

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

УДК 681.586.5

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ ГРУНТОВ ПО ДАННЫМ
РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЕТОДОМ
ПАССИВНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН¹**

**©2026 г. А.В. Яблоков^{a,b,*}, Г.Х. Ашкар^{c,e}, Э.А. Фомиряков^c, П.А. Дергач^{a,b},
С.В. Яскевич^{a,b}, И.С. Пономарёв^{c,d}**

^aИнститут нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3

^bНовосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

^cООО «Т8»

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1

^dМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

^eУфимский университет науки и технологий

Россия, 450076, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

**E-mail: yablokovav@ipgg.sbras.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Продemonстрирована возможность применения технологии распределенного акустического зондирования (DAS) для решения задачи построения скоростной модели верхней части геологического разреза методом пассивного многоканального анализа поверхностных волн (PMASW). Выполнялась регистрация сейсмического шума интеррогатором «Дунай» (ООО «Т8»), подключенным к участку городской волоконно-оптической линии связи в северо-восточной части г. Москвы, проложенной вдоль трамвайной линии. Анализировалась горизонтальная компонента волны Рэлея, которая вносит основной вклад в продуцируемое техногенными источниками (трамвайный и автомобильный транспорт) сейсмическое поле и соответствует измеряемой продольной деформации оптоволоконного кабеля. Для повышения устойчивости решения независимо обрабатывались данные с базами измерения (gauge length) 8 и 16 м, а также вводился коэффициент доверия к данным, рассчитанного по доле каналов с превышением порогового значения спектральной плотности мощности. По результатам обработки непрерывной записи длительностью 20 минут построены дисперсионные кривые и выполнена их инверсия с восстановлением двумерных моделей скоростей поперечной волны протяженностью до

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

2.5 км и глубиной до 200 м. Показано, что увеличение базы измерения повышает устойчивость выделения низкочастотной части дисперсионного изображения и вероятность выделения глубинных границ, однако приводит к ослаблению высокочастотной составляющей и снижению разрешения в приповерхностной части разреза. Итоговый скоростной разрез получен усреднением результатов обработки для двух баз измерения с маркировкой зон пониженной достоверности.

Ключевые слова: сейсморазведка, верхняя часть геологического разреза, скоростная модель, распределённое акустическое зондирование, DAS, пассивный многоканальный анализ поверхностных волн, PMASW, спектральный анализ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование технологии акустического зондирования (Distributed Acoustic Sensing или DAS) позволяет расширить применение сейсморазведочных методов в городской среде за счет использования существующей оптоволоконной инфраструктуры [1]. Подчеркиваемыми преимуществами использования DAS являются большая протяженность приемной линии (до сотен км), высокая пространственная дискретизация (до 1 м), возможность подключения интеррогатора к уже проложенным городским кабелям и отсутствие затрат на установку и съем сейсмической системы наблюдения. Кроме того, в городских условиях всегда присутствуют разнообразные техногенные источники широкополосных упругих колебаний (трамвайный и автомобильный транспорт), которые являются основой методов регистрации и обработки пассивных сейсмических данных [2, 3], таких как метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW).

Метод MASW предназначен для изучения распределения скоростей поперечных волн в верхней части геологического разреза (ВЧР) глубиной до 250-300 м [4]. Основой метода является спектральный анализ поверхностных волн Рэлея, которые характеризуются дисперсией — их фазовая скорость зависит от частоты. На практике это означает, что низкие частоты несут в себе информацию о структурах на больших глубинах, а высокие — на самых приповерхностных слоях. Вертикальная модель скоростей восстанавливается путем инверсии дисперсионных кривых в ходе решения регуляризованной обратной задачи.

В пассивном MASW (PMASW) вместо контролируемого искусственного источника анализируется высокоинтенсивный техногенный шум (например, проезжающие автомобили) из окружающего пространства [5]. Для пассивного анализа применяют алгоритм наклонного суммирования в частотной области, в котором спектр полезного сигнала накапливается за счет перебора азимутов прихода и оконной обработки данных. Результатом активного и пассивного MASW являются двумерные скоростные модели поперечной волны в ВЧР, которые далее могут быть пересчитаны в упругие модули или синтетические акселерограммы, необходимые при гражданском и промышленном строительстве [6]. Повторение сейсмического эксперимента и построение скоростной модели во времени позволяют проводить мониторинг приповерхностных грунтов и своевременно выявлять зоны разуплотнения, оттаивания многолетнемерзлых пород или оплыwania грунта [7].

Данные DAS, зарегистрированные в городской среде, из-за множества факторов существенно отличаются от данных полевых экспериментов, полученных в контролируемых условиях. Во-первых, источники шума очень разнообразны по своей природе, при этом они часто являются импульсными: проезд трамвая по рельсам или грузового автомобиля вызывает резкую локальную деформацию кабеля, что может привести к неполному захвату сигнала в интеррогаторе и выходу измерений за пределы линейного диапазона [8]. Во-вторых, контакт кабеля с грунтом часто неоднороден, что неизбежно приведет к вариациям фазового отклика вдоль линии и усложнит интерпретацию волнового поля.

Кроме того, аппаратурные особенности DAS также влияют на результат. Длительность лазерного импульса задает длину рассеяния и определяет минимальный масштаб пространственной чувствительности системы. Номинальная база измерения (gauge length) – число каналов, на которых вычисляется разностная фаза, – фактически задает дополнительное пространственное усреднение. Уменьшение базы ниже длины рассеяния не добавляет детализации волнового поля, тогда как увеличение базы подавляет коротковолновые компоненты [9]. В интеррогаторах часто встраиваются методы подавления фэйдинга (fading) (усреднения) для стабилизации сигнала [8], что тоже приводит к размытию пространственного отклика (реальный прообраз отклика прибора становится ближе к колоколу гауссового распределения, а не идеальному прямоугольному окну).

Перечисленные аппаратурно-физические ограничения требуют их учета и введения дополнительных мер контроля качества для автоматизации обработки сейсмического шума методом PMASW. Поэтому целью настоящей работы является исследование возможности использования городской линии DAS и интеррогатора «Дунай» для пассивного анализа поверхностных волн, а также оценка влияния базы измерения, эффективного пространственного отклика и локальных нелинейных искажений на достоверность построения скоростной модели ВЧР.

2. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЙ И АППАРАТУРА

В работе для регистрации сейсмического шума использовалась система распределенного акустического зондирования (DAS), реализованная на базе фазочувствительного оптического рефлектометра. Особенности формирования измеряемого сигнала в таких системах определяются параметрами лазерного импульса, длиной рассеяния и базой измерения, которые задают эффективный пространственный отклик интеррогатора. В связи с этим перед изложением результатов эксперимента приведено краткое описание принципа измерений DAS и характеристик использованной аппаратуры.

Технология DAS основана на эффекте обратного Рэлеевского рассеяния, возникающего в оптоволокне. Устройство опроса (далее интеррогатор) посылает в волокно узкополосный лазерный импульс. Световой импульс при распространении по волокну рассеивается на неоднородностях волокна, малая доля излучения попадает обратно в моду, и этот обратно рассеянный сигнал регистрируется фотоприемником интеррогатора (рис. 1).

