

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

УДК 534.2; 681.7; 551.326.7

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ
ПРИМЕНЕНИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
КОЛЕБАНИЙ ПЛАВУЧЕГО ЛЬДА¹**

©2026 г. Д. А. Преснов ^{a,*}, И. С. Пономарев ^{b,c}, К. В. Кислов ^d, И. В. Фокин ^a,
Н. В. Шамаев ^a, Р. А. Жостков ^a, В. В. Гравиров ^a, Э. А. Фомиряков ^b,
А. Л. Собисевич ^a, В. Н. Трещиков ^b, Д. Р. Харасов ^b, А. С. Шуруп ^{a,c}

^a *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук*

Россия, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1

^b *ООО "Т8"*

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

^c *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

^d *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики*

Российской академии наук

Россия, 117997, Москва, 117997, ул. Профсоюзная, 84/32

**E-mail: presnov@physics.msu.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 18.05.2026

Принята к публикации 17.06.2026

Представлены результаты натурного эксперимента по применению фазочувствительного рефлектометра для регистрации колебаний оптоволоконного кабеля, установленного в ледовом покрове на акватории. В эксперименте использовались параллельно проложенные оптические кабели с защитными оболочками различных типов, а также референсная сейсмостанция с линейной расстановкой трехкомпонентных геофонов. На основе анализа записей распределенного акустического зондирования в ледовой пластине идентифицированы квазипродольная и изгибная волны, получены их дисперсионные характеристики и по результатам инверсии восстановлена толщина ледового покрова, согласующаяся с данными прямых измерений. Показана принципиальная возможность мониторинга толщины и упругих параметров ледового покрова методом

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

распределенного акустического зондирования, в том числе с использованием оптоволоконных кабелей, проложенных по дну водоема.

Ключевые слова: DAS, ϕ -OTDR, ледовый покров, изгибные волны, Арктика, сейсмоакустика.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сейсмоакустика ледового покрова водоемов и морских акваторий привлекает внимание исследователей во всем мире в силу выраженной практической важности этого направления. Знание характеристик льда – его толщины, плотности, модуля Юнга – необходимо для обеспечения безопасности судоходства, эксплуатации ледовых переправ и прогнозирования ледовых явлений. Традиционно эти параметры определяются контактными методами. Сейсмоакустические технологии, основанные на анализе дисперсионных кривых упругих волн, распространяющихся в ледовой пластине, помимо механических характеристик позволяют отслеживать смещения, деформации и процессы торошения льда [1].

Особую актуальность задача мониторинга ледового покрова приобретает в контексте интенсивного освоения Северного морского пути (СМП) – стратегической транспортной артерии, связывающей европейскую часть России с Дальним Востоком. Устойчивый рост грузопотока по СМП требует оперативного и надежного контроля ледовой обстановки на протяжении тысяч километров арктического побережья. Информация о толщине и механических свойствах ледового покрова критически важна для обеспечения безопасной проводки судов и планирования ледокольного сопровождения, ведения береговых работ, выгрузки на лед людей и материальных ценностей [2]. Вместе с тем традиционные точечные методы измерений не обеспечивают необходимого пространственного охвата при мониторинге столь протяженных маршрутов. Развертывание десятков и сотен автономных сейсмических станций в суровых арктических условиях сопряжено с чрезвычайными логистическими трудностями и высокой стоимостью [3].

Перспективным решением данной проблемы является технология распределенного акустического зондирования (DAS – distributed acoustic sensing). Методика DAS основана на когерентной рефлектометрии оптического волокна, она позволяет преобразовать стандартный телекоммуникационный оптоволоконный кабель длиной в десятки километров в непрерывную линейную антенну, состоящую из тысяч виртуальных сейсмических датчиков с шагом от единиц до десятков метров. При этом дорогостоящий интеррогатор располагается в безопасном месте на берегу, а на обследуемом участке размещается лишь пассивный кабель, не требующий электропитания и устойчивый к суровым климатическим условиям. Таким образом, DAS обеспечивает высокое пространственное разрешение при существенно меньших затратах на развертывание по сравнению с сетями дискретных датчиков, что делает эту

технологии естественным кандидатом для мониторинга ледовой обстановки вдоль трассы СМП без участия человека. Другой важной областью применения DAS-мониторинга является оценка несущей способности льда на временных ледовых переправах, которые широко используются в районах Крайнего Севера и Сибири в зимний период. Оперативный контроль состояния таких переправ имеет первостепенное значение для безопасности тяжелого транспорта.

Следует подчеркнуть, что применение DAS не ограничивается только льдом: принцип распределенного зондирования применим к задачам геофизического мониторинга и в других труднодоступных местностях – на болотистых территориях тундры, в горных областях, а также в районах вулканической активности [4]. Развитие технологий беспилотных аппаратов открывает принципиально новые возможности для оперативного развертывания оптоволоконных сенсоров в подобных условиях. Укладка кабеля с помощью дронов, способных работать на дальности до нескольких километров, позволяет существенно сократить время подготовки профилей и исключить необходимость присутствия персонала на обследуемом участке (в том числе под водой).

В последние годы интерес к применению DAS для исследования ледового покрова заметно возрос. В работе [5] продемонстрирована возможность измерения механических характеристик морского льда методами распределенного акустического зондирования. В работе [6] представлены результаты мониторинга сейсмических событий во льду. В 2024 г. авторами настоящей работы был проведен первый этап экспериментальных исследований характеристик ледового покрова методом DAS на Клязьминском водохранилище [7], где использовались оптические кабели, свернутые в петли и замороженные в лед. Полученные результаты подтвердили принципиальную возможность регистрации изгибных волн в ледовом покрове с помощью DAS, однако они также выявили ряд методических вопросов, требующих дальнейшего изучения, а именно: выбор типа кабеля и способа его укладки, а также возможность регистрации изгибных волн горизонтальным прямолинейным волокном.

