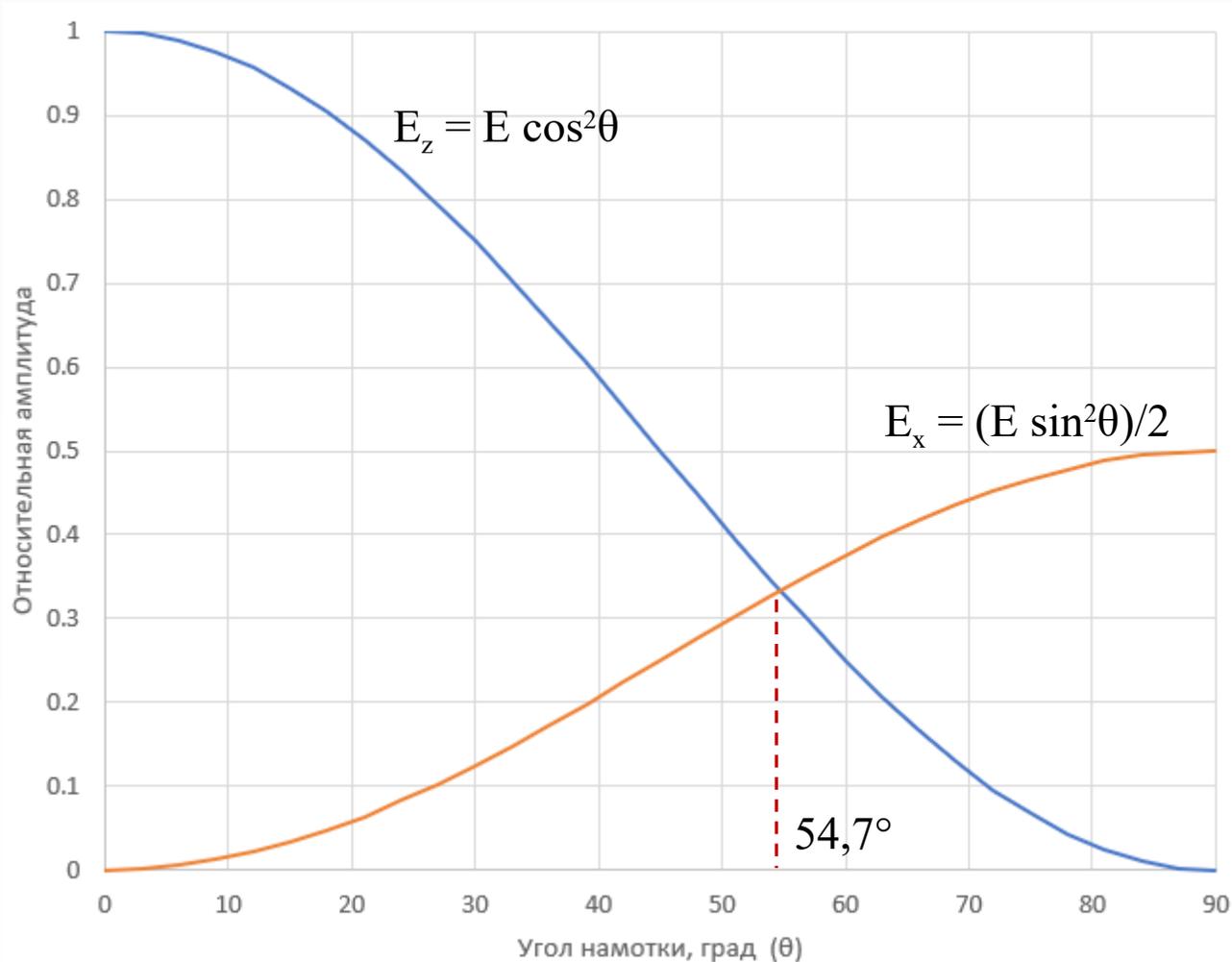


$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y + \mathbf{E}_z$$

$$\mathbf{E}_z = E \cos^2 \theta$$

$$\mathbf{E}_{x,y} = (E \sin^2 \theta) / 2$$

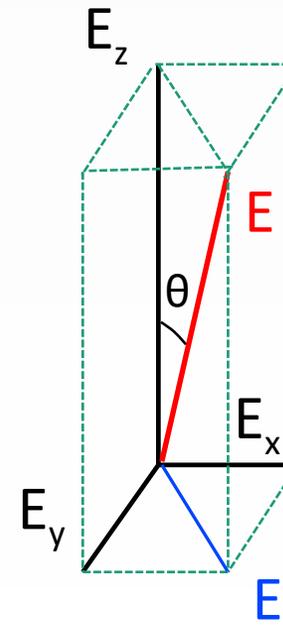
Распределение чувствительности по осям и получение равномерной диаграммы направленности



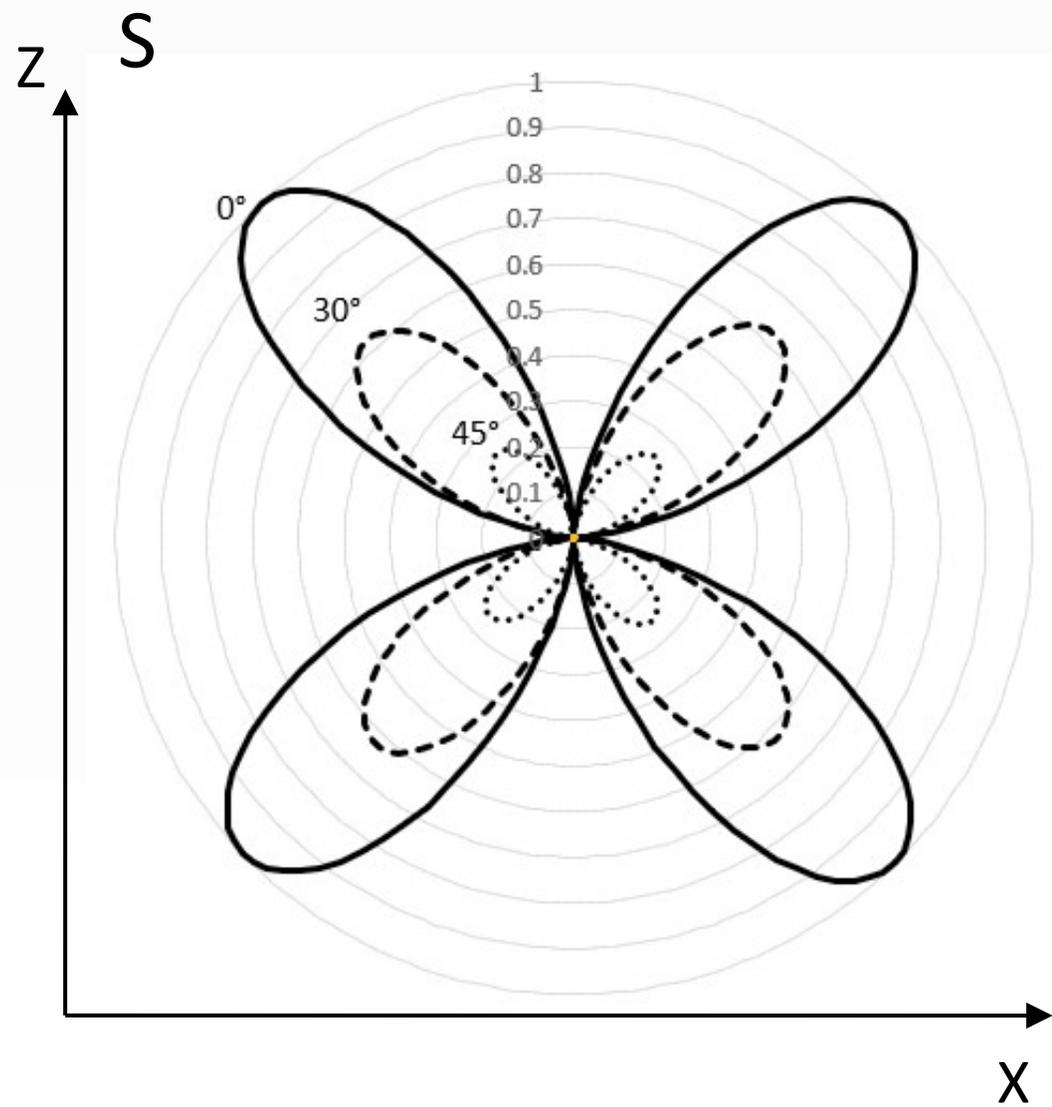
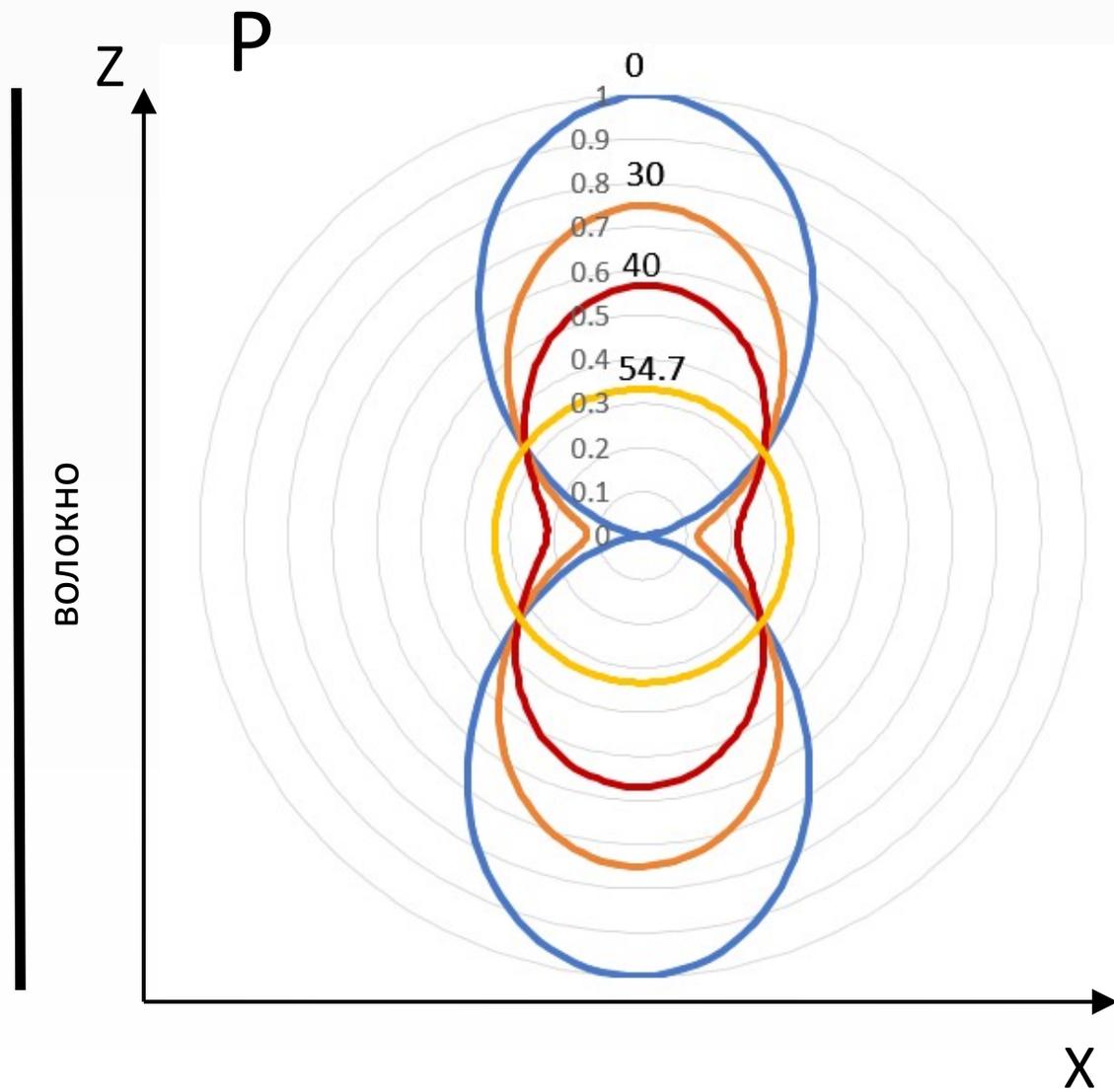
$$E_x = E_y = E_z = 1/3 E$$

$$E \cos^2\theta = 1/3 E$$

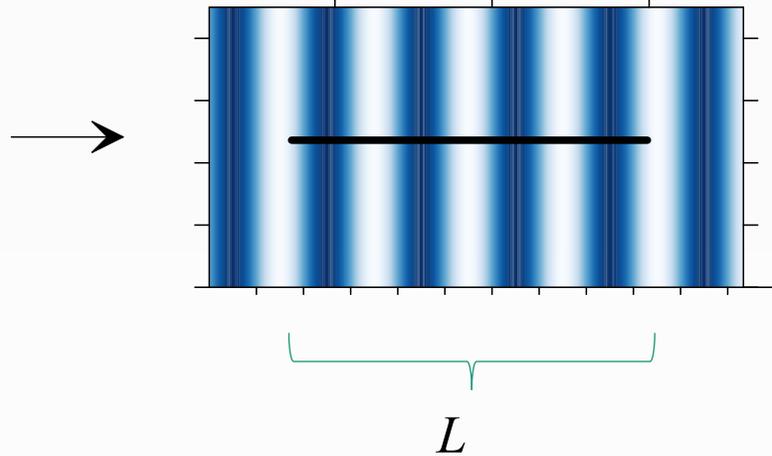
$$\arccos(1/\sqrt{3}) \approx 54,7^\circ$$