Рис. 1. Принципиальная схема работы системы из интеррогатора и DAS

При возникновении деформации оптоволокна (вплоть до нанометров), возникающей, например, вследствие внешних механических воздействий, наблюдается изменение фаз и интенсивности этого обратно рассеянного сигнала. Анализ этих изменений позволяет локализовать и измерить деформацию вдоль кабеля. Таким образом, интеррогатор DAS позволяет измерять деформацию и/или скорость деформации на отрезках оптоволокна, формируя распределенный массив виртуальных датчиков.

Регистрация сигнала проходит в несколько этапов.

- Блок лазера отправляет световой импульс (в текущем исследовании длительность импульса $\tau = 80$ нс) с частотой f_{imp} от сотен Гц до десятков кГц.
- Из-за неоднородностей оптическое излучение рассеивается на различных участках волокна. Множество перекрывающихся импульсов, рассеянных от соседствующих неоднородностей в пределах длины рассеяния $L_{sc} = v_g \tau / 2$, где v_g – групповая скорость распространения света в волокне, интерферирует и создает хаотичную по амплитуде картину рассеяния [10].
- Рассеянный свет, приходящий на фотоприемник, оцифровывается с частотой около сотни МГц. Ввиду того, что скорость распространения импульса в волокне постоянна, шаг оцифровки соответствует прохождению импульсом участка примерно в 1.6 м: $\Delta z = v_g / (2f_{АЦП})$, где $f_{АЦП}$ – частота оцифровки АЦП.
- Последовательность рефлектограмм обрабатывается специальным блоком, зависящим от используемой оптической схемы фазочувствительного рефлектометра [11], и преобразуется в изменения оптической фазы, возникающие на длине рассеяния L_{sc} , также называемые разностной фазой. В результате формируется двумерный массив разностной фазы, где горизонтальная ось соответствует координате вдоль волокна z , а вертикальная – времени наблюдения t .

База измерения (gauge length или GL) – это параметр блока обработки, характеризующий число каналов, между которыми вычисляется разностная фаза [12]. Она действует как пространственный низкочастотный фильтр, который сглаживает отклик фазы на натяжение. В стандартном случае ее выбирают близкой к длине рассеяния, чтобы сохранить наилучшую разрешающую способность устройства. В случае, если исследуемые сигналы обладают

большой пространственной длиной волны (афтершоки землетрясений, волны, отраженные от глубоко пролегающих слоев), оптимальная база измерения может превышать длину рассеяния, при этом она позволяет повысить отношение сигнала к шуму прибора.

Следует учитывать, что поскольку пространственный шаг Δz зачастую меньше, чем длина рассеяния и база измерения, соседние каналы могут быть сильно скоррелированы, в отличие от стандартной сейсмической косы из геофонов. Прореживание данных интеррогатора DAS позволяет привести данные ближе к стандартной сейсмограмме.

Изменение оптической фазы через сегмент волокна зависит от изменения его длины ΔL по формуле $\Delta\varphi = 2k\Delta L = 4\pi n\Delta L/\lambda$. Удлинение волокна является относительной величиной (1 стрейн — это растяжение 1 м волокна на 1 м), оно связано с изменением фазы в когерентном рефлектометре:

$$\Delta t = \Delta L/L_{sc} = \Delta\varphi \frac{\lambda}{4\pi n L_{sc} \xi},$$

где λ — длина волны излучения, n — показатель преломления, ξ — корректирующий множитель фотоупругого эффекта (около 0.78).

В рамках проведения описываемых испытаний использовался интеррогатор «Дунай» (рис. 2) производства ООО «Т8», обладающий следующими характеристиками.

- Высокая пространственная дискретизация — интервал между виртуальными датчиками варьируется от 1.6 м, что сопоставимо с плотностью расстановки традиционных геофонов.
- Возможность проведения мониторинговых исследований — прибор подключается к уже проложенной городской оптоволоконной инфраструктуре, не требует прокладки новых волокон или датчиков. При этом выполняется непрерывная запись в любой момент времени без необходимости присутствия на фактическом месте проведения работ.

Рис. 2. Внешний вид интеррогатора «Дунай» (вид со стороны разъемов подключения)

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент по записи сейсмического шума с применением системы DAS проводился на участке городской волоконно-оптической линии связи, которая проложена вдоль трамвайных путей в северо-восточной части г. Москвы (место отмечено синим маркером на карте на рис. 3а). Трамвайный и автомобильный транспорт, проходящий вдоль линии DAS, представляет собой мощный протяженный источник постоянных сейсмических колебаний. Кроме того, линия проходит в плотной городской застройке, где присутствует различного рода техногенный шум. Такое расположение приемной линии создает устойчивую генерацию низкочастотных упругих колебаний, необходимых для дальнейшего анализа.

Интеррогатор «Дунай» был подключен к существующей городской оптоволоконной сети. Измеряемый участок имел длину около 2500 м (линия отмечена серым цветом на рис. 3б). Расстояние между виртуальными датчиками составляло 1.6 м.

Рис. 3. На карте Москвы синим маркером показан участок эксперимента (а), а серым цветом – линия DAS (б)

Длительность лазерного импульса равнялась 80 нс, что соответствует длине рассеяния около 8 м. Записи были сделаны с двумя значениями базы измерения (GL): 8 и 16 м. При длительности импульса порядка 8 м использование GL меньшей величины не дает принципиально нового пространственного отклика системы, тогда как увеличение базы до 16 м обеспечивает дополнительное пространственное усреднение сигнала. Это усреднение может уменьшить влияние локальных аппаратурных искажений и улучшить выделение полезного сигнала на отдельных участках профиля, однако оно не восстанавливает физически корректный сигнал в тех каналах, где первичный отклик интеррогатора вышел из линейного режима [8].

Регистрация выполнялась в дневное время в условиях активного транспортного движения. Продолжительность непрерывной записи составляла 20 мин, а частота дискретизации исходных данных – 4 кГц. На этапе предварительной обработки удалялась постоянная составляющая и выполнялась децимация данных до 100 Гц с применением антиалиасингового фильтра.

Полученные записи показывают распределенные во времени и пространстве измерения продольной деформации оптоволокну, вызванной техногенными источниками вибраций. Общеизвестно, что наибольший вклад в волновое поле вносит поверхностная волна Рэлея, анализу которой посвящено текущее исследование. Важно отметить, что волна Рэлея характеризуется эллиптическим движением частиц с двумя компонентами: вертикальной и горизонтальной в вертикальной плоскости распространения. Для линейного оптоволокну, используемого в данной работе, чувствительность максимальна к компоненте движения, спроецированной на направление кабеля, – горизонтальной компоненте волны Рэлея.

4. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПАССИВНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

Метод пассивного многоканального анализа поверхностных волн (Passive Multichannel Analysis of Surface Waves или PMASW) основан на преобразовании сейсмического шума в распределения амплитуд колебаний в пространстве фазовая скорость – частота ($V_{ph} - f$) или т.н. дисперсионное изображение [13]. В настоящей работе эти изображения строятся путем наклонного суммирования плоских волн в частотной области с перебором их фазовых скоростей V_{ph} и возможных азимутов θ прихода. Для этого комплексные спектры трасс $R_k(f)$

(полученные одномерным быстрым преобразованием Фурье по времени) на фиксированной частоте f суммируются с фазовыми сдвигами, соответствующими пробному значению фазовой скорости V_{ph} и направлению прихода θ :

$$E(f, V_{ph}, \theta) = \left| \sum_{k=1}^N R_k(f) \exp(i\varphi_k) \right|.$$

Фазовый сдвиг задается проекцией волнового вектора на координаты приемников $\varphi_k = -f x \cos \theta / V_{ph}$, что позволяет учитывать влияние распределенных по площади источников путем перебора θ . Далее выполняется суммирование энергии по азимутам:

$$\tilde{E}(f, V_{ph}) = \sum_{\theta} E(f, V_{ph}, \theta),$$

в результате чего энергетические максимумы, соответствующие одной и той же моде волн Рэлея, но приходящие с разных направлений, конструктивно накапливаются в спектральной области. Повторяя вычисления для набора частот, мы формируем итоговое изображение $V_{ph} - f$. По максимумам этого изображения извлекается график зависимости V_{ph}^{obs} или т.н. дисперсионная кривая.

Обработка выполняется в последовательности перекрывающихся временных окон (длина окна равнялась 5 с) с последующим суммированием полученных дисперсионных изображений, что повышает устойчивость выделения мод на фоне нестационарного городского шума. Подобная схема накопления является стандартной для пассивного MASW, где отдельное окно может содержать ограниченный набор источников и направлений прихода волны.

Одна дисперсионная кривая извлекается для данных по скользящим группам каналов с фиксированной протяженностью (апертурой), далее называемой базой наблюдения (D). В данной работе использовалась база наблюдения 200 м, выбранная как компромисс между достаточным спектральным разрешением (возможность устойчиво различать энергетические максимумы на $(V_{ph} - f)$ -изображении) и требуемым пространственным разрешением итогового разреза вдоль профиля. Шаг между базами наблюдения (D) равнялся 5 м. Важно различать два различных масштаба усреднения в обработке: база измерения $GL = 8$ или $GL = 16$ м – параметр первичной обработки интеррогатора, задающий эффективное пространственное усреднение измеряемых данных, и база наблюдения $D = 200$ м – апертура группы каналов в PMASW, определяющая их вклад в одну дисперсионную кривую и итоговый разрез.

Извлеченные дисперсионные кривые волн Рэлея далее использовались для решения обратной задачи – восстановления 1D-разреза скорости поперечной волны $V_s(z)$. Подобная постановка является стандартной для методов анализа поверхностных волн: наблюдаемая дисперсия фазовой скорости $V_{ph}(f)$ обусловлена вертикальной неоднородностью среды, а

инверсия дисперсионной кривой позволяет восстановить эффективное распределение V_S по глубине.

В настоящей работе инверсия реализована через метод локальной оптимизации, основанной на алгоритме Оккама. Ключевая идея этого алгоритма состоит в том, что при наличии множества допустимых решений (что типично для слабообусловленных геофизических обратных задач) целесообразно выбирать наиболее простое (гладкое) решение, обеспечивающее заданный уровень согласия с данными. Это позволяет подавлять неустойчивые осцилляции и ложную детализацию, возникающие при попытке избыточно точно подобрать дисперсионную кривую.

Инверсия опирается на решение прямой задачи: для заданной слоистой упругой модели (набор значений V_S и толщин слоев) вычисляется синтетическая дисперсионная кривая $V_{ph}^{syn}(f)$. Расчет дисперсии поверхностных волн в слоистой среде выполняется матричным методом Томсена-Хаскела (Thomson–Haskell или матрица пропагатора), являющимися классической основой прямого моделирования дисперсии волн Рэлея и Лява в одномерной слоистой среде.

Начальное приближение (стартовая модель) формируется автоматически на основе извлеченной дисперсионной кривой. Для этого наблюдаемая кривая $V_{ph}^{obs}(f)$ преобразуется в зависимость длины волны от фазовой скорости по формуле $\lambda = V_{ph}^{obs}/f$. Далее используется простая связь фазовой скорости волны Рэлея и скорости поперечной волны для типичных грунтов ($V_S \approx 1.1V_{ph}^{obs}$). Глубинная привязка стартовой модели задается через эвристическую связь (эффективная глубина исследования составляет примерно $\lambda/3$), отражающую экспоненциальное убывание амплитуды поверхностной волны с глубиной.

Обновление модели выполняется итеративно с целью уменьшения невязки между наблюдаемой кривой $V_{ph}^{obs}(f)$ и синтетической кривой $V_{ph}^{syn}(f)$. Итерационный процесс прекращается после достижения заданного числа итераций (либо при стабилизации невязки).

Таким образом, для каждой независимо обрабатываемой группы каналов строится 1D-модель $V_S(z)$, после чего набор моделей интерполируется по координате вдоль линии наблюдения и формируются скоростные 2D-разрезы.

5. АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

На рис. 4а-б приведены зарегистрированные с помощью линии DAS данные сейсмического шума в виде пространственно-временных записей (сейсмограмм) для двух значений базы измерения (GL): 8 и 16 м. Показан фрагмент записи длительностью 5 мин. Амплитуда представлена в своих абсолютных значениях в диапазоне от -1 до 1 усл. ед. Обе сейсмограммы демонстрируют характерную для городской среды картину: чередование интервалов умеренной фоновой активности и локальных высокоэнергетических всплесков, пространственно привязанных к отдельным участкам линии. Эти всплески проявляются как выраженные вертикальные структуры (кратковременные события, локализованные по координате вдоль кабеля) и как зоны повышенной «зернистости» сигнала, что указывает на значительную неоднородность условий возбуждения/сцепления кабеля с основанием и/или на аппаратные эффекты.

Рис. 4. Пространственно-временные записи (сейсмограммы) сейсмического шума, зарегистрированного с помощью DAS вдоль трамвайной линии для двух значений базы измерения: 8 м (а) и 16 м (б)

При переходе от $GL = 8$ м к $GL = 16$ м общая структура волнового поля сохраняется (то есть ключевые источники и зоны активности прослеживаются в обоих вариантах), однако визуально наблюдается более сглаженный вид записи: мелкомасштабные высокоамплитудные участки несколько ослаблены. Такой эффект ожидаем, поскольку увеличение базы измерения эквивалентно дополнительному пространственному усреднению измеряемой разностной фазы (и, следовательно, деформации), действующему как пространственный низкочастотный фильтр.

На обеих записях присутствуют протяженные по времени и локализованные по расстоянию участки с резко повышенной энергией (например, участок 2000–2100 м по оси расстояния), которые отличаются от типичного шума от транспорта не только амплитудой, но и характером сигнала: полезная волновая картина в таких местах частично деградирует и выглядит как нестационарная высокоамплитудная помеха.

Более наглядно неоднородность шума проявляется на частотно-пространственных (F - X) амплитудных спектрах сейсмограмм, показанных на рис. 5а-б. На F - X -спектрах цветом показана абсолютная амплитуда (диапазон 0–1000 усл. ед.) и дополнительно нанесен график спектральной плотности мощности (СПМ), рассчитанной по методу Уэлча (Welch), – стандартный подход на основе усреднения периодограмм по перекрывающимся временным окнам. Для построения одномерного графика СПМ усредняется во всей полосе частот для каждой пространственной координаты. СПМ позволяет количественно сопоставить энергетический уровень на различных участках линии, а также дает простой диагностический признак перегруженных интервалов: зоны с экстремально высокой СПМ соответствуют тем же

координатам, где на сейсмограммах и F-X-спектрах проявляются признаки аномально высокой энергии и деградации полезного сигнала.