В настоящей статье представлены результаты второго этапа эксперимента, проведенного в феврале 2026 г. на Клязьминском водохранилище. Целью работы являлось систематическое сравнение различных компонентов измерительной системы – кабелей, способов развертывания и источников сейсмических сигналов для выработки методических рекомендаций по применению DAS при мониторинге ледового покрова.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился в феврале 2026 г. на гидроакустическом полигоне физического факультета Московского государственного университета, расположенном на

Клязьминском водохранилище в Московской области. Водохранилище в зимний период представляет собой покрытый льдом водоем. Несмотря на обильные снегопады зимой 2025–2026 гг., толщина снежного покрова на льду водохранилища не превышала 10 см вследствие сильных ветров. Толщина ледового покрова на момент проведения эксперимента составляла около 30 см, глубина воды вдоль измерительного профиля – приблизительно 2 м. Температура воздуха в день проведения измерений составляла -10°C , осадки и ветер отсутствовали. Заметим, что из-за многократных переходов температуры окружающей среды через 0°C в период перед выполнением эксперимента консолидированный лед был покрыт сверху сложной структурой, состоящей из смеси растаявшей воды, снега и нового льда, что приводило к дополнительному затуханию сейсмоакустических волн.

Измерительный профиль длиной около 60 м был подготовлен на льду в 150 м от берега. За несколько дней до основного эксперимента в период положительных температур воздуха в расчищенной от снега траншее были уложены два оптоволоконных кабеля. Для обеспечения надежного акустического контакта с ледовым покровом кабели были залиты водой со снегом и заморожены в поверхность льда.

В эксперименте использовались два типа оптического кабеля ОК-С-14-4 производства ООО “СаранскКабель-Оптика”, каждый из которых содержал четыре одномодовых волокна стандарта G.657.A2/G.657.B3. Кабели различаются материалом наружной оболочки: полиуретановая (шероховатая) и полиэтиленовая (гладкая). Внешний диаметр кабелей составляет 3.5 мм. Два кабеля были сварены на льду при помощи аппарата оптической сварки и уложены параллельно в одну траншею. Сварка оптических волокон в полевых условиях при отрицательных температурах и ветре оказалась весьма трудоемкой операцией, существенно увеличивающей время подготовки эксперимента. Торцы сварных соединений были защищены комплектами для защиты сростков и уложены в оптическую муфту.

Для регистрации сигналов DAS применялся программно-аппаратный комплекс оптоволоконных распределенных сенсоров “Агидель” разработки ООО “Т8” [8]. Данный комплекс представляет собой фазочувствительный когерентный рефлектометр (ф-OTDR), обеспечивающий пространственное разрешение от 0.3 м. Интеррогатор был размещен в сухом помещении на берегу, он соединялся с измерительным профилем оптическим кабелем доставки.

В качестве референсной системы использовалась линейная расстановка из восьми трехкомпонентных геофонов с шагом 5 м, установленных непосредственно в измерительной траншее. Запись сигналов геофонов осуществлялась сейсмостанцией DAQlink 4 с 24-разрядным АЦП, обеспечивающим динамический диапазон более 124 дБ. Частота дискретизации была задана 2000 Гц, длительность каждой записи составляла 5 с.

Регистрирующие системы – интеррогатор и сейсмостанция – были подключены к единому устройству синхронизации, что обеспечивало возможность корректного сопоставления записей. В качестве импульсных источников сейсмоакустических сигналов использовались удары кувалдой по поверхности льда. Воздействия производились как вдоль оси кабеля, так и под различными углами к нему, на удалении от 30 до 100 м.

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1. Один из кабелей (в полиуретановой оболочке) был предварительно проложен по дну водохранилища между двумя лунками с помощью подводного дрона Gladius Mini, а затем выведен на поверхность и уложен в траншею. Второй кабель (в полиэтиленовой оболочке) был проложен целиком по поверхности льда. Таким образом, конфигурация эксперимента позволяла одновременно сравнивать влияние материала оболочки кабеля и способа укладки (на поверхности льда и по дну) на качество регистрации сейсмоакустических сигналов.

Рис. 1. Схема проведения эксперимента и укладки оптоволоконного кабеля

На рис. 2 представлен усредненный амплитудный спектр DAS-сигнала, зарегистрированный при ударном возбуждении ледового покрова кувалдой, для двух типов наружной оболочки оптоволоконного кабеля: полиуретановой и полиэтиленовой. Спектры получены усреднением по ансамблю каналов. Можно сделать вывод, что в диапазоне частот примерно до 15 Гц наблюдается более высокий уровень амплитуды для кабеля с полиуретановой оболочкой по сравнению с полиэтиленовой. Максимальное различие амплитуд достигает порядка 12%, что свидетельствует о более эффективном акустическом контакте шероховатой полиуретановой оболочки с ледовой средой и, как следствие, лучшей передаче деформаций на оптоволокно. В дальнейшем в настоящей работе рассматриваются сигналы с полиуретанового кабеля.

Рис. 2. Спектральная амплитуда сигнала, вызванного ударом кувалды по льду, при регистрации оптоволоконными кабелями с различной оболочкой.

3. УПРУГИЕ ВОЛНЫ В ПЛАВУЧЕМ ЛЬДУ

Ледовый покров водоема представляет собой упругую пластину толщиной h , лежащую на поверхности жидкого полупространства. С точки зрения теории волновых процессов в пластинах [9], в такой системе могут распространяться волны Лэмба, а также поперечные нормальные волны с горизонтальной поляризацией. При выполнении условия малой толщины, когда длина волны существенно превышает толщину пластины ($\omega h/c_t \ll 1$, где ω – круговая частота, c_t – скорость поперечных волн в материале льда), в ледовой пластине могут существовать лишь три фундаментальные моды: симметричная волна Лэмба нулевого порядка s_0 – квазипродольная, антисимметричная волна Лэмба нулевого порядка a_0 – изгибная

и поперечная нормальная волна нулевого порядка SH_0 . Волны более высоких порядков возникают лишь при превышении соответствующих критических значений и в рассматриваемом диапазоне частот отсутствуют.

Квазипродольная волна s_0 . Волна представляет собой симметричное преимущественно продольное движение, в котором преобладает компонента U_x , а вертикальное смещение U_z мало. Фазовая скорость волны s_0 в пределе тонкой пластины не зависит от частоты и определяется выражением

$$c_{s_0} = c_l \sqrt{\frac{1-2\nu}{1-\nu}} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}},$$

где E – модуль Юнга льда, ρ – плотность льда, ν – коэффициент Пуассона, c_l – скорость продольных волн в неограниченном твердом теле. Эта скорость несколько меньше c_l вследствие податливости боковых граней пластины.