Диаграммы направленности при спиральной намотке



Амплитудно-частотный отклик линейного приемника

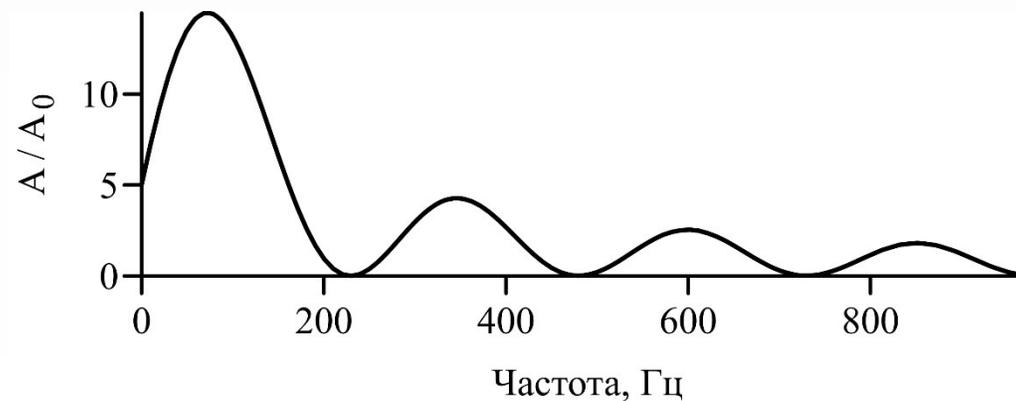


$$A(x) = A_0 \sin(kx)$$

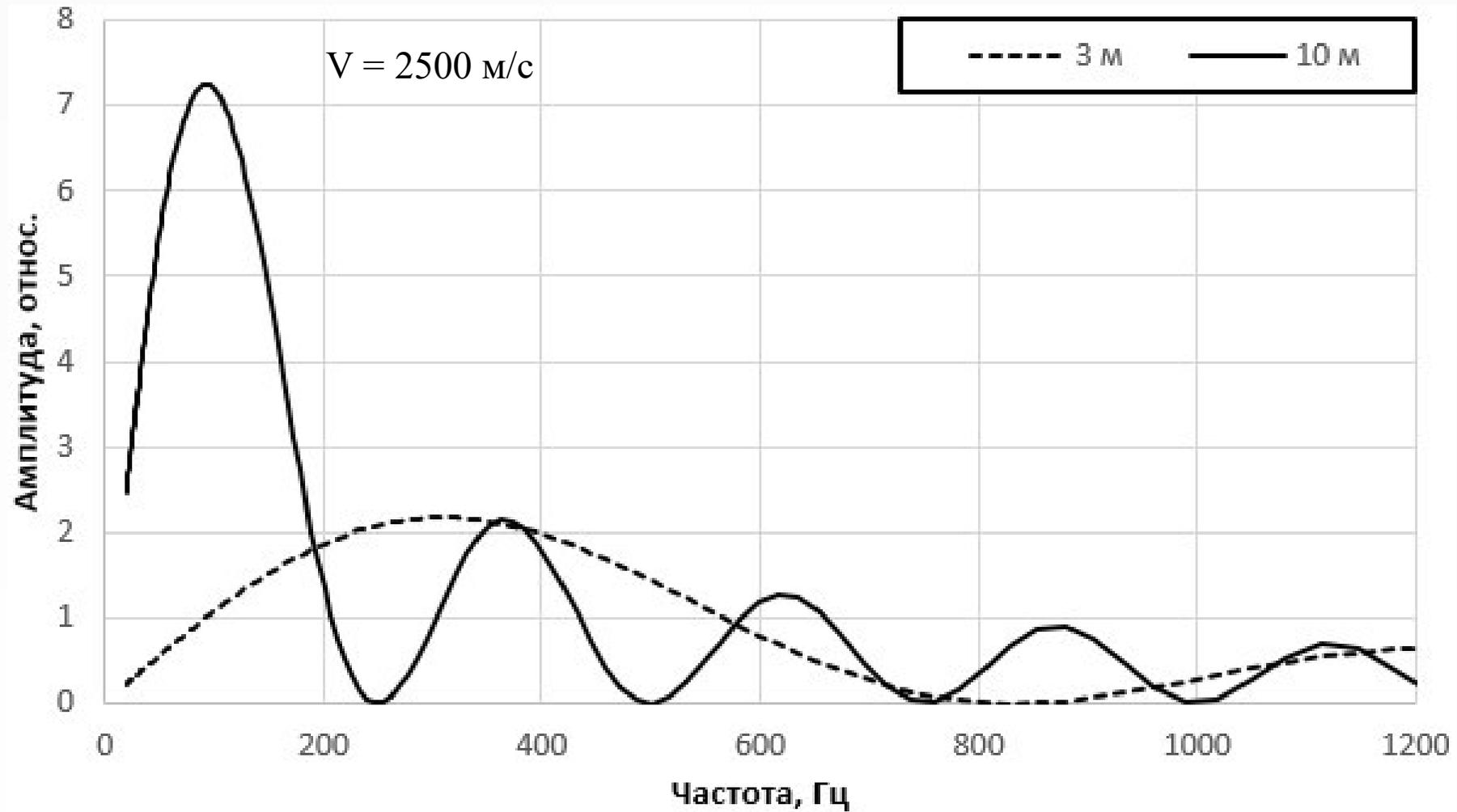
$k = 2\pi f/V$, волновое число,

A_0 – максимальная амплитуда сигнала.

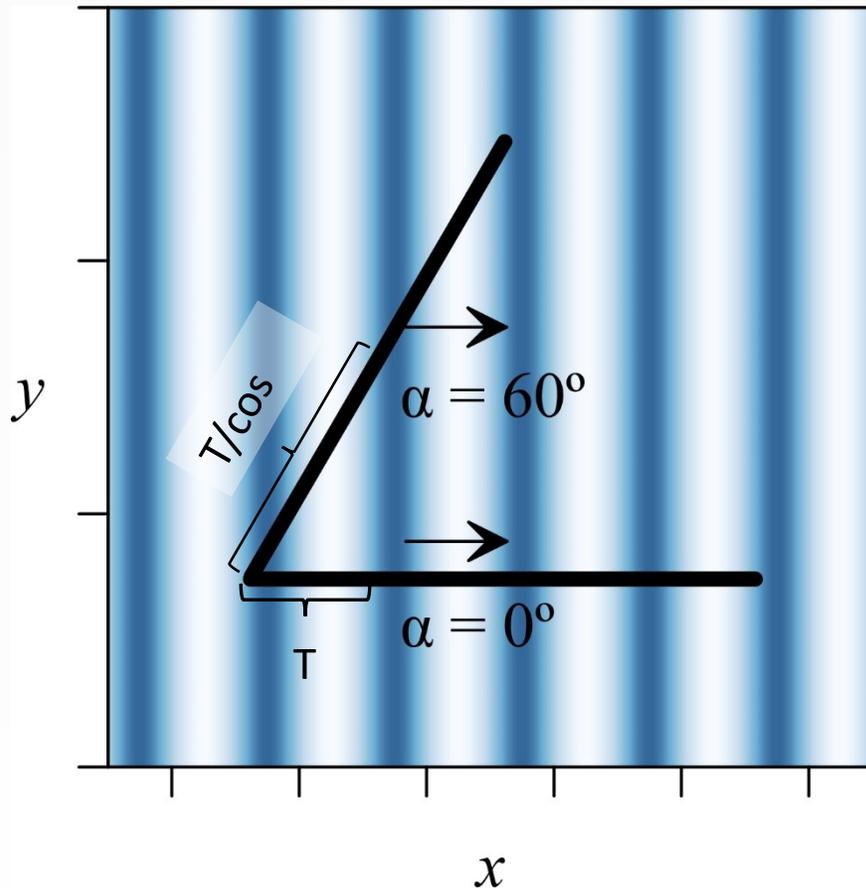
)