Рис. 5. Частотно-пространственные представления сейсмограмм (F-X-спектры) для данных с базой измерения 8 м (а) и 16 м (б)

Показательный пример – область в районе 2000–2100 м: для базы 8 м локальное значение СПМ достигает порядка 1500 усл. ед., тогда как для базы 16 м максимальное значение в этой же зоне составляет порядка 500 усл. ед. Это различие согласуется с тем, что увеличение базы измерения формирует более сильное пространственное усреднение и снижает проявление высокоамплитудных локальных возмущений на измеренной разностной фазе.

С учетом особенностей DAS и поведения сигнала в этих зонах наиболее вероятная интерпретация высокоэнергетических зон – превышение динамического диапазона интеррогатора и выход измерения из линейного режима (clipping/saturation). Для DAS подобные эффекты при сильных воздействиях приводят к искажению формы полезного сигнала и появлению «перегруженных» участков, которые уже не могут рассматриваться как линейная регистрация упругого поля.

При этом важно подчеркнуть, что если нелинейное искажение формируется на уровне первичной обработки (при оценке разностной фазы), то последующее усреднение / дальнейшая обработка не восстанавливают физически корректный сигнал, а лишь изменяют внешнее проявление артефакта (например, делают его более гладким и менее контрастным). Этот тезис далее учитывается при выборе стратегии обработки: база 16 м может повысить устойчивость выделения общего тренда волнового поля, но не является способом «починить» уже насыщенный отклик. Поэтому само по себе снижение СПМ при увеличении базы не следует трактовать как повышение физической корректности записи в зоне перегрузки: в условиях выхода из линейного режима возможно, что часть полезной информации уже утрачена / искажена на первичном уровне, а усреднение лишь уменьшает контраст артефакта.

В связи с этим в последующих разделах выполняется независимый анализ данных для обеих баз измерения (8 и 16 м): вариант $GL = 8$ м рассматривается как основной на участках с корректным (линейным) откликом и более высоким потенциальным разрешением, тогда как вариант $GL = 16$ м рассматривается как дополнительный для повышения устойчивости выделения полезного сигнала в интервалах с пониженным качеством регистрации.

Для количественного контроля качества результатов обработки для каждой анализируемой группы каналов (базы наблюдения в PMASW или D) вводится коэффициент, который может быть интерпретирован как степень доверия к данным. Для формирования такого коэффициента выбирается порог отбраковки каналов (отмечен серой штриховой линией на рис. 5) как $T = 3 \cdot \text{median}(\text{СПМ})$, где СПМ – упомянутая ранее спектральная плотность

мощности. Значения СПМ выше T интерпретировались как индикатор существенного превышения динамического диапазона. Для каждой базы D определялось число каналов N_{bad} , выходящих за порог T , и рассчитывался коэффициент доверия как $C = 1 - \frac{N_{bad}}{N}$, где N – общее число каналов в базе D . Значения C , близкие к 1, соответствуют высокой достоверности, близкие к 0 – низкой.

Далее рассматриваются промежуточные результаты обработки данных методом PMASW – построенные $(V_{ph} - f)$ -изображения на примере двух характерных участков линии DAS: 5–200 м – интервал содержит мощные локальные события и признаки аппаратурной перегрузки с низким коэффициентом доверия ($C = 0.17$ для $GL = 8$ м и $C = 0.20$ для $GL = 16$ м) и 1500–1700 м – интервал демонстрирует однородный по координате и времени сейсмический шум с устойчивым линейным откликом и высокой степенью доверия ($C = 0.93$ для $GL = 8$ м и $C = 0.95$ для $GL = 16$ м).

Из анализа $(V_{ph} - f)$ -изображений (рис. 6) следует, что в зоне высокой достоверности (1500–1700 м) оба варианта ($GL = 8$ и $GL = 16$ м) обеспечивают уверенное выделение амплитудного тренда дисперсионной кривой (рис. 6б,г). При этом $GL = 8$ м, как правило, дает более широкополосное представление волнового поля и лучшую выраженность высокочастотной части дисперсионной кривой. В зоне низкой достоверности (5–200 м) обе реализации демонстрируют ухудшение качества дисперсионного изображения (рис. 6а,в), однако при $GL = 16$ м наблюдается более устойчивая прослеживаемость на низких частотах (в частности, ниже примерно 5 Гц). Подобное поведение согласуется с тем, что увеличение GL повышает устойчивость длинноволновых компонент на фоне локальных артефактов за счет пространственного усреднения. В то же время, на частотах выше примерно 7 Гц при $GL = 16$ м полезный сигнал деградирует сильнее: большие значения GL ослабляют коротковолновые (высокочастотные) компоненты, что является известным следствием пространственного усреднения измерения в DAS.

Рис. 6. Изображения распределения амплитуд поверхностной волны в пространстве фазовой скорости и частоты, полученные по данным для базы наблюдения 8 м (а, б) и 16 м (в, г) на участке линии наблюдения 5-200 м (а, в) и 1500-1700 м (б, г)

Таким образом, данные для $GL = 8$ м и $GL = 16$ м в рассматриваемой задаче не являются взаимозаменяемыми, а дополняют друг друга: $GL = 16$ м повышает вероятность получения валидной низкочастотной части дисперсионной кривой в интервалах с аппаратурными перегрузками, тогда как $GL = 8$ м предпочтительнее в зонах с однородным шумом за счет более широкого частотного диапазона и меньшего сглаживания полезного сигнала.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Инверсия была выполнена для всех дисперсионных кривых, полученных вдоль профиля при обработке данных для $GL = 8$ м и $GL = 16$ м, были построены двумерные разрезы скорости поперечной волны (рис. 7а,б). На оба разреза нанесен упомянутый ранее график степени доверия C , рассчитанного по доле каналов с превышением порогового значения СПМ в каждой D . Такой способ позволяет прямо в итоговой визуализации отделять области, где результат получен по статистически устойчивым данным, от участков, где велика вероятность аппаратных искажений.

Качественно оба разреза демонстрируют близкое общее строение: выделяются относительно низкоскоростная верхняя толща, переходная зона и высокоскоростные горизонты на больших глубинах. Различия между $GL = 8$ м и $GL = 16$ м проявляются преимущественно в деталях и в устойчивости изображения на участках с низкой степенью доверия. Сравнение разрезов показывает, что увеличение базы измерения до $GL = 16$ м в среднем приводит к более сглаженному пространственному распределению скоростей и к более устойчивой визуализации глубинной части разреза на ряде «проблемных» интервалов. Это согласуется с тем, что $GL = 16$ м повышает устойчивость выделения низкочастотной части дисперсионного изображения, но одновременно такое усреднение может ослаблять коротковолновые компоненты и ухудшать высокочастотную часть дисперсионной кривой, снижая разрешение по приповерхностным слоям.

С учетом свойств двух наборов данных итоговый 2D-разрез целесообразно представлять как объединенную (сводную) модель, полученную усреднением разрезов для $GL = 8$ м и $GL = 16$ м (рис. 7в). Практический смысл такого подхода заключается в том, что в интервалах высокой степени доверия $GL = 8$ м обеспечивается лучшее разрешение верхней части разреза, а в интервалах пониженной достоверности $GL = 16$ м повышается вероятность выделения глубинных границ.