Поперечная волна SH_0 . В поперечных нормальных волнах присутствует только одна компонента смещения U_y , параллельная поверхности пластины и перпендикулярная направлению распространения. Деформация в этой волне является чистым сдвигом. Нулевая мода SH_0 является симметричной, и ее фазовая и групповая скорости не зависят от частоты:

$$c_{SH_0} = c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}.$$

Изгибная волна a_0 . Представляет собой антисимметричную волну, в которой преобладает поперечное смещение U_z . Траектория движения частиц – ретроградный эллипс, аналогичный рэлеевской волне поверхностного типа, с большой осью, ориентированной вертикально. Характерной особенностью изгибных волн является обратная дисперсия: высокочастотные составляющие распространяются быстрее низкочастотных. Для свободной пластины в вакууме фазовая скорость изгибной волны нулевого порядка в приближении тонкой пластины определяется формулой $c_{a_0} \approx 0.54\sqrt{\omega h c_l}$.

В случае ледовой пластины, плавающей на воде, необходимо дополнительно учитывать реакцию водного слоя и силу тяжести. Соответствующее дисперсионное уравнение изгибно-гравитационной волны приведено, например в работе [10]. Фазовая скорость такой волны определяется главным образом толщиной льда h и модулем Юнга E . Как следует из работы [11], при увеличении толщины льда на 50% фазовая скорость на частоте 10 Гц возрастает примерно вдвое, тогда как при таком же увеличении модуля Юнга – лишь примерно на 10%. Влияние остальных параметров (плотности льда, коэффициента Пуассона, глубины воды) на дисперсионную кривую мало. Таким образом, измерение дисперсионной кривой изгибной волны позволяет с высокой точностью определять толщину льда, а при совместном использовании с данными о скорости квазипродольной волны – также и модуль Юнга. Для

изгибной волны в приближении тонкой пластины отношение амплитуд горизонтальной и вертикальной компонент смещения на поверхности пластины ($z = h$) пропорционально kh , где k – волновое число. При $\omega h/c_0 \ll 1$ имеем $kh \ll 1$ и, следовательно, горизонтальная компонента значительно меньше вертикальной. В середине пластины ($z = 0$) горизонтальное смещение обращается в нуль и движение является чисто вертикальным.

Технология DAS основана на когерентной рефлектометрии: интеррогатор регистрирует изменение фазы обратно рассеянного в волокне излучения, вызванное деформацией волокна. Оптический сенсор чувствителен к продольной компоненте деформации вдоль оси кабеля, т. е. фактически он измеряет горизонтальную компоненту движения в направлении кабеля. Это обстоятельство определяет набор типов волн, регистрируемых горизонтальным прямолинейным кабелем, уложенным на поверхность льда. В квазипродольной волне при распространении вдоль оси кабеля преобладающая компонента смещения U_x является горизонтальной и продольной. Данный тип волн эффективно регистрируется DAS. В поперечной SH_0 -волне смещение U_y перпендикулярно оси кабеля, горизонтальная компонента вдоль кабеля равна нулю. Следовательно, SH -волна, распространяющаяся вдоль кабеля, горизонтальным оптоволоконным датчиком не регистрируется. В изгибной волне, несмотря на преимущественно вертикальный характер смещений, горизонтальная компонента U_x отлична от нуля на поверхности пластины, где закреплен кабель. Хотя она и мала по сравнению с вертикальной, ее величины достаточно для уверенной регистрации. Возможность записи изгибных волн горизонтальным прямолинейным волокном была теоретически обоснована в работе [5] и экспериментально подтверждена в ходе первого этапа настоящего исследования [7].

Таким образом, горизонтальный прямолинейный оптоволоконный кабель, вмороженный в поверхность льда, способен регистрировать два из трех фундаментальных типов волн ледовой пластины: квазипродольную волну s_0 и изгибную волну a_0 . Совместный анализ скорости первой и дисперсионной кривой второй позволяет определить толщину ледового покрова и его упругие характеристики. На рис. 3 представлен полученный в эксперименте пример записи волнового поля, возбужденного ударом кувалды по поверхности льда. Источник располагался на расстоянии 50 м от датчика. Три верхние трассы соответствуют трем компонентам (U_x , U_y , U_z) трехкомпонентного геофона. Нижняя трасса – скорость деформации (strain rate), зарегистрированная ближайшим к данному геофону каналом DAS.

Рис. 3. Сигнал от удара кувалдой по льду, регистрируемый вмороженным геофоном

На записи выделяются все три типа волн, описанных ранее, и их последовательность вступлений согласуется с теоретическими оценками скоростей. Первым регистрируется

высокочастотный импульс квазипродольной волны s_0 , наиболее отчетливо выраженный на продольной компоненте U_x . Практически одновременно с ним на поперечной горизонтальной компоненте U_y выделяется вступление SH_0 -волны, распространяющейся со скоростью c_t , меньшей скорости квазипродольной волны. Обе эти волны имеют импульсный характер и компактную форму, что соответствует их бездисперсионному распространению. Вслед за ними приходит наиболее интенсивный низкочастотный цуг – изгибная волна a_0 . Она доминирует по амплитуде на вертикальной компоненте U_z , однако ее горизонтальная составляющая U_x также хорошо различима. Характерной особенностью изгибной волны является выраженное расплывание импульса вследствие дисперсии: высокочастотные компоненты прибывают раньше низкочастотных, и с увеличением расстояния от источника цуг волны прогрессивно удлиняется во времени. Сопоставление нижней трассы (DAS, strain rate) с продольной компонентой геофона U_x показывает их высокое сходство по форме волны. Это закономерно, поскольку оптоволоконный сенсор, уложенный горизонтально вдоль оси профиля, измеряет именно продольную деформацию, которая пропорциональна пространственной производной горизонтального смещения U_x .

Таким образом, экспериментальные данные подтверждают изложенные выше теоретические положения: горизонтальное прямолинейное оптическое волокно, замороженное в поверхность льда, регистрирует квазипродольную и изгибную волны, содержащие всю информацию, необходимую для определения толщины и упругих характеристик ледового покрова.