Амплитудно-частотные характеристики при распространении волны вдоль волокна



Видимая частота при регистрации линейным приемником



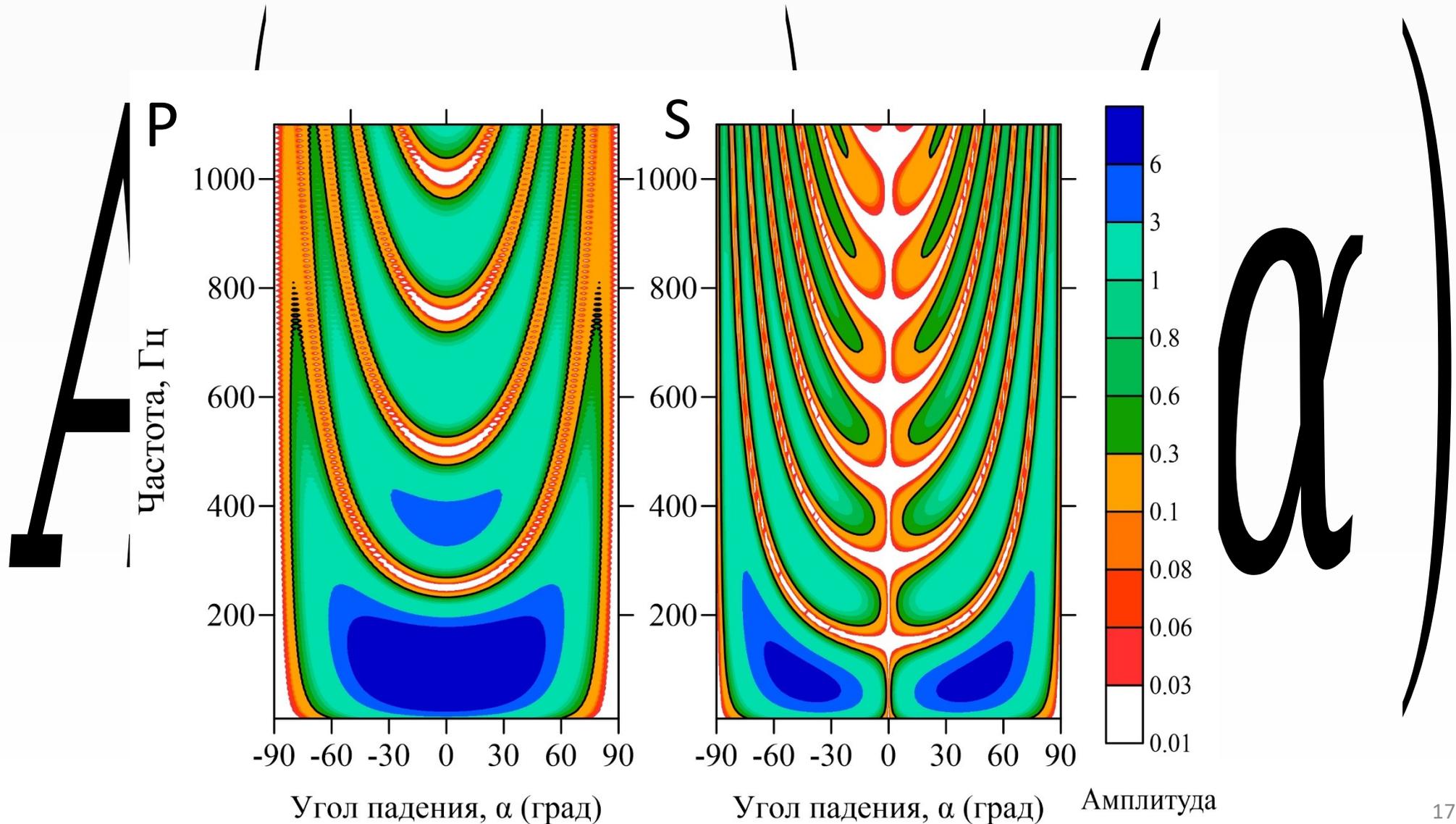
$$T_a = T / |\cos|$$

$$f_a = f |\cos|$$

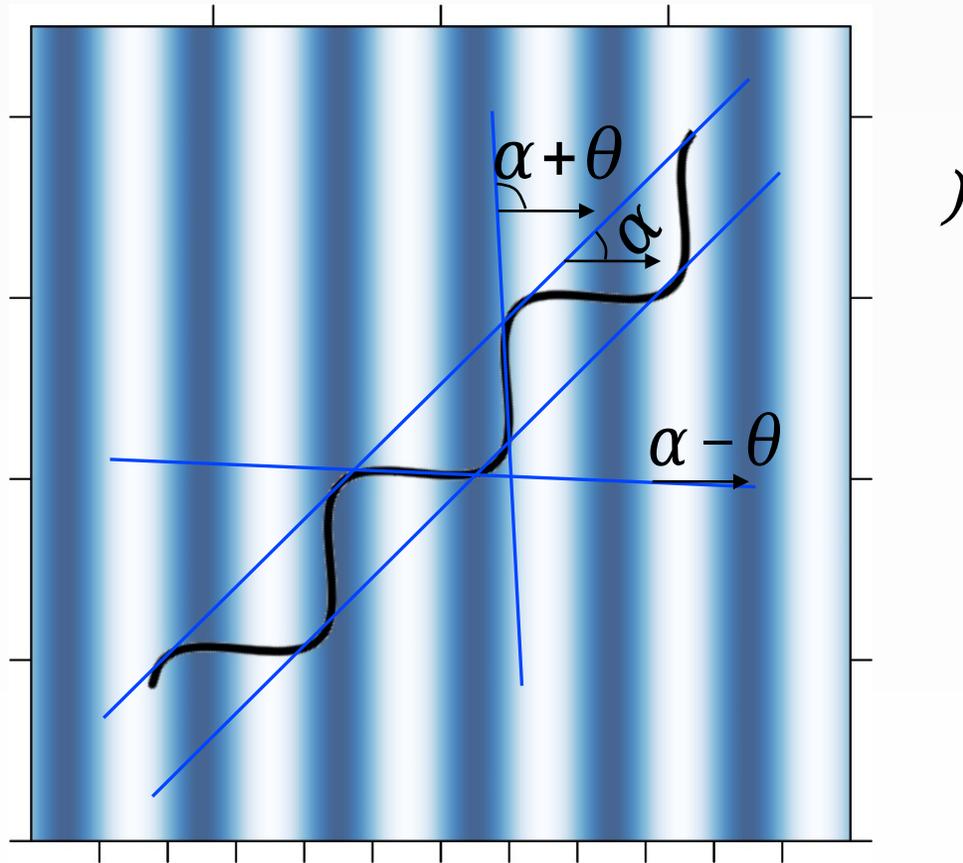
$$k_a = k |\cos|$$

$$A_L(f, \alpha) = A_0 \frac{1}{k |\cos \alpha|} \left(1 - \cos(kL |\cos \alpha|) \right) D(\alpha)$$

Зависимость АЧХ от угла падения, прямое волокно

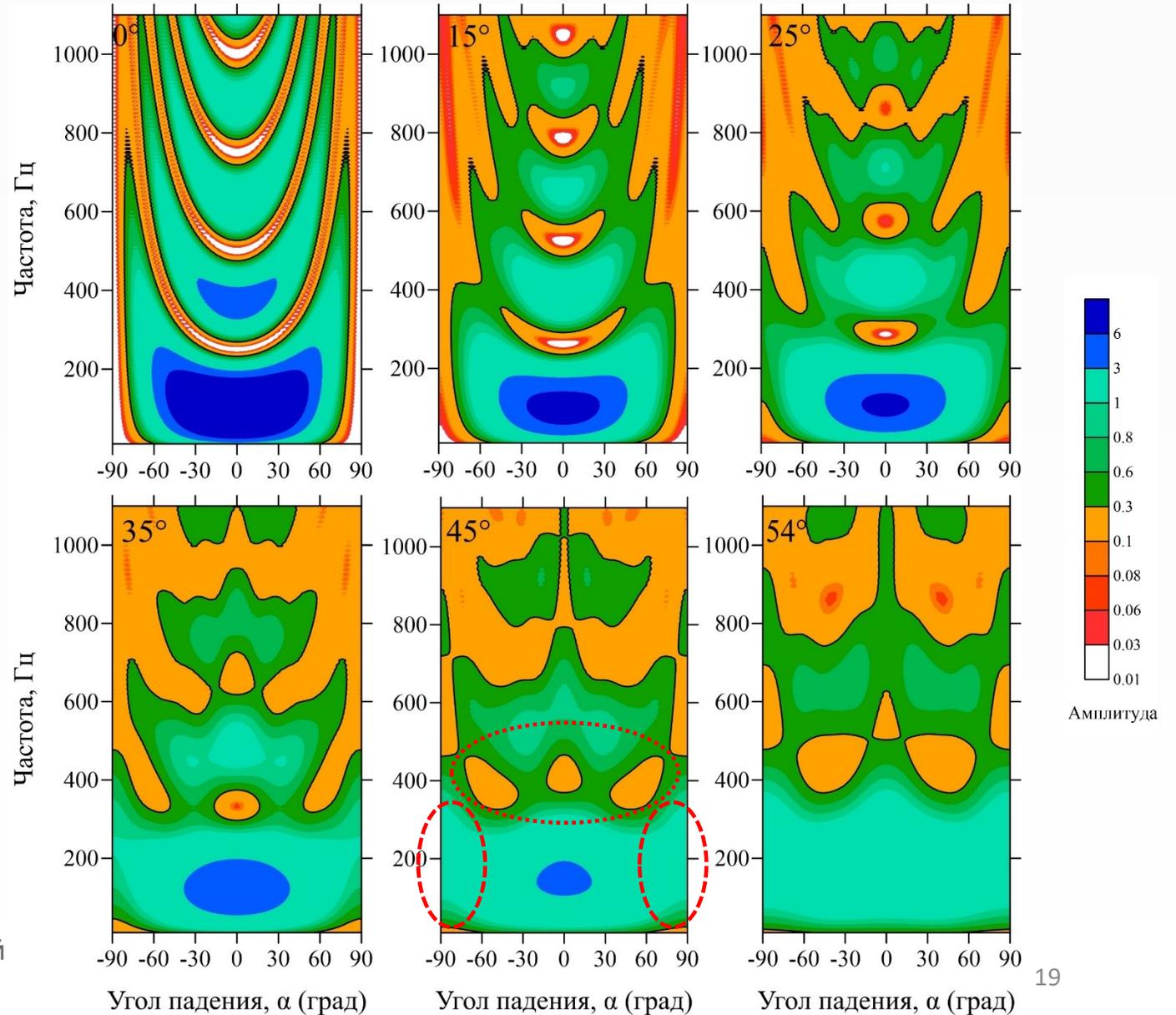
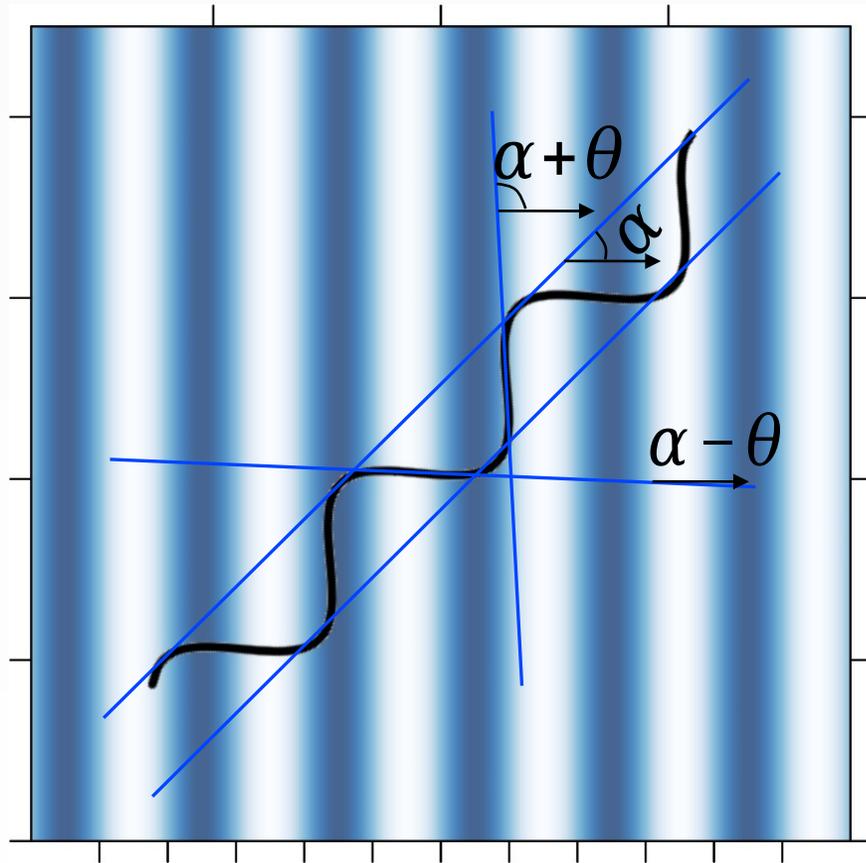


Амплитудно частотный отклик спирального кабеля



Чугаев А.В., Тарантин М.В. Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна. *Горные науки и технологии*. 2023;8(1):13-21

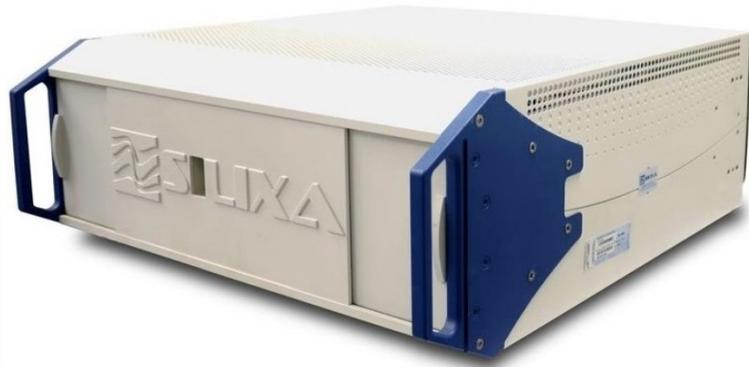
Амплитудно частотный отклик спирального кабеля



