

УДК 551.46,534.2,534.888,681

## АКТИВНАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ МЕРЗЛЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ СРЕД

© 2022 г. В. И. Юсупов<sup>a, b, \*</sup>, И. П. Семилетов<sup>b, c</sup>, Д. В. Черных<sup>b, c</sup>, А. С. Саломатин<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Институт фотонных технологий ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” Российской академии наук,  
ул. Пионерская 2, Москва, Троицк, 108840 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
пр. Ленина 35, Томск, 634050 Россия

<sup>c</sup>ФГБУ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева,  
Дальневосточное отделение Российской Академии наук, ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

\*e-mail: iouss@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.04.2022 г.

После доработки 10.05.2022 г.

Принята к публикации 26.05.2022 г.

Обсуждается перспективный метод активной высокочастотной акустической термометрии, основанный на измерении длительности сигнала обратного рассеяния ультразвуковых импульсов  $\Delta t$  в верхнем слое водонасыщенных пород или донных осадков. Предложена акустическая модель, объясняющая возникновение сильной зависимости длительности этого сигнала от температуры в области нулевых и отрицательных температур. Показано, что  $\Delta t$  при уменьшении температуры возрастает как из-за увеличения коэффициента отражения ультразвуковых волн от слоистой структуры, так и благодаря уменьшению коэффициента поглощения в водонасыщенной среде. Натурные исследования, выполненные на обширном участке арктического шельфа, подтвердили наличие такой зависимости. Предложенный подход может оказаться эффективным для осуществления дистанционного наблюдения за температурными изменениями в мерзлых водонасыщенных породах на суше и верхнем слое донных осадков на мелководном арктическом шельфе, что необходимо для оценки различных, в том числе, экологических рисков, связанных с глобальным потеплением.

*Ключевые слова:* обратное рассеяние, акустический сигнал, мерзлота, арктический шельф

DOI: 10.31857/S0320791922050136

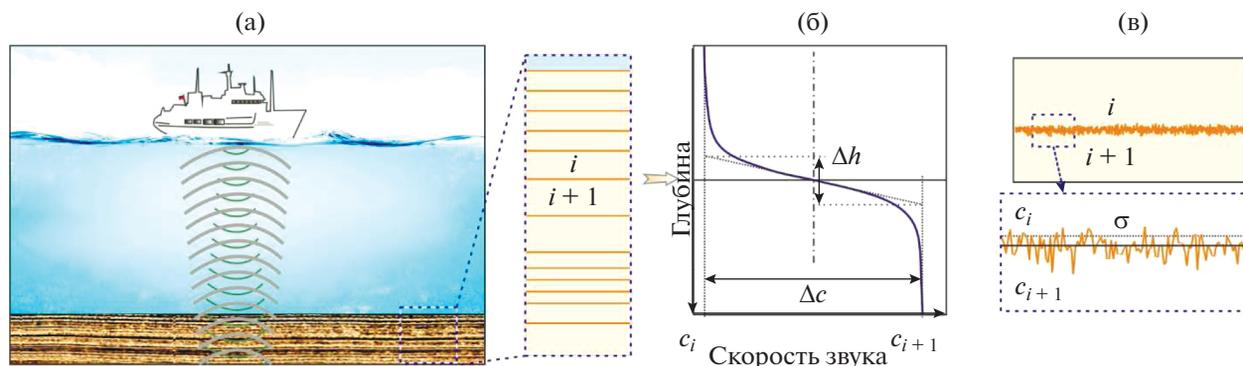
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Климатические модели предсказывают, что арктические регионы должны первыми испытать на себе влияние происходящего сейчас глобального потепления [1]. Рост температуры мерзлых грунтов сопровождается уменьшением их несущей способности, что представляет опасность для объектов инфраструктуры. Увеличение температуры грунтов в северных районах и верхнего слоя донных осадков арктического шельфа неминуемо ускорит разложение газогидратов метана, приведя к неконтролируемым выбросам метана [2–5]. Для того чтобы контролировать эти процессы, необходимо обеспечить круглогодичные наблюдения за температурными изменениями в мерзлых водонасыщенных породах на суше и верхнем слое донных осадков на мелководном арктическом шельфе, что является сложной задачей.