Рис. 7. Скоростные модели верхней части геологического разреза, полученные методом PMASW по данным для базы измерения 8 м (а) и 16 м (б), а также их усреднением (в)

Для интерпретации полученной скоростной модели необходимо сопоставить ее с обобщенными сведениями о геологическом строении верхней части разреза под г. Москва. Согласно инженерно-геологическим исследованиям, г. Москва расположен на платформенной территории, где над кристаллическим фундаментом сформирован мощный осадочный чехол

(примерно 1.5-2.5 км), однако с точки зрения инженерной геологии ключевое значение имеет верхняя часть разреза до глубины порядка 100-150 м.

Эта верхняя толща (снизу-вверх) обычно включает в себя карбоновые карбонатно-глинистые отложения (известняки, доломиты, мергели и глины), юрско-меловые глины и пески, а также четвертичные ледниковые, флювиогляциальные и аллювиальные отложения [14]. Публикации по геологическим рискам для Москвы подчеркивают, что кровля карбоновых отложений в пределах Москвы залегает неравномерно и может встречаться на глубинах примерно от 5 до 150 м. Такая изменчивость связана с древней эрозией, развитием погребенных долин и расчлененностью докайнозойского рельефа [15].

При этом в исследованиях для локальных инженерных объектов (например, при строительстве метро) приводятся примеры залегания карбонового известняка на глубинах порядка 30–65 м с перекрытием юрскими и четвертичными толщами [16]. Для юрской части разреза отмечается значительная изменчивость мощности глин: в ряде районов сохраняющаяся толща юрских (калловей-оксфорд) глин может достигать десятков метров (в литературе приводятся значения примерно до 50 м), тогда как на водоразделах мощность может быть существенно меньше. Четвертичные отложения по данным инженерно-геологических обобщений варьируются от нескольких метров до десятков метров, достигая примерно 50 м в наиболее мощных участках [17].

Сопоставление скоростной структуры и пород выполнено на основе опубликованных диапазонов скоростей поперечных волн для основных типов грунтов (пески, глины, карбонаты), согласно которым рыхлые и водонасыщенные отложения характеризуются значениями $V_s < 300\text{--}500$ м/с, у плотных глинистых и песчаных грунтов этот параметр доходит примерно до 800–1000 м/с, тогда как консолидированные карбонатные породы обычно имеют $V_s > 1000$ м/с.

С учетом приведенных выше сведений предположительная интерпретация скоростной структуры вдоль профиля может быть сведена к выделению двух основных зон.

- Первая зона представляет собой верхнюю низко- и среднескоростную толщу со значениями V_s порядка 200–1000 м/с (основная часть значений сосредоточена в диапазоне 500–700 м/с) и мощностью до 50 м. Она соответствует комплексу четвертичных, техногенных и юрско-меловых песчано-глинистых отложений, широко распространенных на территории Москвы. Для данной толщи характерна значительная латеральная изменчивость мощности и скоростных характеристик, что согласуется с известной сложностью строения ВЧР. Следует

учитывать, что полученная модель является эффективной (усредненной по глубине и латерально в пределах апертуры PMASW), и она не отражает тонкослоистую структуру разреза.

- Вторая зона характеризуется значениями $V_s > 1000$ м/с и может соответствовать плотным консолидированным породам, включая карбонатные отложения карбона. Интерпретируемая кровля данной толщи может быть оценена в диапазоне 50–100 м, что отражает ее выраженную латеральную изменчивость, связанную с неровностью кровли карбонового комплекса и наличием погребенных эрозионных форм рельефа. Отметим, что указанная структура наиболее устойчиво проявляется в интервалах с высоким коэффициентом доверия, тогда как в зонах пониженного качества данных глубинное положение границ менее определено.

Однако без независимой валидации (скважины, ВСП, др.) данная интерпретация носит предположительный характер. Следует подчеркнуть, что обратная задача является неединственной, а соответствие V_s литологическим типам неоднозначно, поэтому при отсутствии калибровочных данных интерпретация разреза должна рассматриваться как геофизическая (скоростная), а не строго геологическая.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована практическая применимость системы DAS и интеррогатора «Дунай» для решения задачи восстановления верхней части геологического разреза вдоль протяженной трамвайной линии методом пассивного многоканального анализа поверхностных волн в условиях интенсивного городского шума. В ходе обработки пассивной непрерывной сейсмической записи деформации вдоль оптоволоконной линии длиной около 2.5 км построены дисперсионные кривые и выполнена их инверсия с построением двумерных разрезов скоростей поперечной волны до глубины примерно 200 м.

Для повышения устойчивости решения применена параллельная обработка данных с базами измерения $GL = 8$ и $GL = 16$ м; полученные разрезы оказались согласованными по общему строению, а итоговая модель представлена их усреднением, что позволило совместить более широкополосную информативность $GL = 8$ м и повышенную устойчивость $GL = 16$ м в интервалах с превышением динамического диапазона записи интеррогатором. Контроль качества реализован введением коэффициента доверия, рассчитанного по доле каналов с превышением порогового значения спектральной плотности мощности. Предложенный подход к учету качества данных позволяет контролируемо интерпретировать результаты даже при наличии насыщения сигнала.

Ключевые аппаратно-методические выводы связаны с тем, что в условиях длительности импульса 80 нс эффективный пространственный отклик определяется не только заданной базой измерения, но и параметрами первичной обработки интеррогатора, а увеличение GL до 16 м фактически усиливает пространственное усреднение и может снижать проявление локальных артефактов. При этом выявлено принципиально важное ограничение: участки превышения динамического диапазона, возникающие на первичном уровне формирования разностной фазы, не восстанавливаются последующей постобработкой и должны рассматриваться как зоны пониженной достоверности, даже если при $GL = 16$ м их проявления выглядят менее контрастными. Рекомендуется подбирать режимы работы интеррогатора (включая параметры, влияющие на линейность и устойчивость к сильным воздействиям) под ожидаемую мощность городского сигнала; при обработке использовать $GL = 8$ м как основной вариант на устойчивых участках, а $GL = 16$ м как вспомогательный в интервалах с выходом из линейного режима, с обязательной маркировкой таких зон на итоговом разрезе.

Полученный результат имеет важное практическое значение и показывает, что использование существующей городской волоконно-оптической инфраструктуры позволяет решать задачу построения скоростной модели верхней части разреза, согласующейся с региональными геологическими представлениями, даже в условиях реального городского шума с учетом нелинейных искажений и пространственного отклика системы. Ограничения результатов исследования связаны с неединственностью инверсии дисперсионных кривых и отсутствием прямой независимой валидации скоростного разреза; для окончательной геологической интерпретации необходимы сопоставления с данными бурения и локальными геофизическими измерениями.