Чугаев А.В., Тарантин М.В. Амплитудно-частотный отклик распределенного акустического сенсора DAS со спиральной намоткой волокна. *Горные науки и технологии*. 2023;8(1):13-21

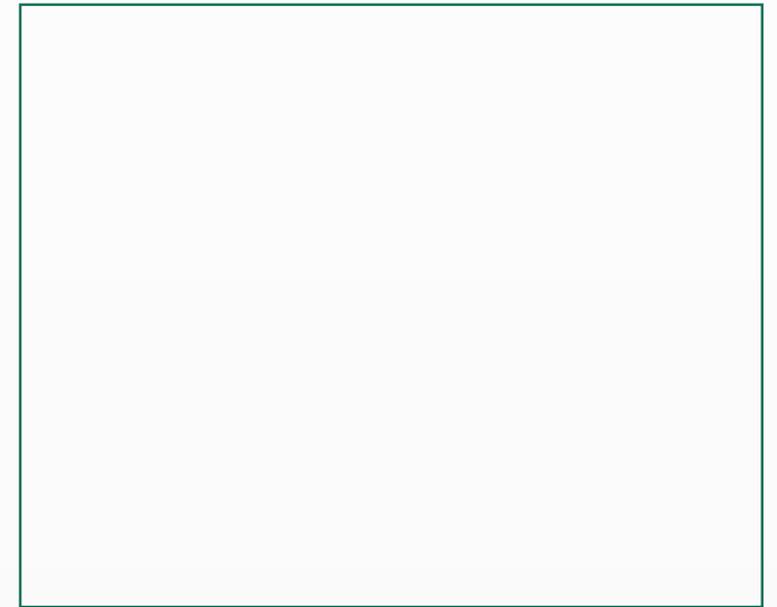
Аппаратура

Silixa iDAS 2



ВОСК-А
(ООО Петрофайбер)

Дунай (Т8),
Горизонт-5,
Optasense
и др.



Кабель-сенсор

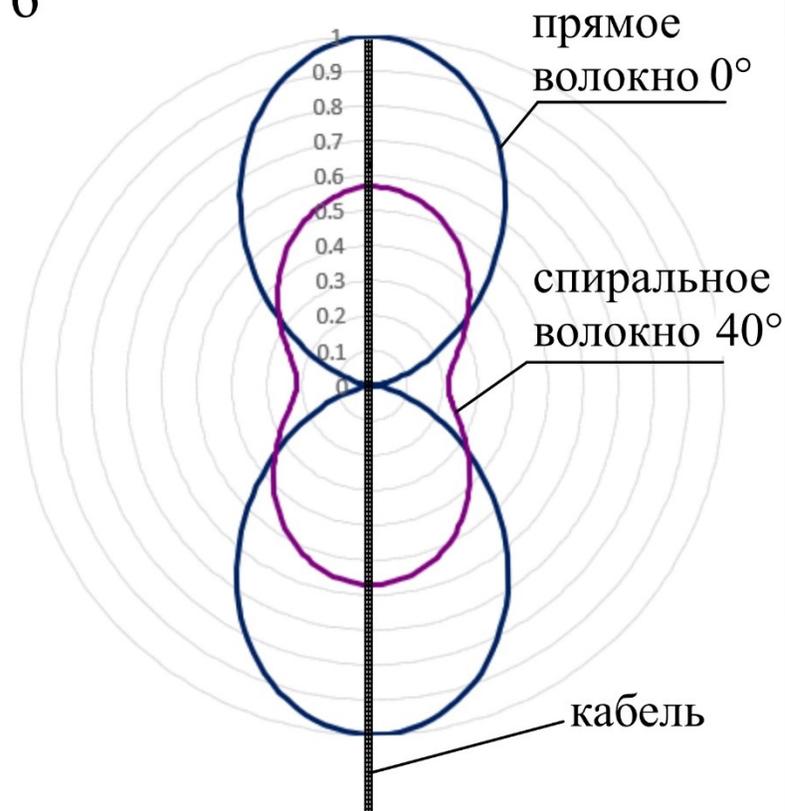


Спиральный кабель произведенный по заказу ГИ УрО РАН

а

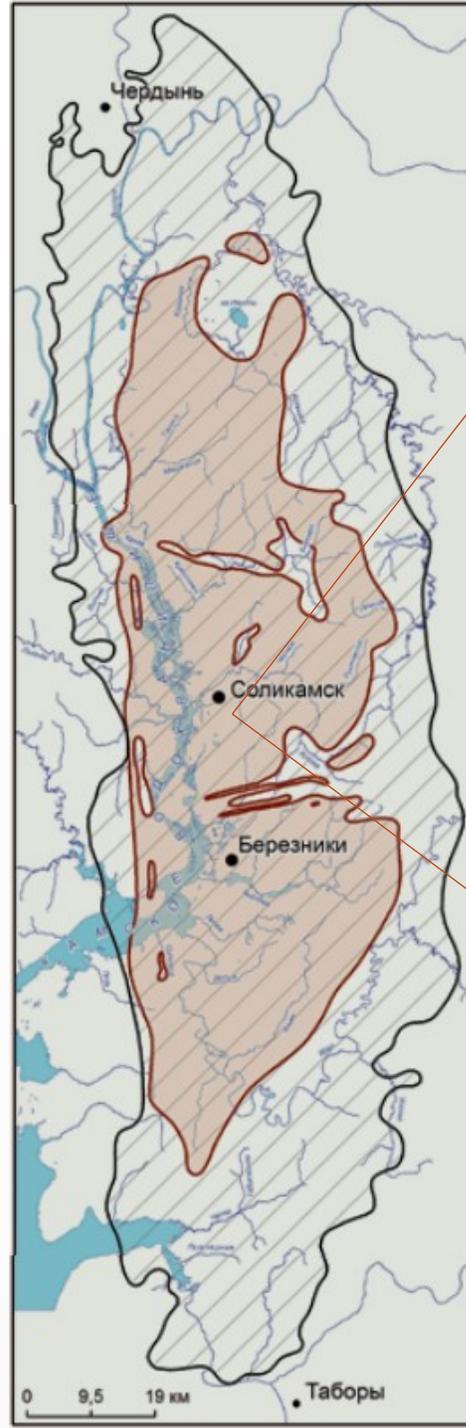
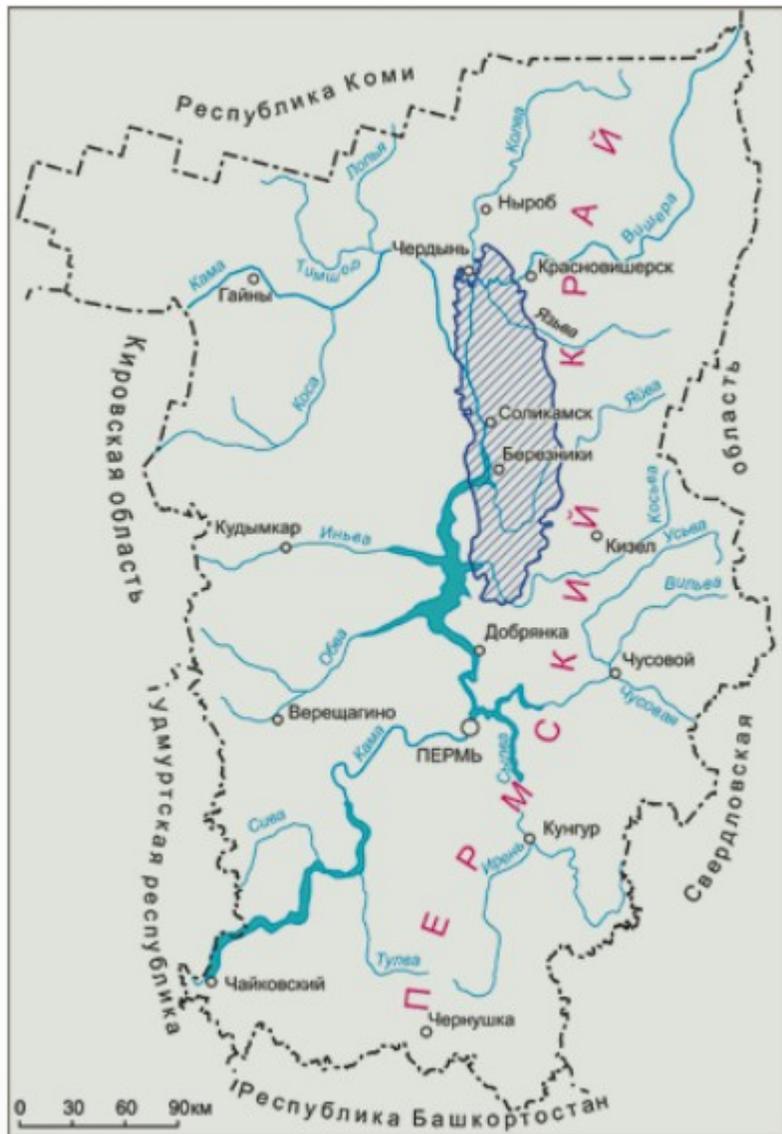


б



Практические примеры
применения
оптоволоконной системы регистрации
(DAS)

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС)



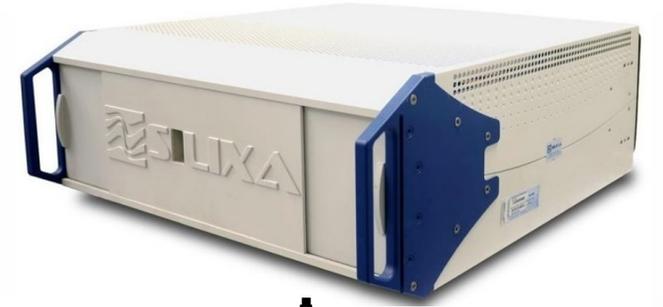
Провал на аварийном участке
в районе г. Соликамск



Маловичко А. А. Соликамское землетрясение 5
января 1995 года ($M_s=4.2$), 2001.



Система ОПТОВОЛОКОННОГО МОНИТОРИНГА



Общая оптическая длина приемной линии	6300 м
Суммарная длина полезных участков приемной линии	3100 м
Шаг пунктов приема	0.5 м
Количество регистрирующих каналов в скважинах	6200 ед
Общее оптическое затухание на линии	3.5 dB
База приема (Gauge length)	10 м
Длина записи	300 мс
Шаг дискретизации по времени	0.2 мс