Акустические методы широко применяются для оценки температуры различных объектов. Работа пассивных акустотермометров основана на

приеме акустического излучения в мегагерцовом диапазоне, порождаемого тепловым движением атомов и молекул среды [6, 7]. Достоинствами акустотермометрии являются возможность дистанционного измерения внутренней температуры тела без какого-либо воздействия на организм и высокое пространственное разрешение, позволяющее не только определить направление на источник с аномальной температурой, но и построить его изображение. В настоящее время наиболее перспективным представляется применение акустотермометрии для контроля нагрева ткани в процессе гипертермии и термоабляции в онкологии [8].

Известны активные акустические низкочастотные методы оценки средней температуры на протяженных трассах, основанные на зависимости скорости звука в воде от температуры [9]. Низкочастотный звук может распространяться в океане на расстоянии более тысячи километров, что позволяет создавать интегральные термометры, перекрывающие крупные бассейны [10]. От-



**Рис. 1.** Основные элементы используемой модели для оценки зависимости длительности сигналов обратного рассеяния звука от температуры донных осадков. (а) – Схема зондирования верхнего слоя осадочной толщи с помощью эхолота. Приведена модель слоистой структуры дна. Показаны относительно однородные слои ( $i$  и  $i + 1$ ), разделенные тонкими переходными прослойками. (б) – Представление тонкого переходного слоя (прослойки) в виде слоя Эшлейна толщиной  $\Delta h$ . (в) – Наличие неровностей поверхности раздела между однородными слоями ( $i$  и  $i + 1$ ) со среднеквадратичной высотой  $\sigma$ .

метим, что именно с использованием метода активной акустической низкочастотной термометрии были получены данные о повышении температуры в Северном Ледовитом океане с начала до середины 1990-х гг. [10]. Своеобразная модификация этого метода реализована в донных станциях, позволяющих оценивать среднюю температуру придонного слоя воды по измерению времени прихода сигнала обратного рассеяния от поверхности дна до акустического лоатора, расположенного на станции [11].

Что касается измерения температуры верхних слоев охлажденных осадков и водонасыщенных пород, то описанный выше метод пассивной термометрии для решения этих задач не подходит. Первое ограничение связано с малой дистанцией (порядка 10 см) от приемника до источника. Кроме того, такое измерение эффективно лишь для обнаружения областей, температура которых превышает температуру окружающей среды. Методы активной низкочастотной акустической термометрии также мало пригодны для этих целей из-за технической сложности реализации способа и значительно большем, чем в воде, затухании звука в верхнем слое осадков или пород.

В данной работе мы показываем возможность реализации метода активной высокочастотной акустической термометрии, основанной на излучении акустических импульсов и измерении длительности сигналов обратного рассеяния в верхнем слое водонасыщенных пород или донных осадков. Работоспособность предложенного способа продемонстрирована на участке арктического шельфа.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сначала мы построим акустическую модель верхнего слоя водонасыщенных пород или донных осадков. На втором этапе покажем, что в предложенной модели возникает сильная зависимость длительности  $\Delta t$  сигнала обратного рассеяния ультразвука от температуры среды. Затем приведем результаты натурных исследований на арктическом шельфе, подтверждающие наличие этой температурной зависимости, а значит, и возможности реализации метода на практике.