Работа показывает, что корректное сочетание приборных настроек DAS и обработки методом PMASW с обязательным количественным контролем качества данных делает городской транспортный шум полноценным источником информации для решения задач инженерной сейсморазведки и одновременно служит тестом реальных возможностей технологии распределенного акустического зондирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2026-0052.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fernández-Ruiz M.R., Soto M.A., Williams E.F., Martin-Lopez S., Zhan Z., Gonzalez-Herraez M., Martins H.F.* APL Photonics. 2020. V. 5. № 3. Art. No. 030901.
<https://doi.org/10.1063/1.5139602>.
2. *Dou S., Lindsey N., Wagner A.M., Daley T.M., Freifeld B., Robertson M., Ajo-Franklin J.B.* Scientific Reports. 2017. V. 7. Art. No. 11620.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-11986-4>.
3. *Ajo-Franklin J.B., Dou S., Lindsey N.J., Monga I., Tracy C., Robertson M., Rodriguez Tribaldos V., Ulrich C., Freifeld B., Daley T.M., Li X.* Scientific Reports. 2019. V. 9. Art. No. 1328.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36675-8>.
4. *Park C.B., Miller R.D., Xia J.* Geophysics. 1999. V. 64. № 3. P. 800–808.
<https://doi.org/10.1190/1.1444590>.
5. *Park C.B., Miller R.D.* Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2008. V. 13. № 1. P. 1–11.
<https://doi.org/10.2113/JEEG13.1.1>.
6. *Abudeif A.M., Fat-Helbary R.E., Mohammed M.A., Alkhashab H.M., Masoud M.M.* Journal of African Earth Sciences. 2019. V. 157. Art. No. 103512.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.05.020>.
7. *Cheng F., Lindsey N.J., Sobolevskaia V., Dou S., Freifeld B., Wood T., James S.R., Wagner A.M., Ajo-Franklin J.B.* Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. № 10. e2021GL097195.
<https://doi.org/10.1029/2021GL097195>.
8. *Masoudi A., Newson T.P.* Review of Scientific Instruments. 2016. V. 87. № 1. Art. No. 011501.
<https://doi.org/10.1063/1.4939482>.
9. *Lindsey N.J., Rademacher H., Ajo-Franklin J.B.* Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. № 2. e2019JB018145.
<https://doi.org/10.1029/2021JB018145>.
10. *Goodman J.W.* Journal of the Optical Society of America. 1976. V. 66. № 11. P. 1145–1150.
<https://doi.org/10.1364/JOSA.66.001145>.
11. *Наний О.Е., Никитин С.П., Трещиков В.Н.* Автометрия. 2023. Т. 59. № 1. С. 87–114.
<https://doi.org/10.15372/AUT20230109>.
12. *Li Y., Karrenbach M., Ajo-Franklin J. (eds.).* Distributed Acoustic Sensing in Geophysics: Methods and Applications. John Wiley & Sons, 2022.
<https://doi.org/10.1002/9781119521808>.
13. *Yablokov A.V., Efremov R.A., Dergach P.A.* Seismic Instruments. 2025. V. 61. № 1. P. 91–104.
<https://doi.org/10.3103/S0747923925700276>.
14. *Osipov V.I.* Geological Society, London, Engineering Geology Special Publication. 2009. V. 22.
15. *Eremina O., Kozliakova I., Anisimova N., Kozhevnikova I.* Journal of Nepal Geological Society.

2018. V. 55. № 1. P. 133–140.

<https://doi.org/10.3126/jngs.v55i1.22802>.

16. Zhukov S.A. Mining Science and Technology (Russia). 2024. V. 9. № 3. P. 283–291.

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-04-259>.

17. Kozlyakova I.V., Eremina O.N., Anisimova N.G., Kozhevnikova I.A. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications. 2016. V. 27. P. 45–54.

<https://doi.org/10.1144/EGSP27.4>.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Принципиальная схема работы системы из интеррогатора и DAS

Рис. 2. Внешний вид интеррогатора «Дунай» (вид со стороны разъемов подключения)

Рис. 3. На карте Москвы синим маркером показан участок эксперимента (**а**), а серым цветом – линия DAS (**б**)

Рис. 4. Пространственно-временные записи (сейсмограммы) сейсмического шума, зарегистрированного с помощью DAS вдоль трамвайной линии для двух значений базы измерения: 8 м (**а**) и 16 м (**б**)

Рис. 5. Частотно-пространственные представления сейсмограмм (F-X-спектры) для данных с базой измерения 8 м (**а**) и 16 м (**б**)

Рис. 6. Изображения распределения амплитуд поверхностной волны в пространстве фазовой скорости и частоты, полученные по данным для базы наблюдения 8 м (**а, б**) и 16 м (**в, г**) на участке линии наблюдения 5-200 м (**а, в**) и 1500-1700 м (**б, г**)

Рис. 7. Скоростные модели верхней части геологического разреза, полученные методом PMASW по данным для базы измерения 8 м (**а**) и 16 м (**б**), а также их усреднением (**в**)

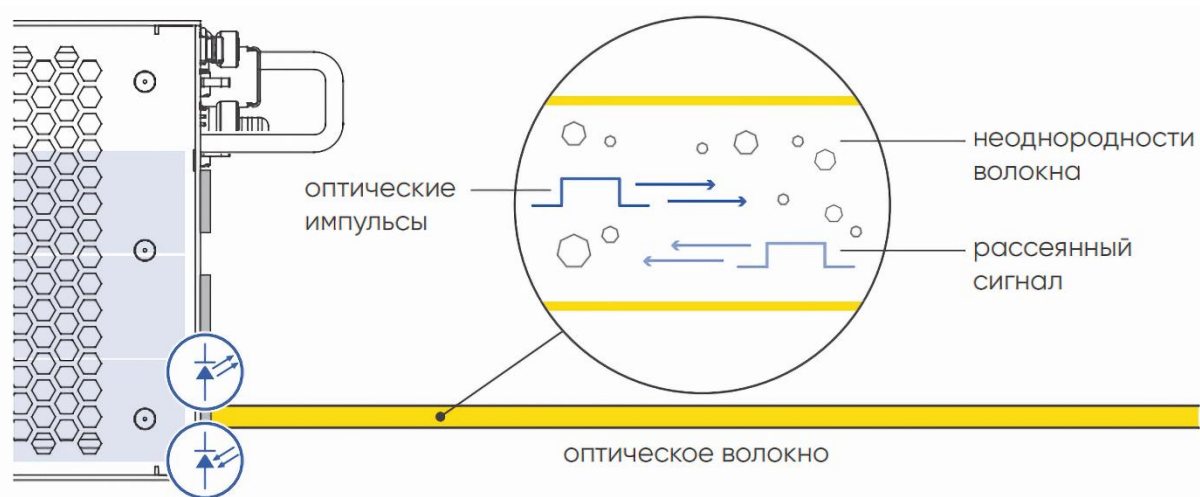
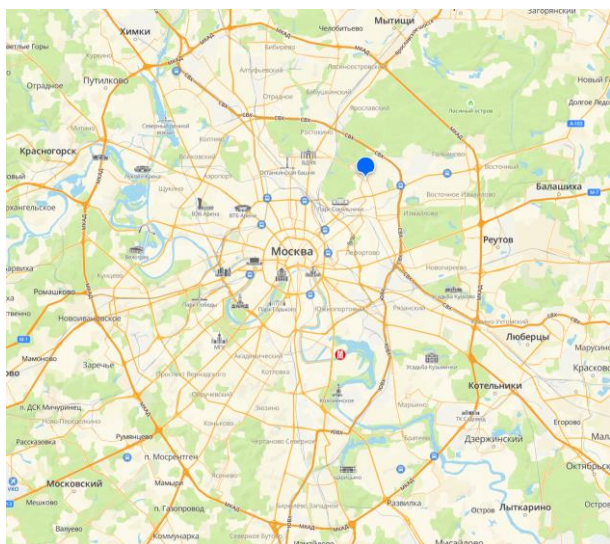
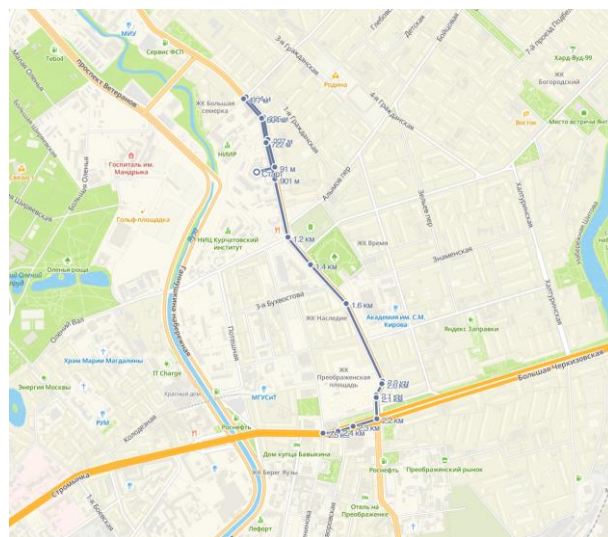