4. ОПТОВОЛОКОННЫЙ СЕНСОР В ПЛАВУЧЕМ ЛЬДУ

На рис. 4 представлена сейсмограмма, полученная интеррогатором ПАК ОВРС “Агидель” при ударе кувалдой по поверхности льда на расстоянии около 35 м от ближайшего канала измерительного профиля. По горизонтальной оси отложен номер канала с шагом один метр, по вертикальной – время в отсчетах (при частоте дискретизации 2000 Гц). При этом сначала идет прямой кабель, уложенный по дну, затем перевернутый, уложенный по льду, а затем снова прямой, уложенный на льду. Амплитуда скорости деформации (strain rate) отображена красно-синей цветовой шкалой. На сейсмограмме отчетливо идентифицируются два типа волн. Желтыми линиями отмечены годографы изгибной волны, фазовая скорость которой в зависимости от частоты изменяется приблизительно от 30 до 200 м/с. Характерное расплывание волнового цуга с удалением от источника демонстрирует дисперсию этой моды: высокочастотные составляющие прибывают раньше низкочастотных, формируя типичную веерообразную структуру на сейсмограмме. Изгибная волна доминирует по амплитуде и уверенно прослеживается на значительном удалении от точки возбуждения. Зеленой линией

отмечен годограф квазипродольной волны со скоростью около 2400 м/с, которая была оценена по записям геофонов. В отличие от изгибной моды, эта волна прослеживается на сейсмограмме весьма слабо. Тем не менее вступления поддаются идентификации, и их анализ позволяет оценить скорость продольных волн в ледовой пластине. На записи уверенно идентифицируются как доминирующая изгибная волна, так и существенно более слабая квазипродольная волна, что подтверждает работоспособность системы для решения задач мониторинга ледового покрова.

Рис. 4. Пример сейсмограмм, зарегистрированных оптоволоконным кабелем с пространственным

При увеличении расстояния от точки удара до 100 м сигнал изгибной волны существенно ослабевал и в ряде повторений становился трудноразличимым на фоне шума. Помимо геометрического расхождения, значительный вклад в ослабление вносила сложная структура ледового покрова. В ходе эксперимента было установлено, что поверхность льда была покрыта слоем воды со снегом толщиной до 8 см, поверх которого образовался дополнительный тонкий слой вторичного льда. По всей видимости наличие водонасыщенного промежуточного слоя приводит к большему затуханию изгибной волны. Дополнительным фактором являлись условия возбуждения. Удар кувалдой по покрытой водой и мокрым снегом поверхности льда оказывался менее эффективным для генерации изгибных волн по сравнению с ударом по чистому сухому льду.

В описанных выше примерах источник располагался на оси измерительного профиля, т. е. волна распространялась вдоль кабеля. Однако при практическом мониторинге ледового покрова сейсмические события (трещинообразование, торошение, ледовые удары) могут происходить под произвольным углом к линии кабеля. Рассмотрим ситуацию, когда источник расположен под углом θ к профилю. DAS-датчик измеряет компоненту деформации вдоль оси кабеля. Для волны, приходящей под углом θ к направлению кабеля, регистрируемый сигнал определяется проекцией вектора деформации на ось волокна. Это приводит к различным зависимостям амплитуды от азимута. Квазипродольная и изгибные волны создают деформацию в направлении распространения, и проекция на ось кабеля убывает как $\cos^2\theta$. При углах 30° – 50° амплитуда сигнала уменьшается примерно в 2–4 раза по сравнению со случаем распространения вдоль кабеля. Таким образом, амплитуда регистрируемого сигнала существенно зависит от угла прихода, что создает азимутальную неоднозначность при использовании прямолинейного кабеля. Принципиально иная ситуация возникает для волны SH₀. При распространении строго вдоль кабеля ($\theta = 0$) эта волна, как было отмечено ранее, не регистрируется, поскольку смещения U_y перпендикулярны оси волокна. Однако при наклонном приходе ($\theta \neq 0$) поперечная деформация приобретает ненулевую проекцию на ось

кабеля, пропорциональную $\sin\theta \cdot \cos\theta$. Максимум чувствительности к SH_0 -волне приходится на угол $\theta = 45^\circ$. Таким образом, при ударе под углом 30° – 50° к профилю на записях DAS может появиться бездисперсионная мода, распространяющаяся со скоростью $c_t \approx 1300$ м/с по данным геофонов, которая при осевом расположении источника отсутствует. Регистрация SH_0 -волны представляет практический интерес, поскольку совместное использование скоростей квазипродольной и поперечной волн позволяет независимо определить коэффициент Пуассона и модуль Юнга для льда. Описанные эффекты диаграммы направленности оптоволоконного сенсора необходимо учитывать при планировании конфигурации измерительных профилей. Для устранения азимутальной неоднозначности и обеспечения регистрации всех трех типов волн целесообразно использовать конфигурации, содержащие участки, ориентированные под различными углами, например треугольные.

5. СПЕКТРАЛЬНО-ВОЛНОВОЙ АНАЛИЗ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ

Для количественного определения параметров ледового покрова по записям распределенного акустического зондирования необходимо извлекать из многоканальных сейсмограмм дисперсионные кривые волн, распространяющихся в ледовой пластине. Наиболее эффективным инструментом анализа многоканальных данных с высоким пространственным разрешением является двумерное преобразование Фурье по времени и вдоль пространственной координаты, позволяющее перевести сейсмограмму $u(x, t)$ в представление в плоскости “частота–волновое число” (f – k -диаграмма). Максимумы спектральной плотности в этой плоскости соответствуют дисперсионным кривым распространяющихся в волноводе мод.

На рис. 5 представлено f – k -представление сейсмограммы, зарегистрированной DAS при ударе кувалдой на удалении 100 м от измерительного профиля. Ввиду существенного различия временных и частотных характеристик квазипродольной и изгибной волн непосредственное применение двумерного преобразования Фурье ко всей сейсмограмме приводит к тому, что высокоамплитудная низкочастотная изгибная мода доминирует в спектре, маскируя квазипродольную волну. Для преодоления этой трудности была применена процедура раздельного спектрального анализа: на исходной сейсмограмме по временам вступлений выделялись два временных окна, содержащие соответственно квазипродольную и изгибную волны. Для каждого из окон независимо рассчитывалось двумерное преобразование Фурье, после чего результирующие f – k -спектры суммировались. Такая процедура позволяет одновременно визуализировать обе моды в едином представлении, несмотря на их существенно различающиеся амплитуды и спектральные диапазоны.