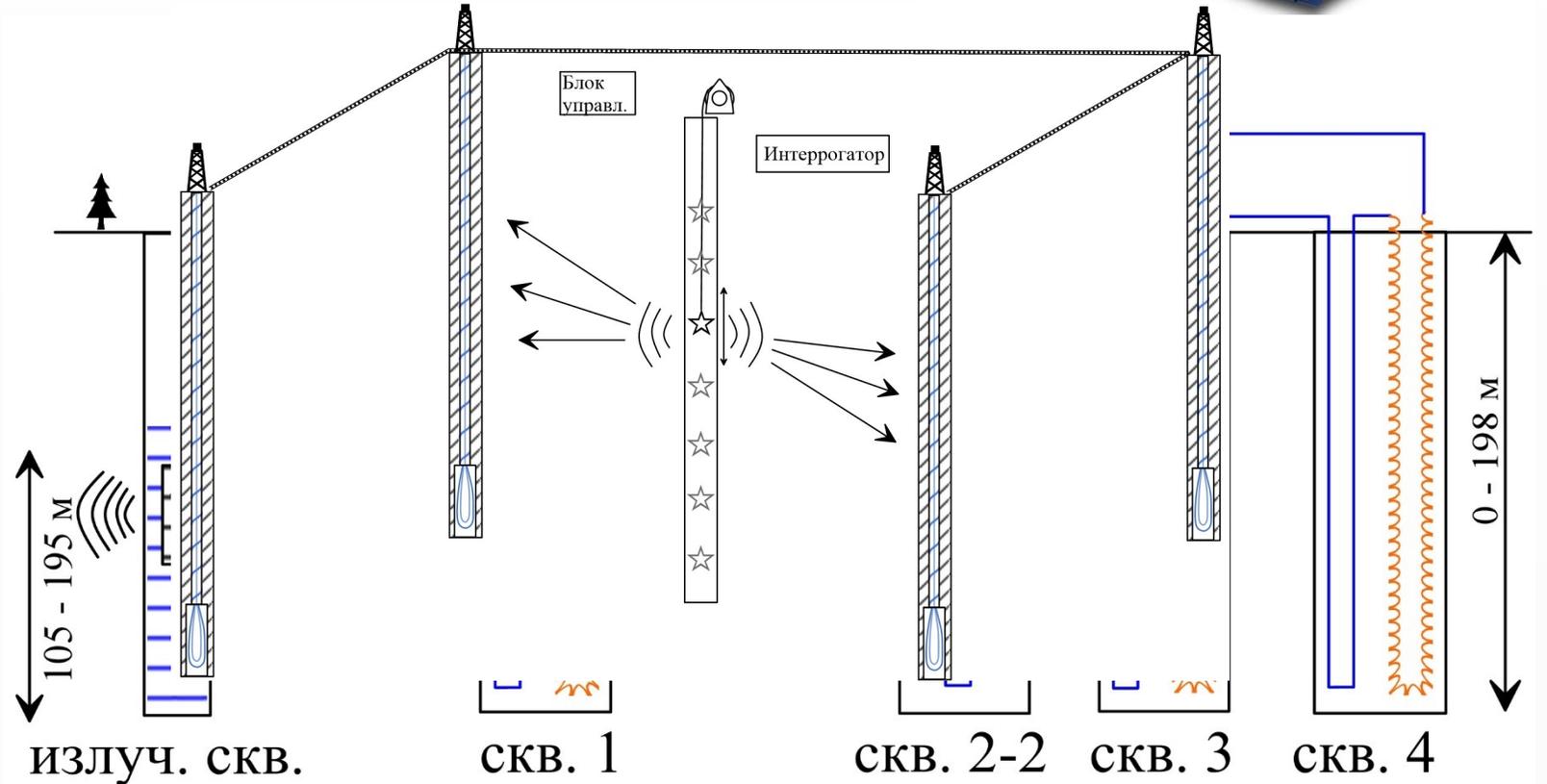
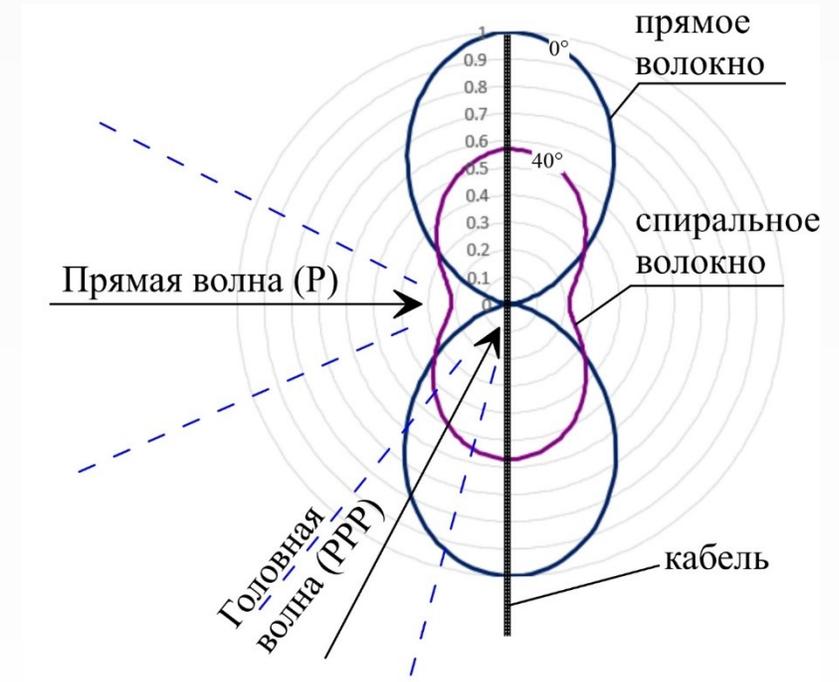
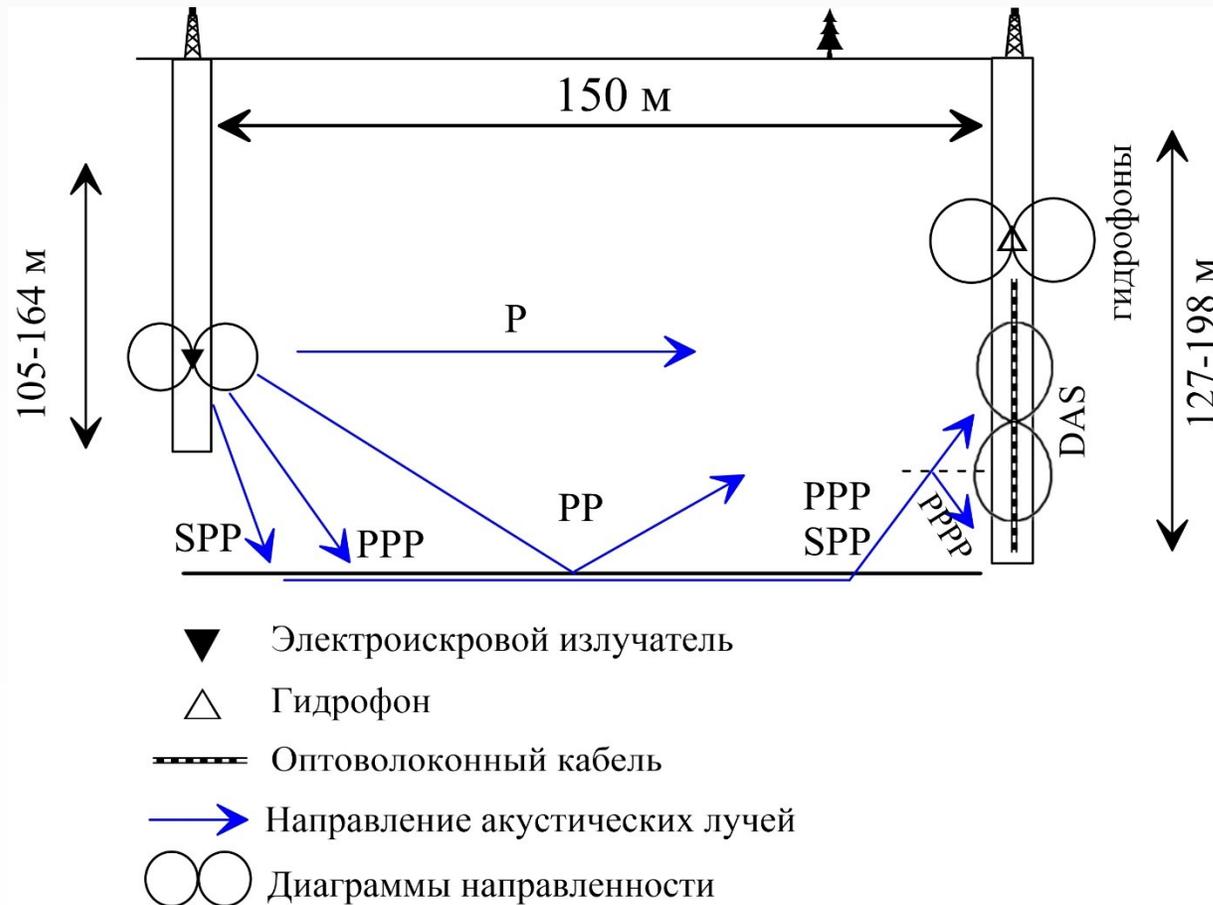


Схема регистрации



Сравнение гидрофонов и DAS

Прямая волна, кратность 16

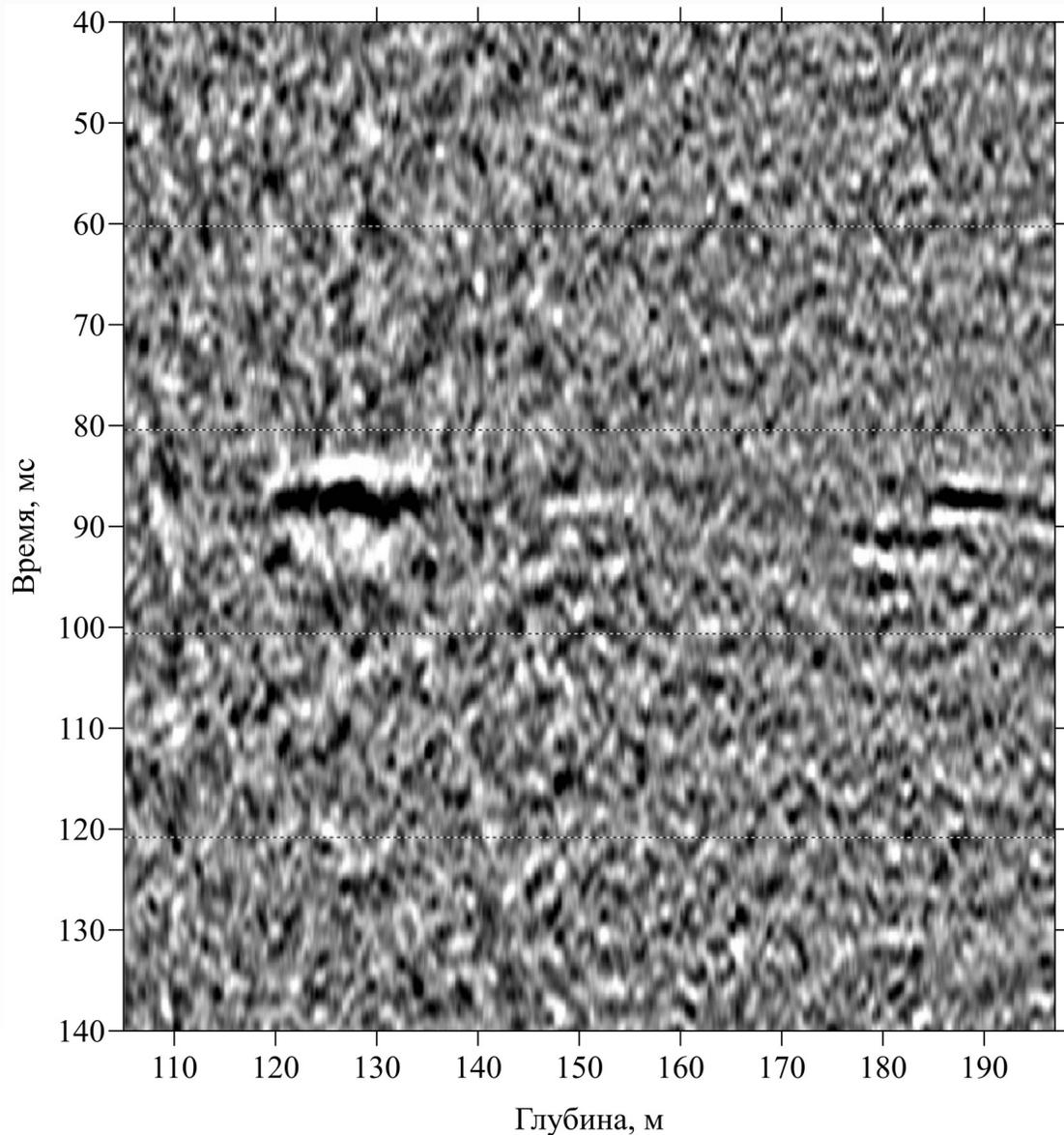
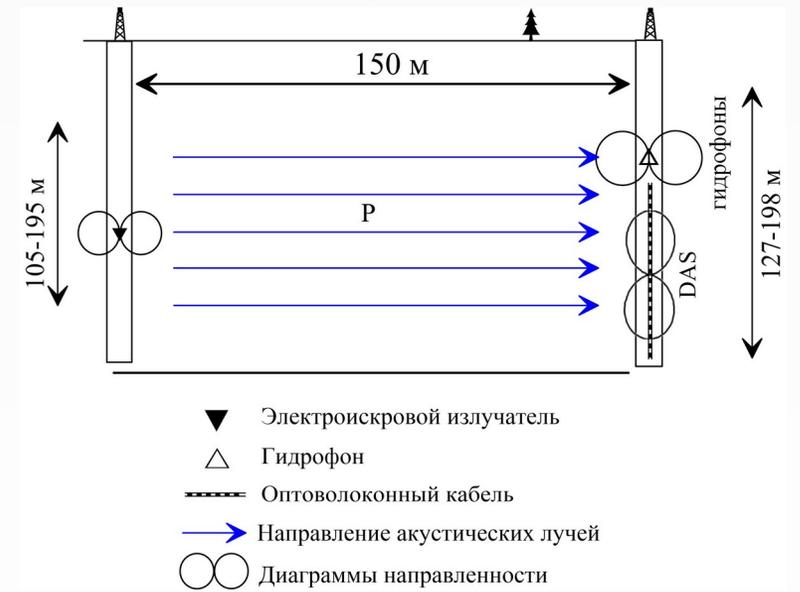