Рис. 1.

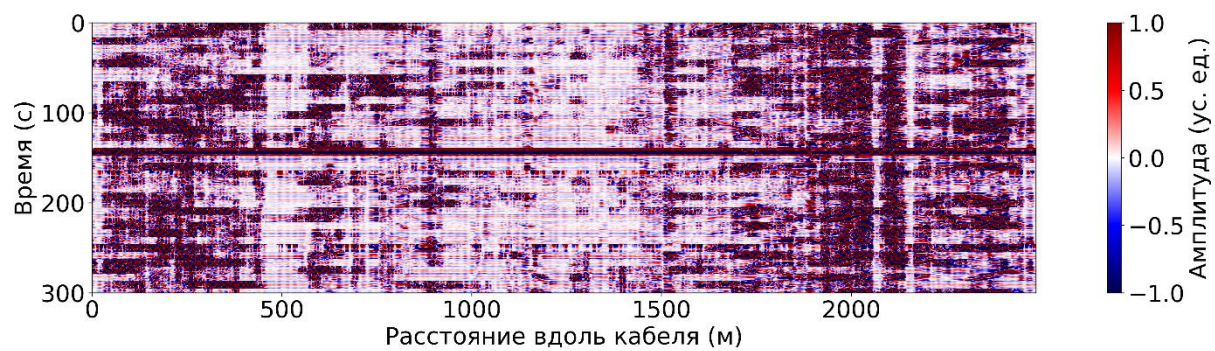


(a)

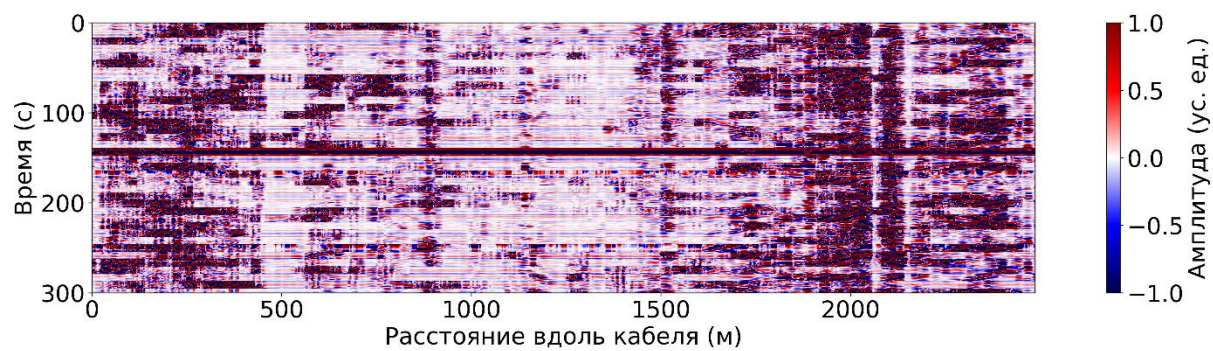


(б)

Рис. 3.

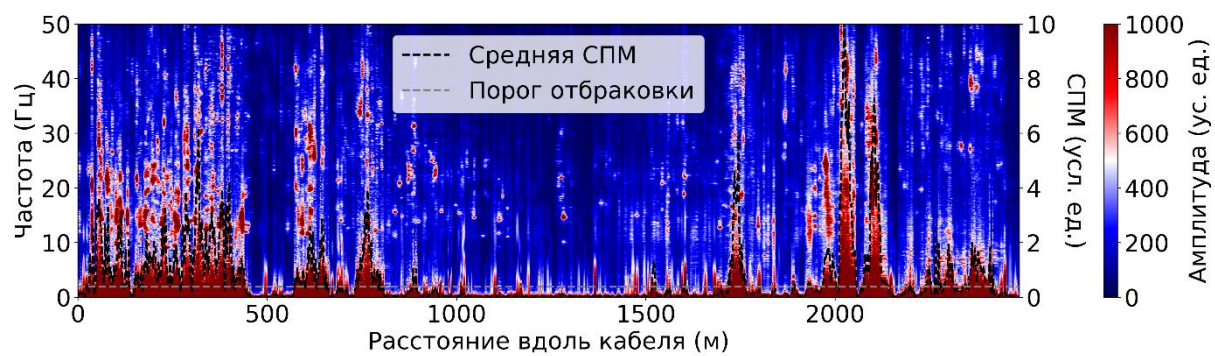


(a)

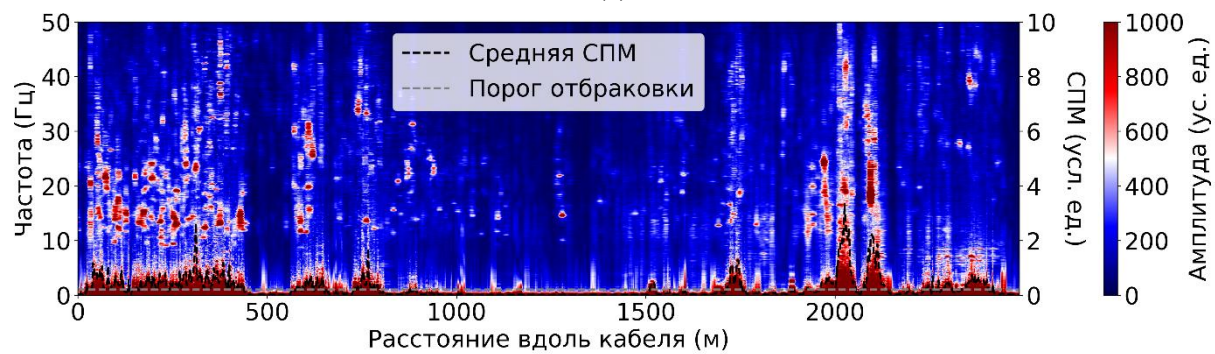


(б)

Рис. 4.