Рис. 5. Спектральное-волновое f – k -представление сейсмограммы активного эксперимента по данным DAS.

На f – k -диаграмме отчетливо выделяется прямолинейная дисперсионная ветвь квазипродольной волны, соответствующая бездисперсному распространению со скоростью около 2400 м/с (отмечена черной линией). Выше располагается дисперсионная ветвь изгибной волны, имеющая характерную форму с возрастающей фазовой скоростью на высоких частотах (обратная дисперсия). Обе моды уверенно идентифицируются на единой диаграмме. В настоящем эксперименте устойчивые дисперсионные кривые изгибной волны удавалось получать в диапазоне частот от 0.1 до 20 Гц. При приближении источника возбуждения к измерительному профилю частотный диапазон расширялся примерно до 50 Гц за счет увеличения отношения сигнал/шум на высоких частотах. По-видимому, причина этого заключается в сложной структуре ледового покрова.

Извлеченные зависимости $k(f)$ для изгибной волны были использованы для решения обратной задачи определения параметров ледового покрова методом, описанным ранее в работе [11]. В рамках этого подхода дисперсионное уравнение изгибной волны решается численно для заданных значений толщины льда h и модуля Юнга E , после чего параметры оптимизируются по критерию минимума расхождения между расчетной и экспериментальной дисперсионными кривыми. Значения плотности льда ($\rho = 900$ кг/м³), коэффициента Пуассона ($\nu = 0.41$) и глубины воды ($H = 2$ м) полагались фиксированными, поскольку чувствительность дисперсионной кривой к этим параметрам существенно ниже, чем к толщине и модулю Юнга. В результате выполнения инверсии толщина льда, определенная по дисперсионной кривой изгибной волны, составила 33 см с погрешностью порядка 2 см. Этот результат хорошо согласуется с данными прямых измерений, которые были получены путем бурения контрольных лунок. Теоретическая дисперсионная кривая, соответствующая восстановленным параметрам, показана на f – k -диаграмме белой линией, она демонстрирует хорошее совпадение с максимумами спектральной плотности в рассматриваемом частотном диапазоне.

Для верификации результатов, полученных методом распределенного акустического зондирования, был проведен независимый расчет дисперсионных кривых изгибной волны по данным референсной сеймостанции с линейной расстановкой трехкомпонентных геофонов. Для анализа многоканальных данных с малым числом датчиков (8 геофонов с шагом 5 м) применение двумерного преобразования Фурье менее эффективно, чем для плотной записи DAS. В этом случае более подходящим является метод фазового сдвига, основанный на суммировании сигналов каналов с компенсацией фазовых задержек, соответствующих заданной фазовой скорости.

На рис. 6 представлены дисперсионные кривые изгибной волны, рассчитанные методом фазового сдвига по двум независимым наборам данных: по горизонтальной (вдоль оси профиля) компоненте сигналов геофонов и по данным DAS от оптоволоконного кабеля, проложенного по дну водохранилища. Белой линией показана теоретическая дисперсионная кривая, полученная в результате инверсии данных поверхностного кабеля. Два независимо полученных дисперсионных изображения демонстрируют хорошее взаимное согласие и хорошее соответствие теоретической кривой. Особый интерес представляет успешная регистрация изгибной волны подводным кабелем, проложенным по дну водохранилища на глубине около 2 м. Оказалось, что донный кабель уверенно регистрирует изгибную волну, распространяющуюся по ледовому покрову, в диапазоне частот от 5 до 20 Гц. Физически это объясняется тем, что колебания ледовой пластины возбуждают в водном слое связанные с ними гидроакустические возмущения, вызывающие деформацию кабеля на дне. Подобная схема особенно привлекательна для постоянного мониторинга ледового покрова в течение всего зимнего сезона, когда развертывание поверхностных профилей затруднено или небезопасно.

Рис. 6. Дисперсионные кривые изгибной волны, зарегистрированные горизонтальным геофоном на льду

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента продемонстрировали, что отечественный оптоволоконный интеррогатор ПАК ОВРС “Агидель” (ООО “Т8”) пригоден для сейсмоакустического исследования плавучего ледового покрова и обеспечивает пространственное разрешение на уровне классических геофонов, обладая при этом существенно большей областью покрытия. DAS нового поколения позволяет регистрировать не только доминирующую изгибную волну, но и существенно более слабую квазипродольную волну. Кроме того, горизонтально направленные оптоволоконные сенсоры при наклонном приходе волны относительно оси кабеля способны регистрировать волны различных типов, включая поперечную волну SH_0 . Совместный анализ скоростей квазипродольной, поперечной и дисперсионной кривых изгибной волны позволяет определить все упругие параметры ледового покрова. В этой связи переход от разовых измерений к непрерывному мониторингу случайных сигналов естественной природы представляет интерес для будущих исследований. Продemonстрирована возможность регистрации изгибных волн в ледовом покрове с помощью оптоволоконного кабеля, проложенного по дну водоема. Это открывает перспективу использования подводных оптоволоконных телекоммуникационных кабелей на мелководном шельфе арктических морей