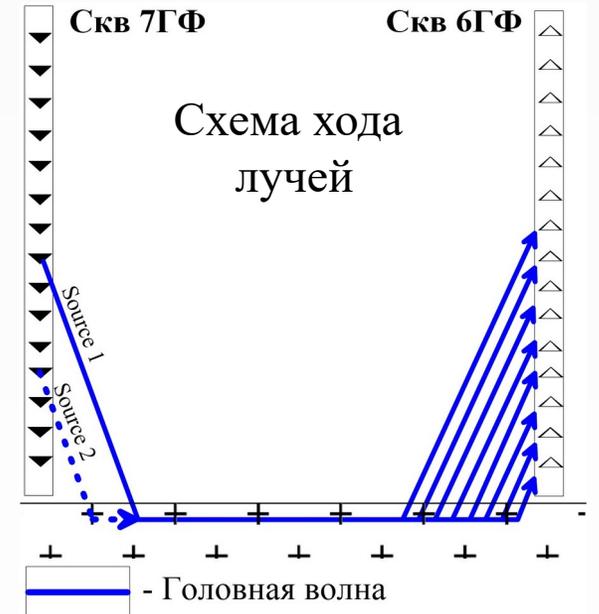
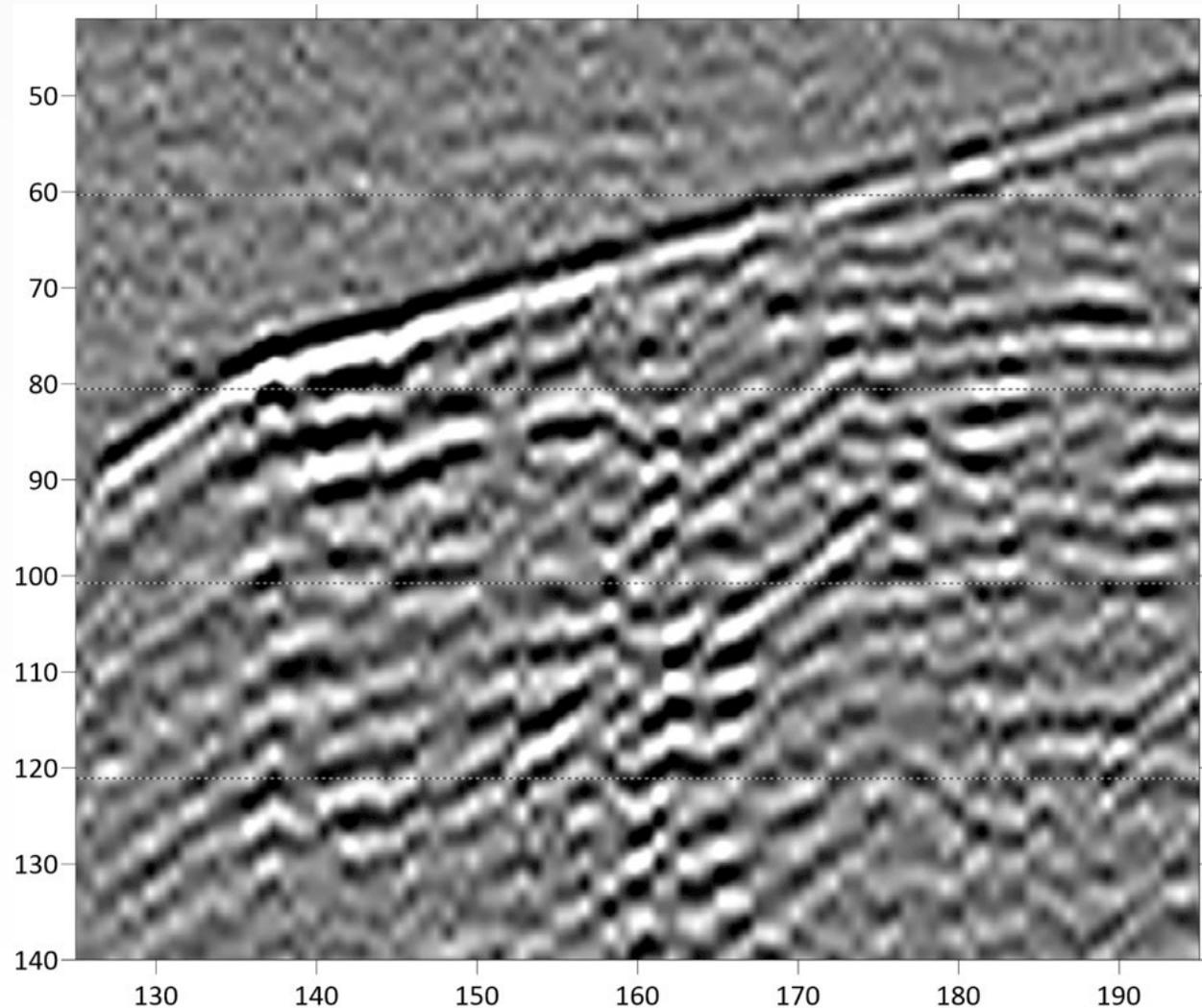
Схема хода лучей



Энергия сигнала:
2500 Дж
16 накоплений

Сравнение гидрофонов и DAS

Головная волна, кратность ~800



Энергия сигнала:

2500 Дж

800 накоплений

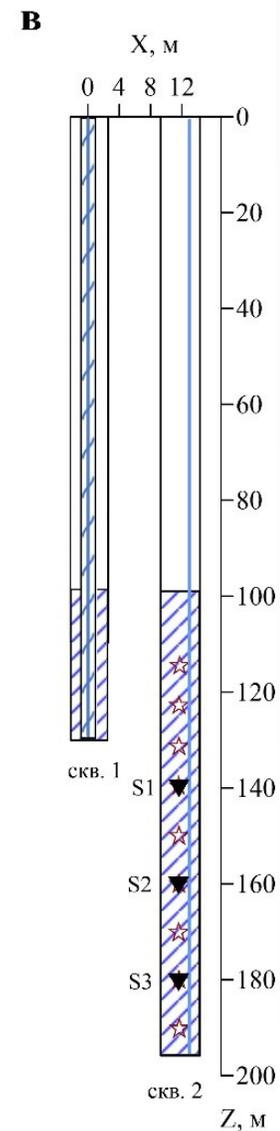
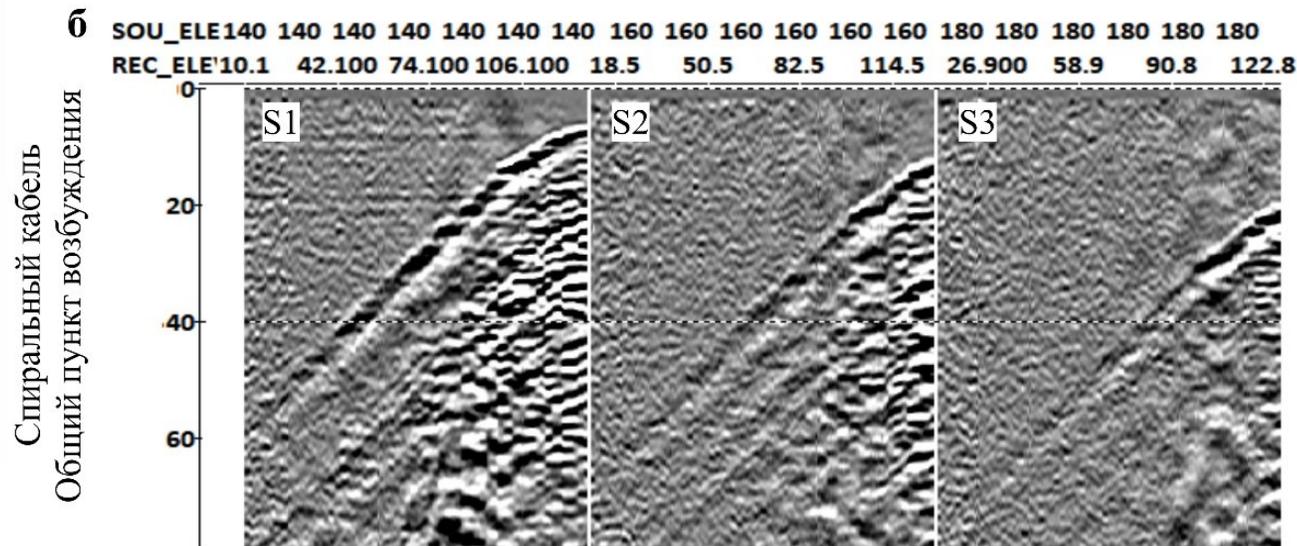
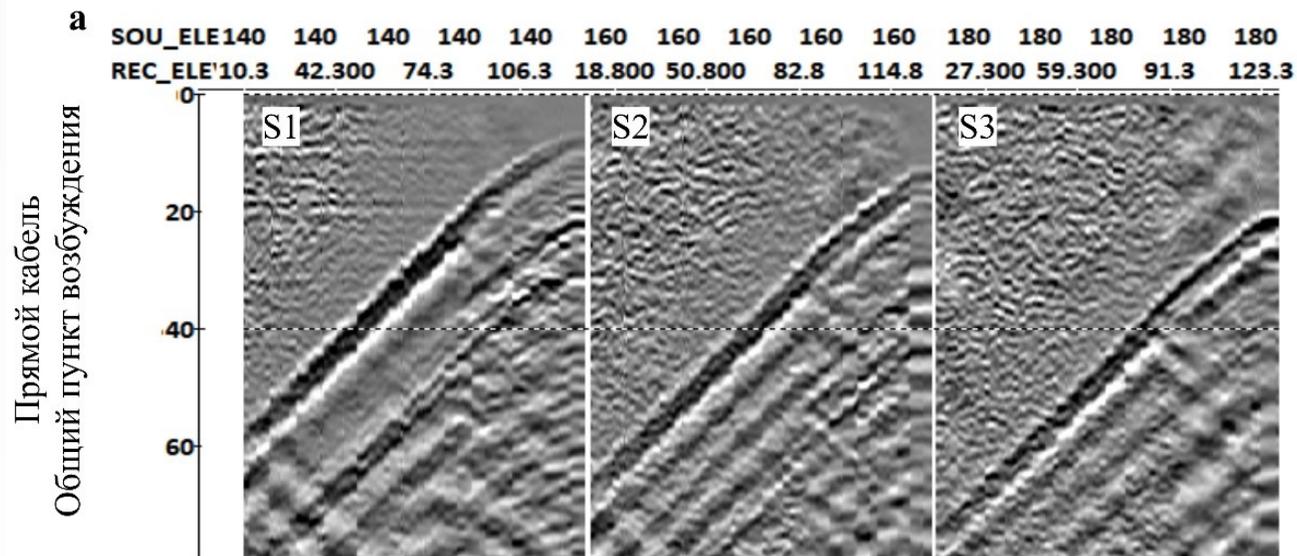
Межскважинное просвечивание на короткой базе