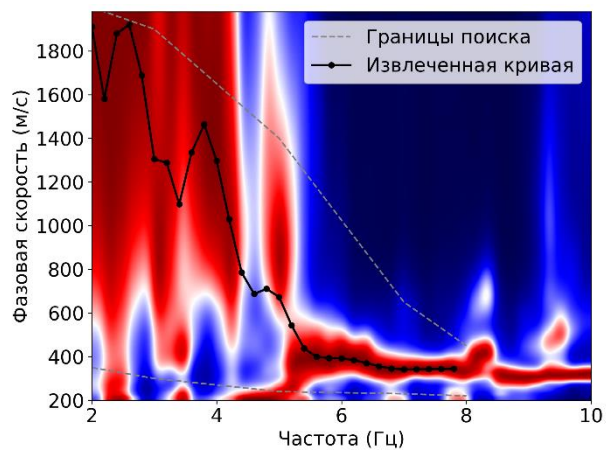


(а)

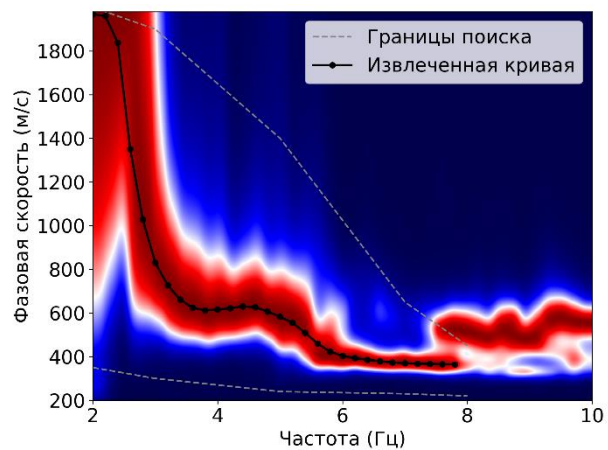


(б)

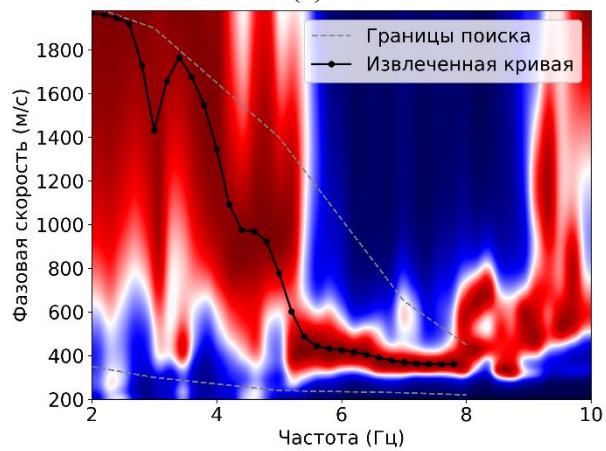
Рис. 5.



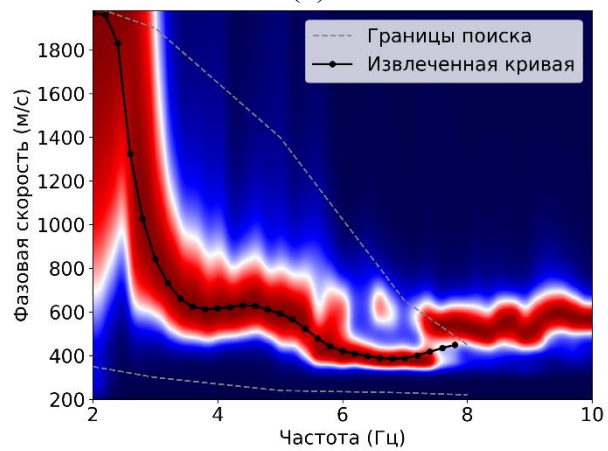
(а)



(б)

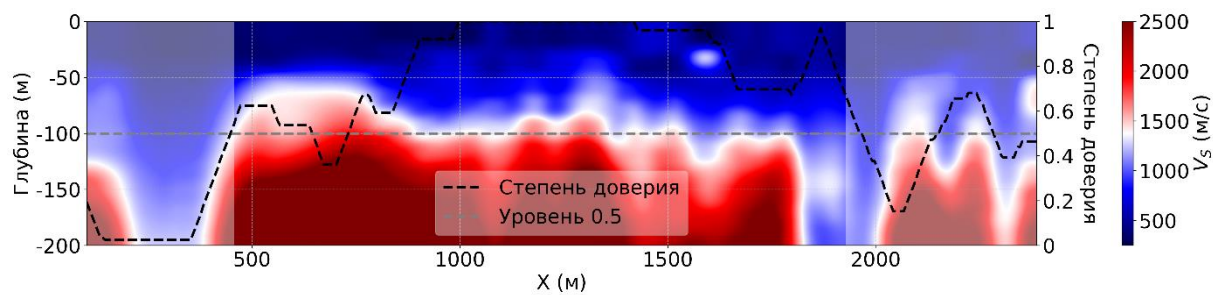


(в)

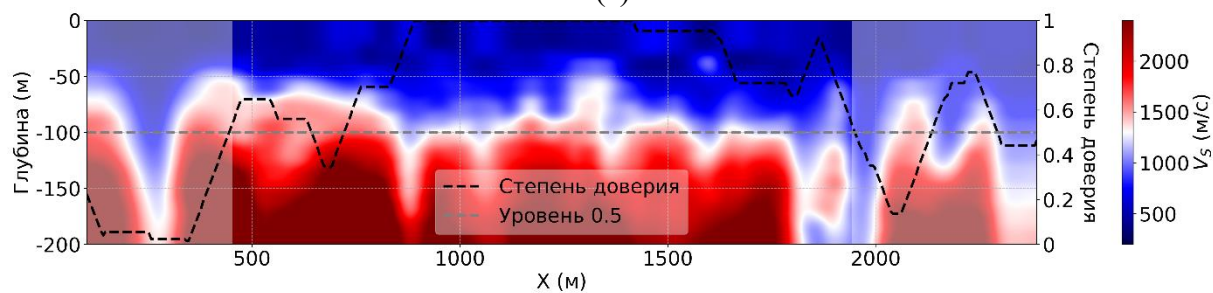


(г)

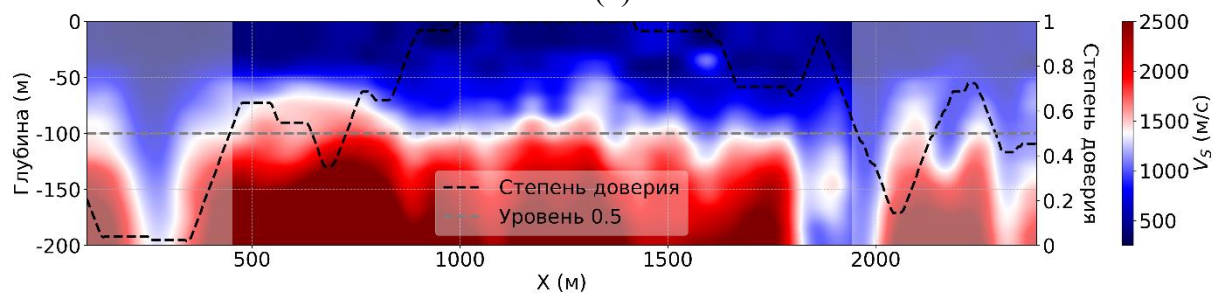
Рис. 6.



(а)



(б)



(в)

Рис. 7.