в качестве сенсорной инфраструктуры для мониторинга ледовой обстановки вдоль трассы Северного морского пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов Ю.А., Асминг В.Э., Баранов С.В., Федоров А.В., Виноградов А.Н.* Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 1. С. 5. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21437251>
2. *Преснов Д.А., Тимофеева А.Б.* Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 3. С. 295. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-295-309>
3. *Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Конечная Я.В.* Сейсмические приборы. 2025. Т. 61. № 2. С. 23. <https://elibrary.ru/item.asp?id=82520477>
4. *Шакирова А.А., Чебров Д.В., Ладыгин И.С., Сагирова А.Р., Коваленко Д.А.* ПТЭ. 2026. № 2.
5. *Nziengui-Bâ D., Coutant O., Moreau L., Boué P.* Geophys. J. Int. 2023. V. 233. № 2. P. 1166. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac504>
6. *Xie J, Zeng X F, Ni S D, et al.* 2025. Chinese J. Geophys. (in Chinese). 2025. V. 68(1). P. 153. <https://doi.org/10.6038/cjg2024R0583> .
7. *Kislov K.V., Spiridonov E.P., Presnov D.A et al.* Rus. J. Earth Sci. V. 25. P. ES6005. <https://doi.org/10.2205/2025ES001074>
8. *Fomiriakov E., Pushko P., Bengalskiy D., Kharasov D., Treshchikov V.* 5th EAGE Workshop on Fiber Optic Sensing for Energy Applications. 2025. V. 2025. P. 1. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202574007>
9. *Викторов И.А.* Звуковые поверхностные волны в твердых телах. Москва: Наука, 1981.
10. *Sobisevich A., Presnov D., Shurup A.* J. Mar. Sci. Eng. 2024. V. 12. №. 7. P. 1060. <https://doi.org/10.3390/jmse12071060>
11. *Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С.* Акустический журнал. 2023. Т. 69. № 5. С. 637. <https://doi.org/10.31857/S0320791923600385>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема проведения эксперимента и укладки оптоволоконного кабеля

Рис. 2. Спектральная амплитуда сигнала, вызванного ударом кувалды по льду, при регистрации оптоволоконными кабелями с различной оболочкой. Серым цветом показан уровень фонового шума

Рис. 3. Сигнал от удара кувалдой по льду, регистрируемый замороженным геофоном

Рис. 4. Пример сейсмограмм, зарегистрированных оптоволоконным кабелем с пространственным разрешением около 1 м (длина измерительной базы 1 м), номера каналов соответствуют рис. 1

Рис. 5. Спектральное-волновое f - k -представление сейсмограммы активного эксперимента по данным DAS. Белым цветом показана теоретическая дисперсионная кривая изгибной моды, черным цветом – теоретическая дисперсионная кривая квазипродольной моды

Рис. 6. Дисперсионные кривые изгибной волны, зарегистрированные горизонтальным геофоном на льду (**а**) и оптоволоконным кабелем, установленным на дне (**б**)

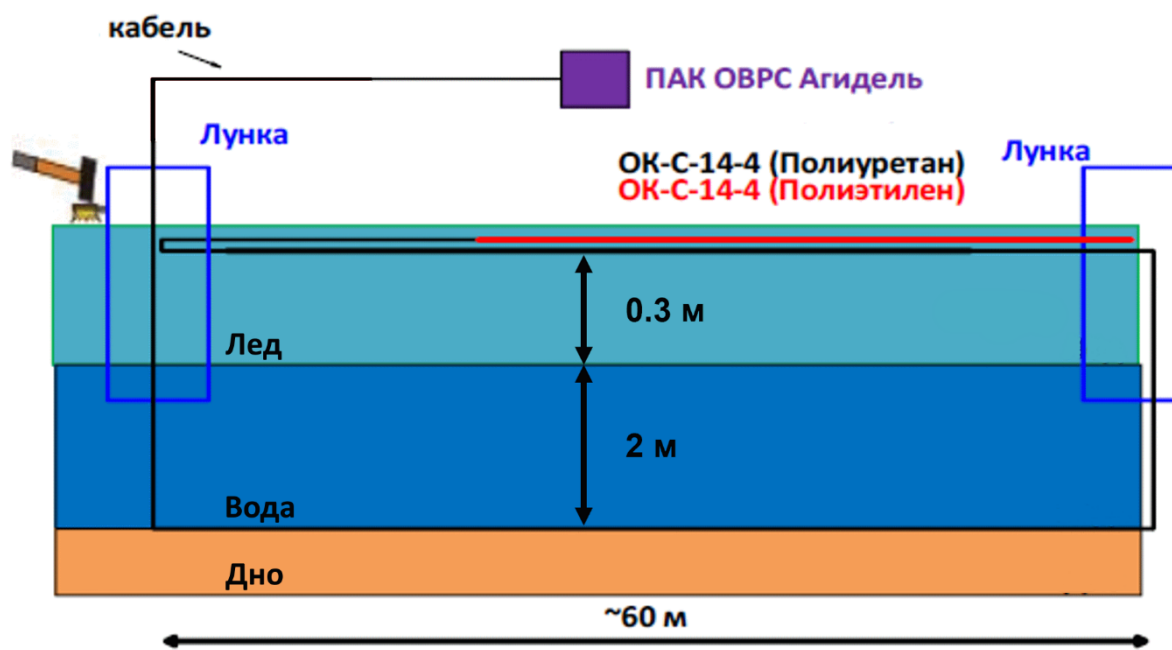


Рис. 1.

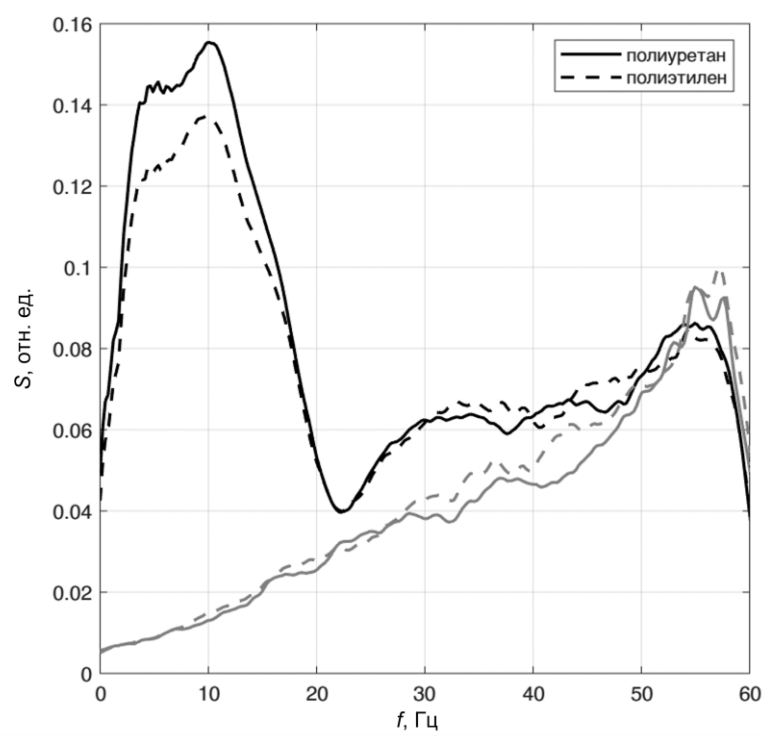


Рис. 2.