Общий пункт возбуждения

Энергия сигнала:

2500 Дж

16 накоплений



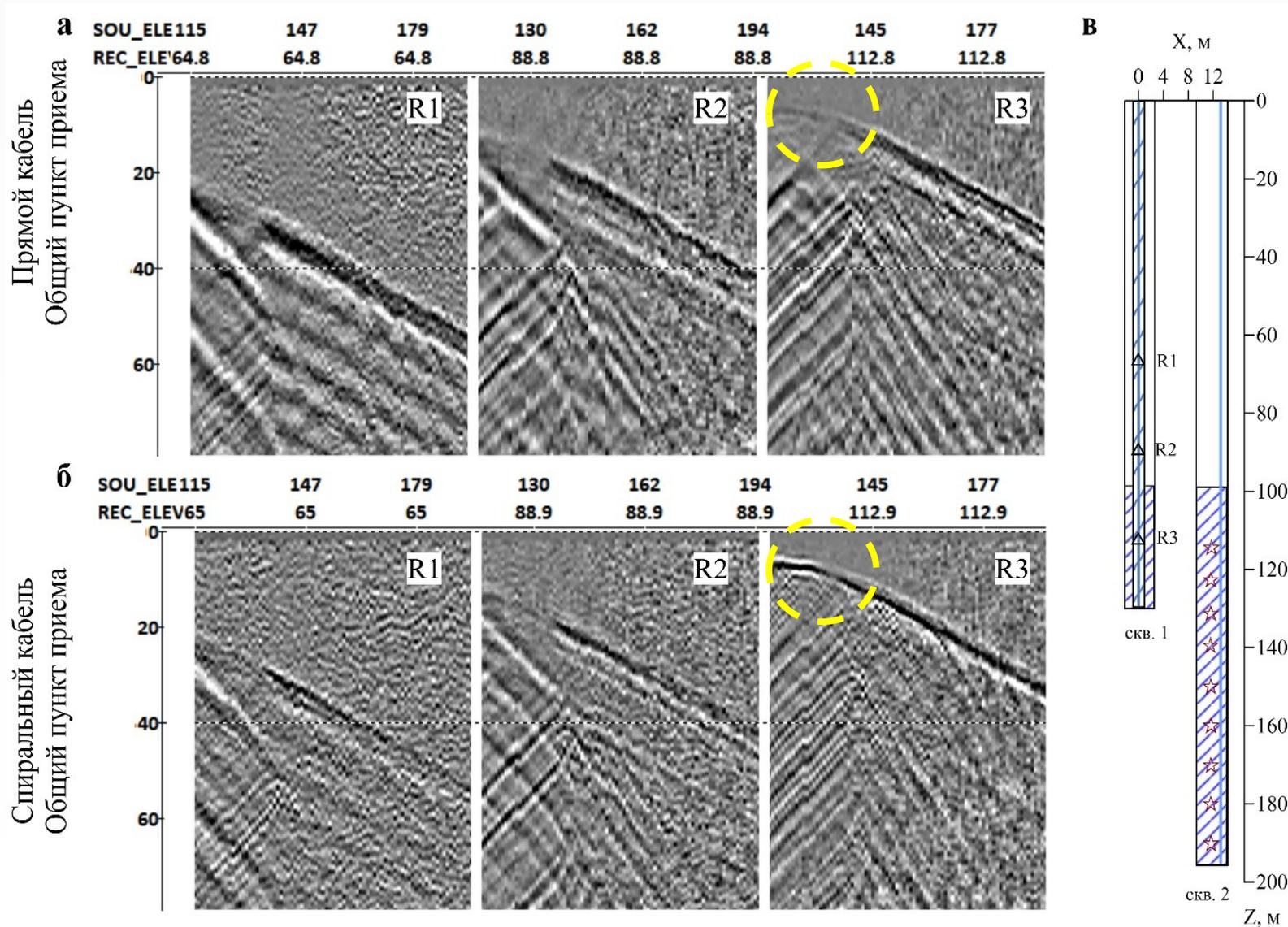
Межскважинное просвечивание на короткой базе

Общий пункт приема

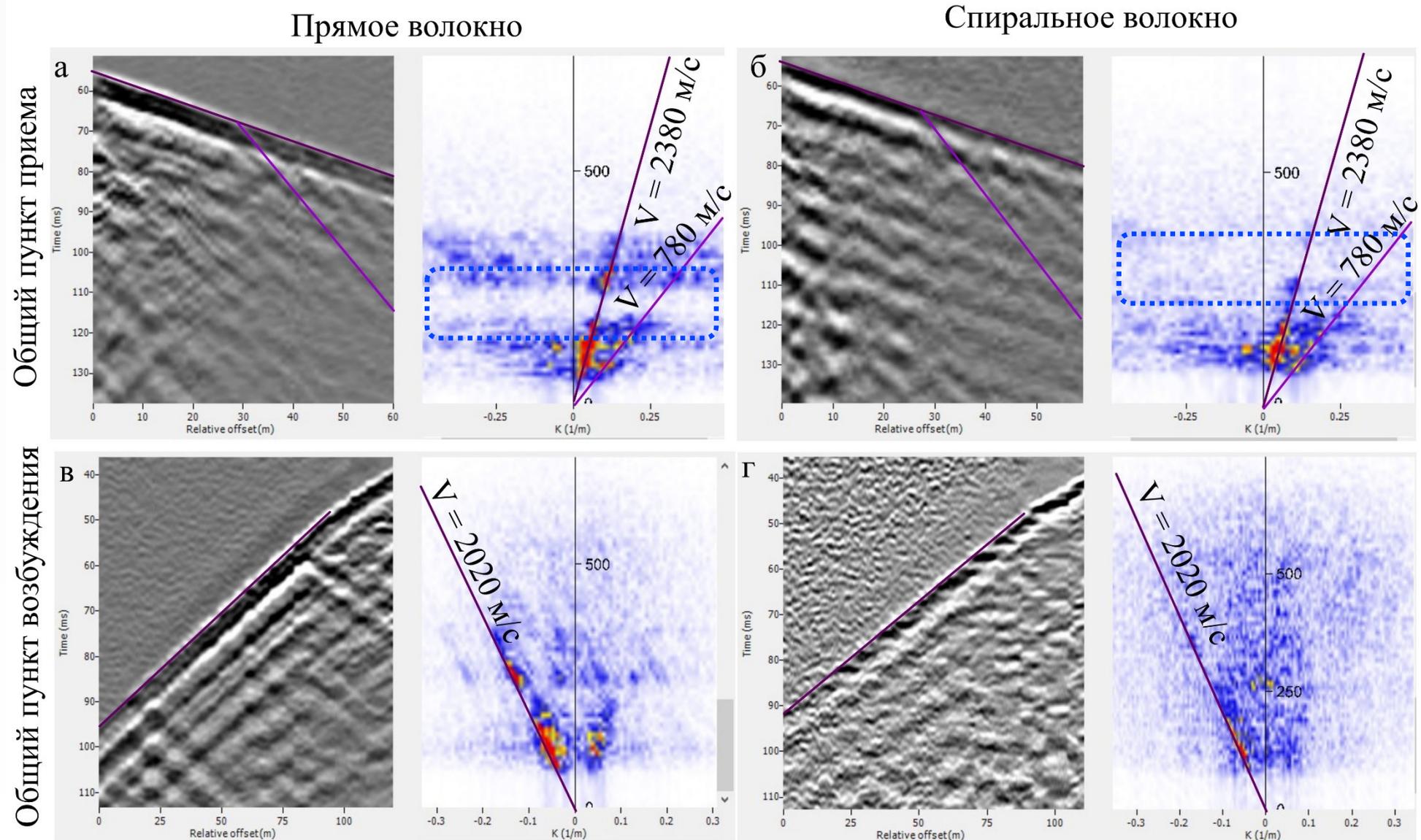
Энергия сигнала:

2500 Дж

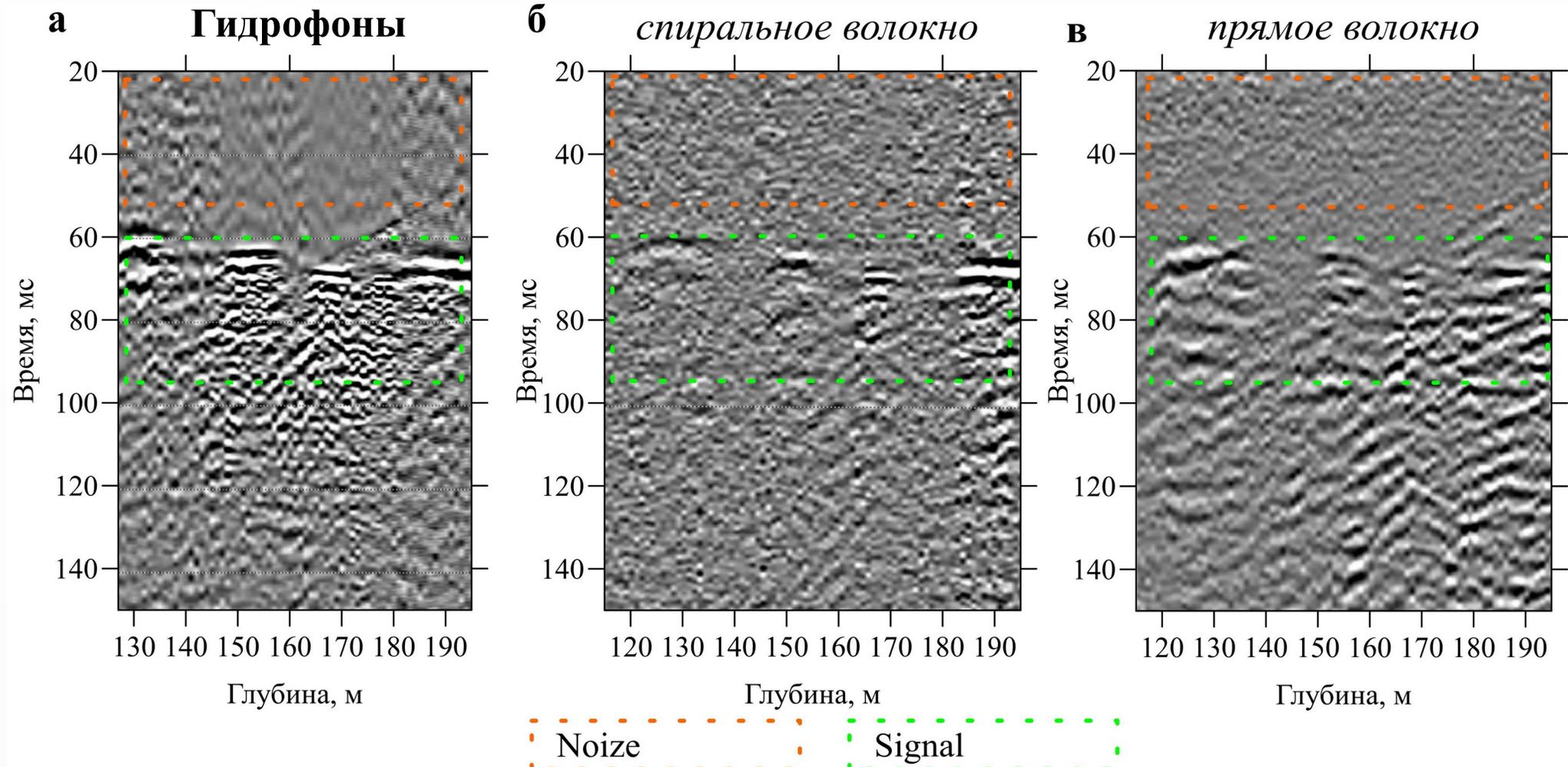
16 накоплений



Суммарные сейсмограммы и их f-k спектры

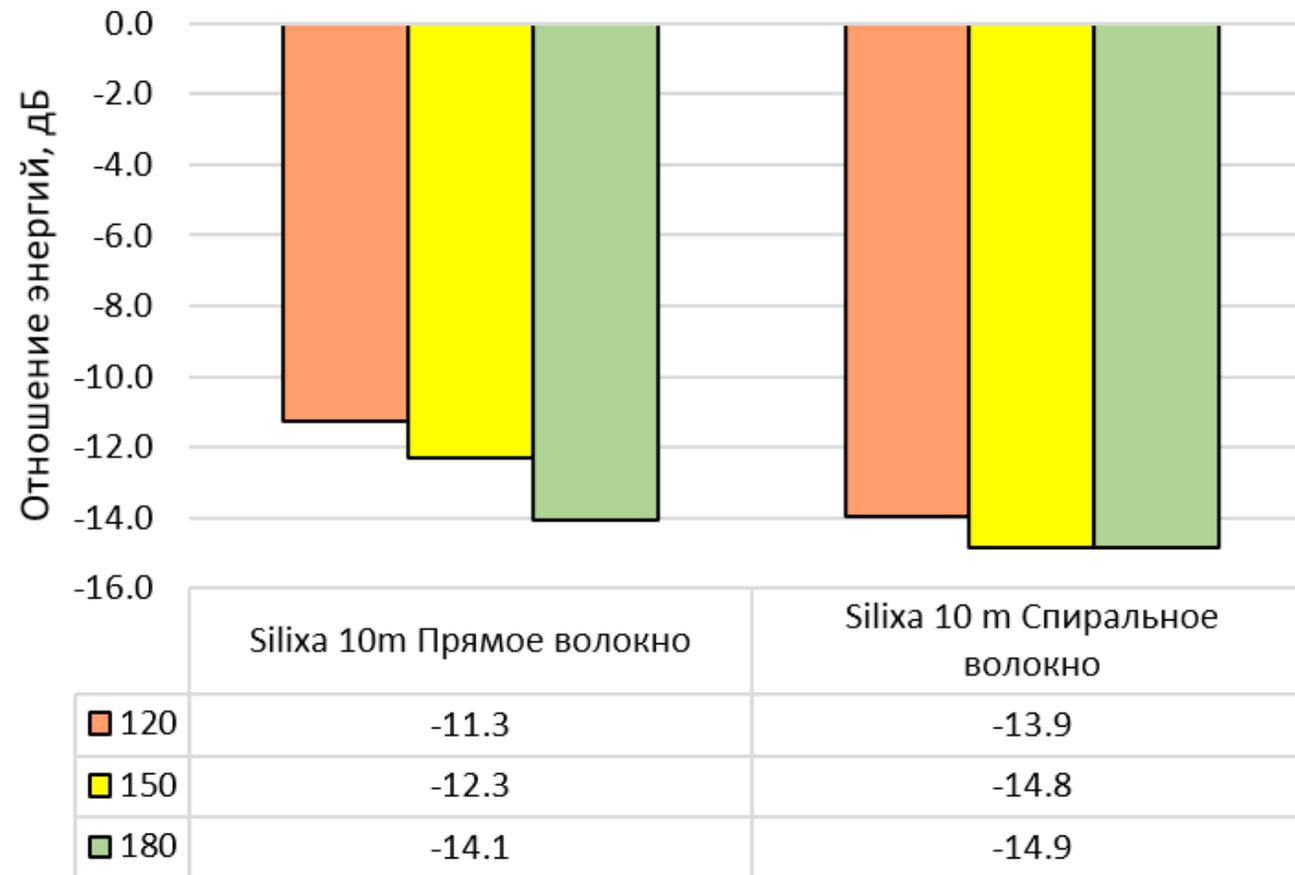


Расчет отношений сигнал/шум



S/N:	10-100	1-4	1-4
-------------	---------------	------------	------------

Сравнение отношения сигнал/шум гидрофонов и оптоволоконной системы



Энергия сигнала:
1500 Дж
2 накопления

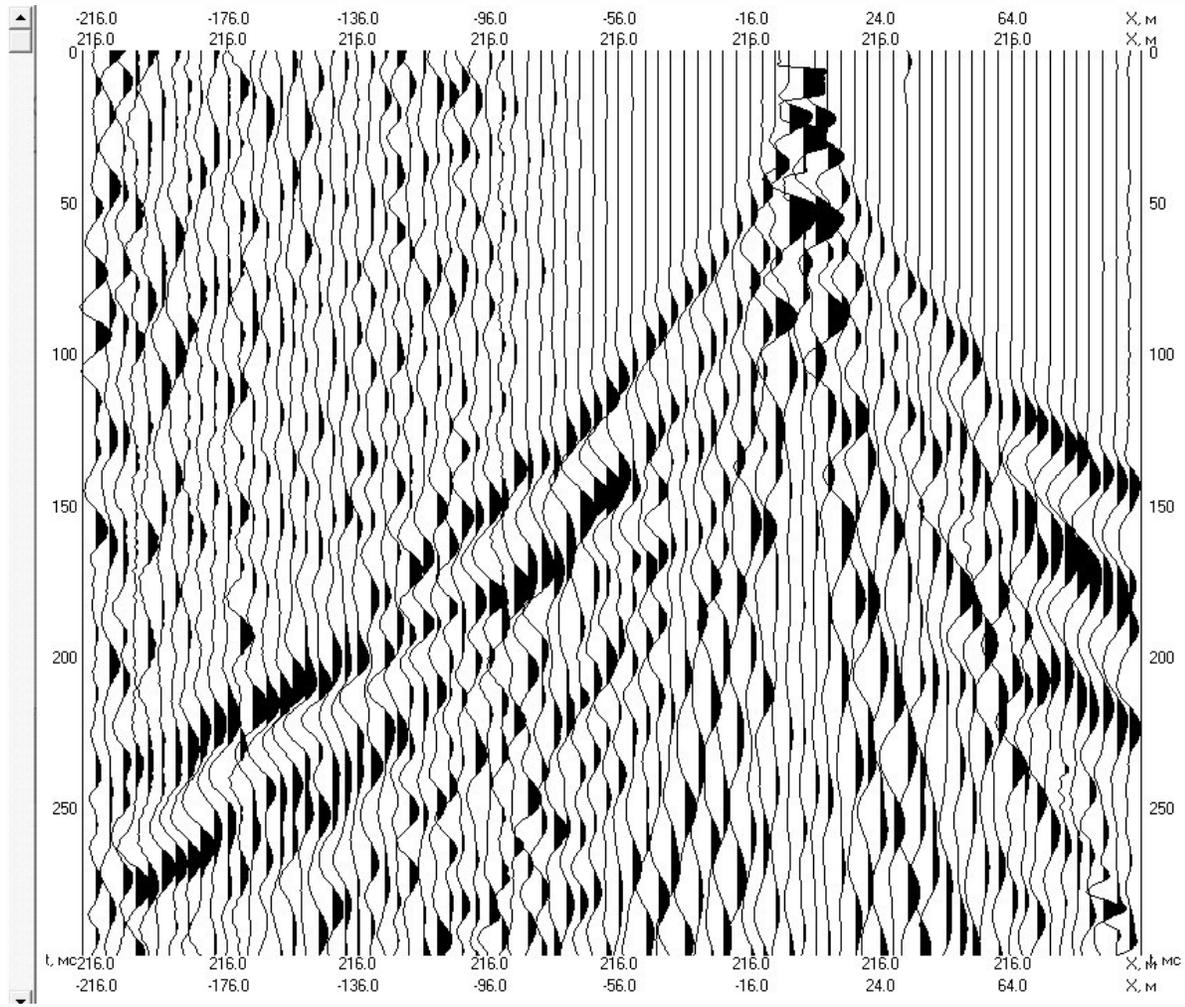
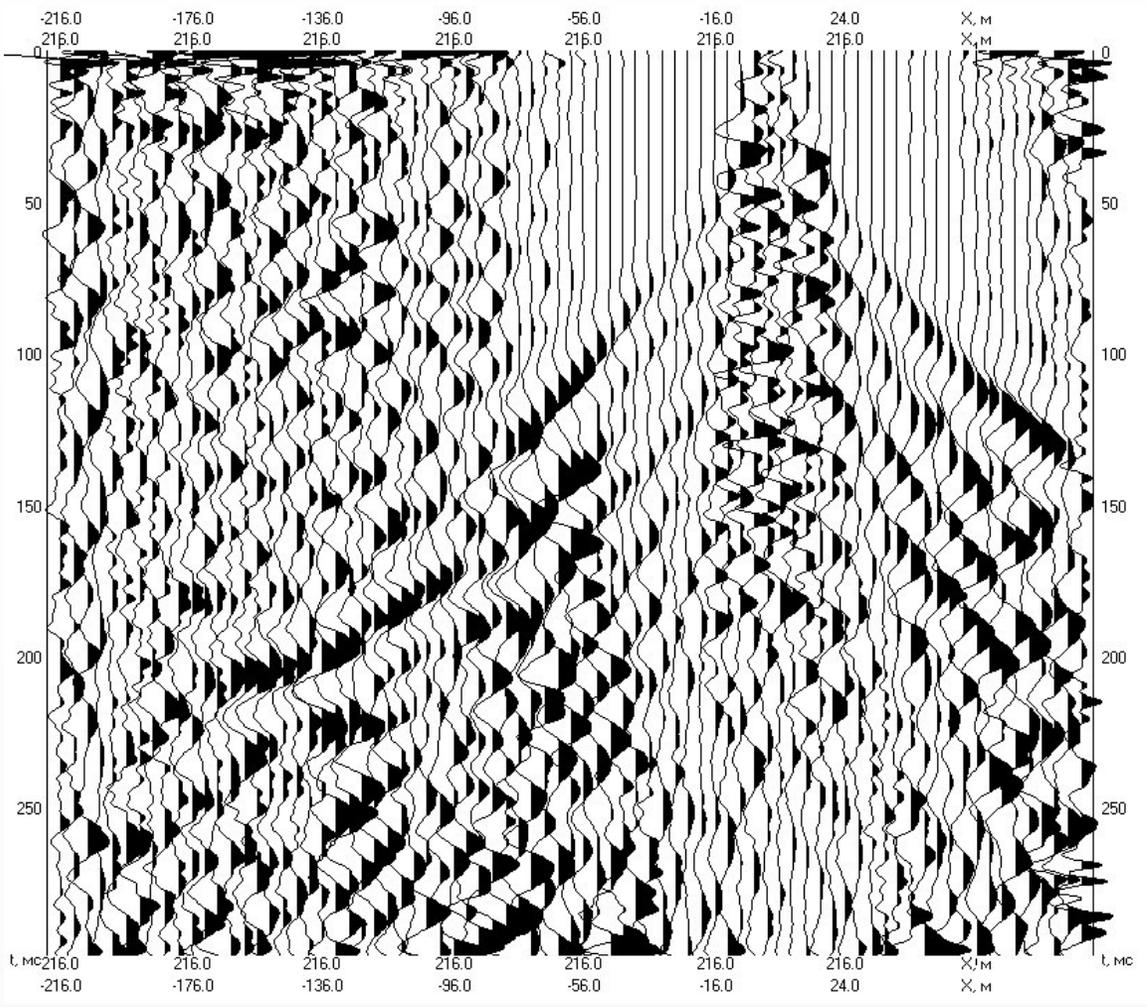
Наземный профиль ОГТ

Silixa iDAS2

Геофоны GS-One

?

?



Выводы

- При регистрации оптоволоконной системой необходимо учитывать характер регистрируемого волнового поля и диаграмму направленности системы наблюдений
- Частотный состав регистрируемых волновых полей отличается для спирального и прямого волокна
- Получены количественные оценки чувствительности оптоволоконной системы регистрации: от -12 дБ до -15 дБ по сравнению с гидрофонами в скважине



Горный институт
УрО РАН

Благодарю за внимание!

Чугаев Александр Валентинович
chugaev@mi-perm.ru