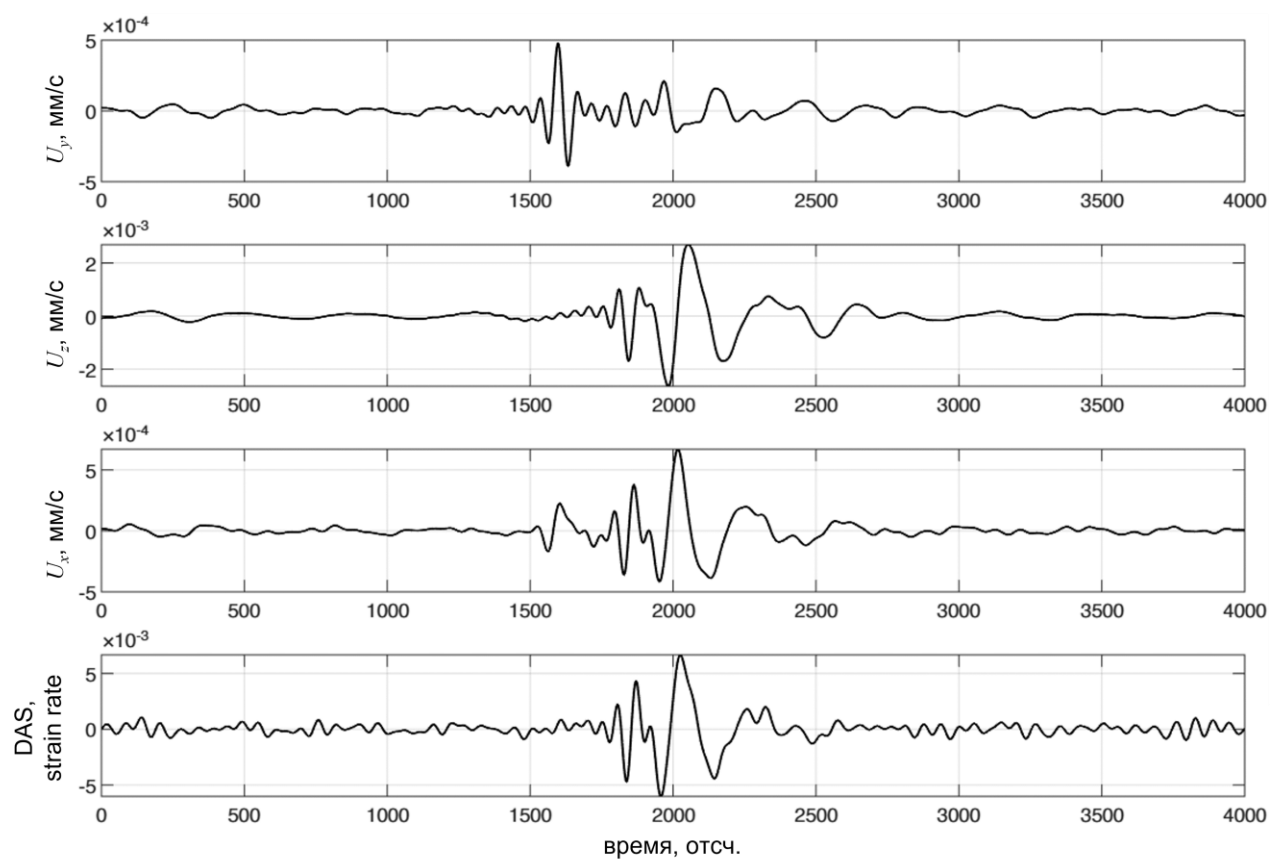


Рис. 3.

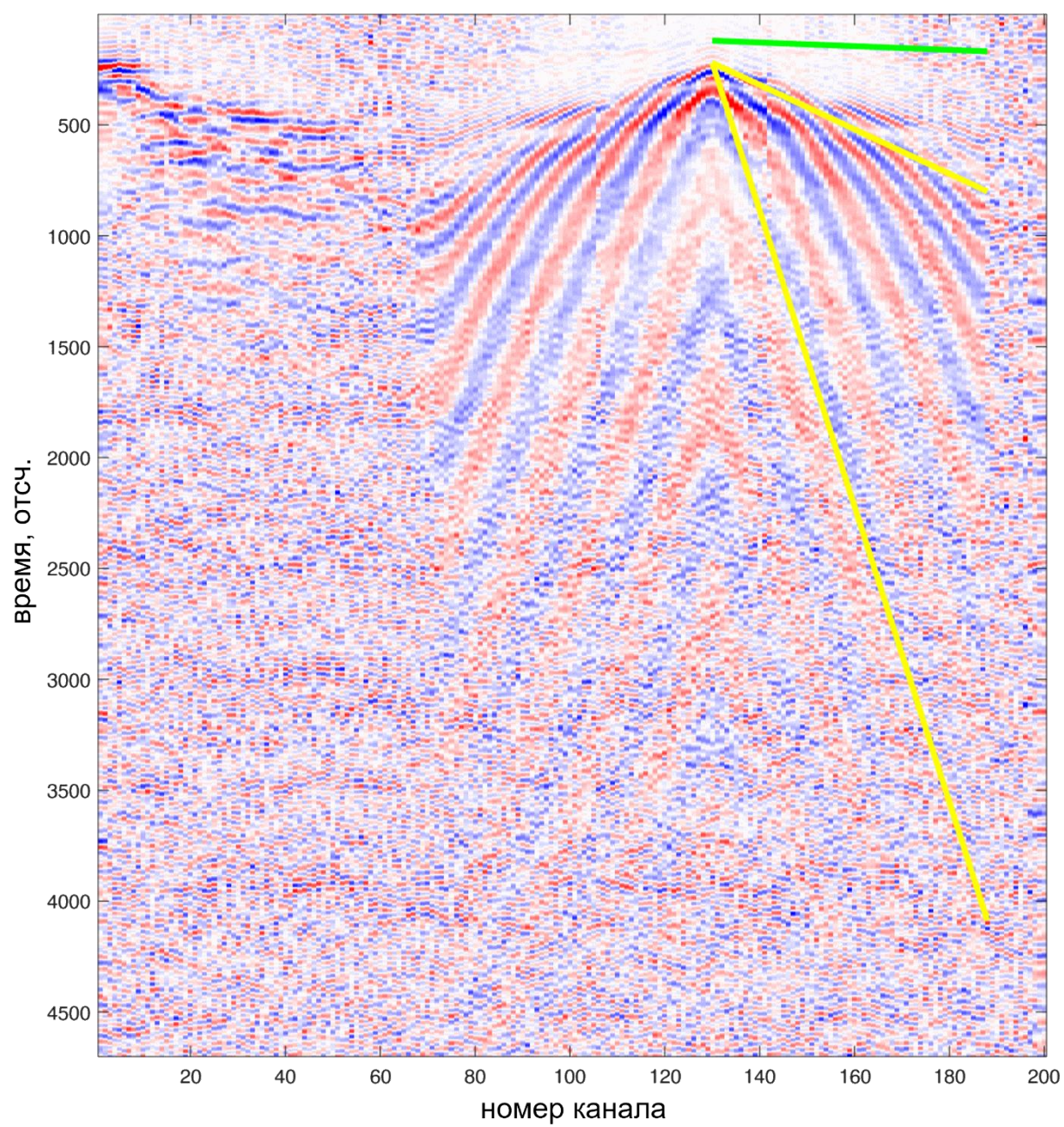


Рис. 4.

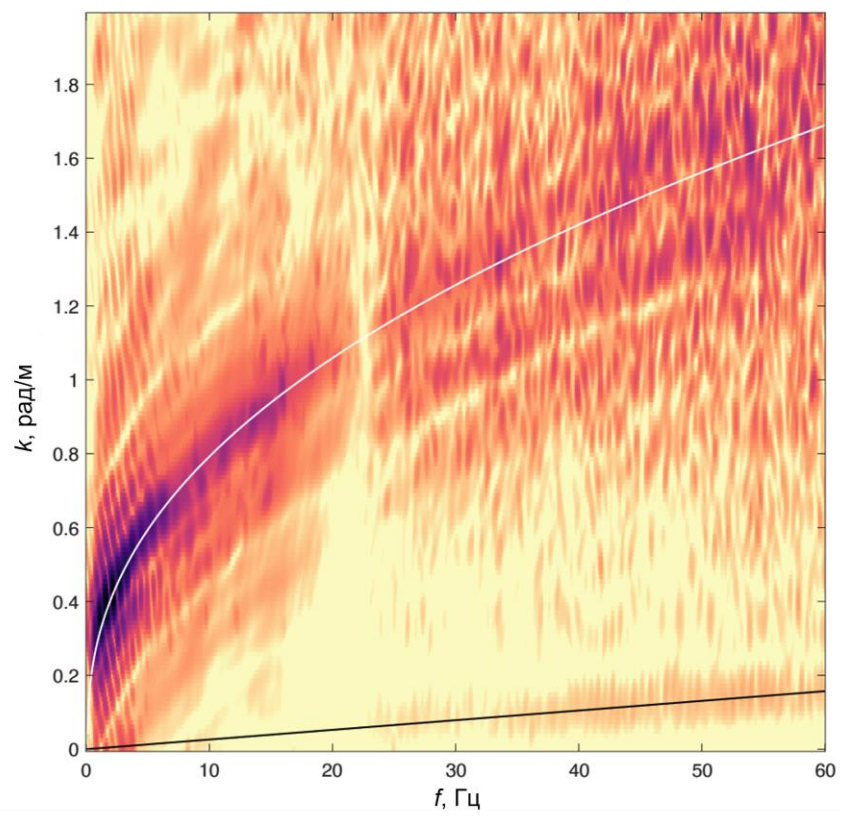
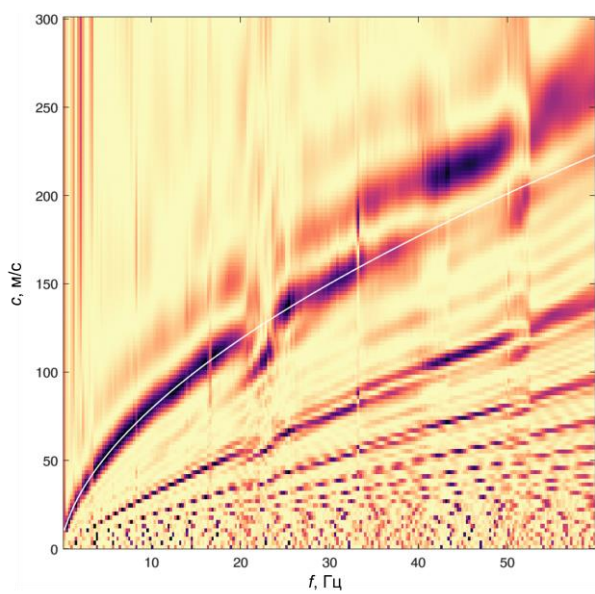
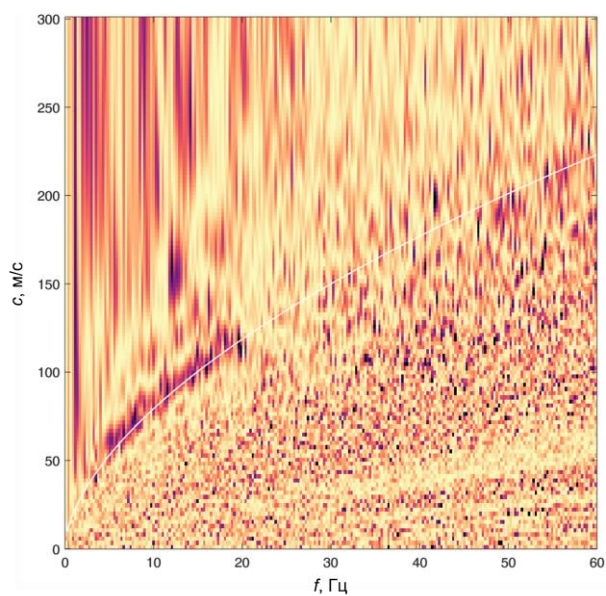


Рис. 5.



a)



б)

Рис. 6.