На рис. 1 на примере слоя донных осадков показаны основные элементы акустической модели, используемые для объяснения возникновения зависимости длительности сигналов обратного рассеяния звука от их температуры. В данном случае зондирование донных осадков производится с поверхности моря с использованием стандартных эхолотов или гидролокаторов (рис. 1а). В сторону дна излучаются пачки акустических импульсов и принимаются сигналы обратного рассеяния. Обычно изображение дна на эхограммах имеет ярко выраженную слоистую структуру. Поэтому будем считать, что верхний слой осадков состоит из набора относительно толстых и однородных слоев (например,  $i$  и  $i + 1$  на рис. 1а), разделенных тонкими переходными слоями.

Длительность акустического сигнала от дна  $\Delta t$  зависит от двух основных факторов: 1) коэффициентов отражения ультразвука на слоистых неоднородностях в осадочной толще и 2) коэффициента поглощения звука на длине акустической волны в ней. Очевидно, что чем выше коэффициенты отражения и чем ниже поглощение, тем больше  $\Delta t$ .

Коэффициент отражения звука для идеальной границы между двумя квазиоднородными слоями ( $i$  и  $i + 1$  на рис. 1а) при нормальном падении

определяется скачком акустического импеданса  $V_0 = |(\rho_i c_i - \rho_{i+1} c_{i+1})| / (\rho_i c_i + \rho_{i+1} c_{i+1})$ , где  $\rho_i$  и  $c_i$  – плотность и скорость звука  $i$ -го слоя [12]. Его температурная зависимость зависит от конкретных пород, образующих слои.

В реальном случае между квазиоднородными слоями существует переходный слой, который имеет ненулевую толщину и шероховатость различного масштаба. На этих шероховатых границах звуковой сигнал частично отражается и частично рассеивается. Уровень обратного рассеяния ультразвука от такой слоистой структуры зависит (помимо  $V_0$ ) от отношения характерных масштабов поверхности раздела между слоями к длине волны [12]. Характерными масштабами являются эффективная толщина переходного слоя  $\Delta h$  (рис. 1б) и среднеквадратичная высота шероховатостей  $\sigma$  (рис. 1в).

Скорость звука для большинства типов осадков, в области нулевых и отрицательных температур, при охлаждении возрастает. Так, при уменьшении температуры с +2 до  $-2^\circ\text{C}$  скорость звука возрастает для песчаника с 1620 до 2380 м/с, для глинистого песка с 700 до 2320 м/с, а для глины с 1310 до 1650 м/с [13]. При охлаждении осадков из-за увеличения скорости звука и соответственно длины волны параметры  $\Delta h/\lambda$  и  $\sigma/\lambda$  будут уменьшаться, а рассеяние от такой слоистой структуры возрастать.

Для оценки коэффициента отражения от переходного слоя ненулевой толщины аппроксимируем реально существующий скачок скорости звука в переходном слое  $\Delta c$  функцией Эпштейна первого порядка [14] (рис. 1б):

$$c(z) = c_0 \left( 1 - \frac{\Delta c \exp(mH)}{c \cdot 1 + \exp(mH)} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $H$  – глубина (значение  $H = 0$  соответствует середине прослойки), а параметр  $m$  определяется эффективной толщиной прослойки. Если в качестве эффективной толщины прослойки взять величину

$$\Delta h = \frac{\Delta c}{dc/dH_{H=0}}, \quad (2)$$

то  $m = 4/\Delta h$ . Такая аппроксимация неплохо описывает реальные переходные слои [15, 16] и допускает аналитическое решение для коэффициента отражения [14], которое в случае нормального падения плоской волны описывается следующим соотношением:

$$V_1 = \frac{\text{sh} \left[ \frac{\pi^2 \Delta h}{2\lambda} (1 - \sqrt{1 - 2\Delta c/c}) \right]}{\text{sh} \left[ \frac{\pi^2 \Delta h}{2\lambda} (1 + \sqrt{1 - 2\Delta c/c}) \right]}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Коэффициент отражения акустических волн от шероховатой поверхности помимо соотношения акустических импедансов квазиоднородных слоев и эффективной толщины прослойки зависит и от параметра Рэля  $P = 4\pi\sigma/\lambda$  [17]:

$$V_2 = V_1 \exp(-P^2/2), \quad (4)$$

где  $V_1$  – коэффициент отражения для идеально гладкой поверхности,  $\sigma$  – среднеквадратичная высота неровностей (рис. 1в). В случае идеально гладкой поверхности принятый эхолотом зеркально отраженный сигнал  $p_{\text{отр}}$  равен [18]:

$$p_{\text{отр}} = V_1 p_0 R_0 / 2R, \quad (5)$$

где  $p_0$  – величина излученного эхолотом сигнала на расстоянии  $R_0$ , а  $R$  – расстояние от эхолота до идеально гладкой поверхности. При увеличении шероховатости поверхности отраженный сигнал  $p_{\text{отр}}$  уменьшается и появляется рассеянный сигнал  $p_{\text{рас}}$ , при больших значениях параметра Рэля отраженный сигнал  $p_{\text{отр}}$  практически исчезает, а рассеянный сигнал  $p_{\text{рас}}$  достигает величины [19]:

$$p_{\text{рас}} = V_1 p_0 R_0 \Psi^{1/2} / R, \quad (6)$$

где  $\Psi$  – ширина эквивалентной направленности эхолота. Таким образом, шероховатость поверхности сильно влияет на принятый сигнал в случае эхолотов с узкой диаграммой направленности и слабо в случае эхолотов с широкой диаграммой направленности.

Вторым, а по значению первым, фактором, влияющим на длительность эхосигнала от дна  $\Delta t$ , является поглощение акустических волн в донных осадках. Затухание ультразвуковых волн в различных водонасыщенных осадках составляет от 0.1 до 1.0 дБ на длине акустической волны [20]. Что касается интересующей нас температурной зависимости, то оказалось, что скорость звука и коэффициент поглощения ультразвука  $\alpha$  в отличие от положительных температур, где они практически не зависят от температуры [21, 22], вблизи нулевых температур очень сильно зависят от температуры [13].

Согласно проведенным расчетам, выполненным для частоты 1 МГц [13], в случае песчаных осадков в области температур от +2 до  $-15^\circ\text{C}$ , коэффициент поглощения  $\alpha$  при охлаждении уменьшается на два порядка, приближаясь к значениям, характерным для чистого льда (рис. 2).

Такая сильная температурная зависимость коэффициента поглощения ультразвука объясняется уменьшением вязкого трения из-за перехода свободной воды в матрикс в связанную воду [23] и заморзания части поровой влаги [13]. Подобная сильная зависимость коэффициента поглощения ультразвука от температуры наблюдается и для многих других водонасыщенных пород [13].

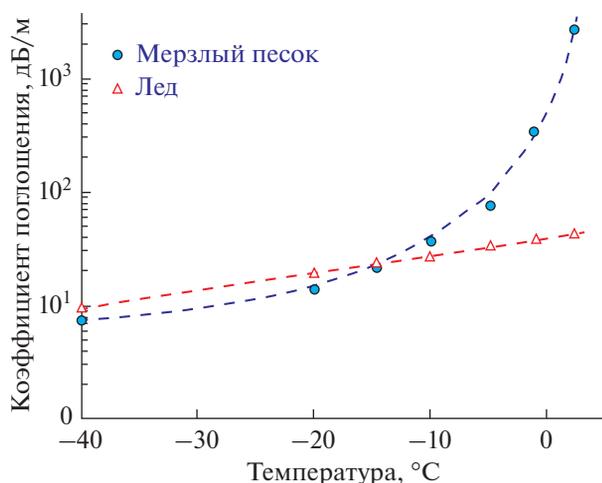


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  ультразвука с частотой 1 МГц от температуры для мерзлого водонасыщенного песка и льда [13].

Натурные исследования зависимости длительности сигнала обратного рассеяния  $\Delta t$  от температуры верхнего слоя осадков были проведены на арктическом шельфе в рейсе ГС «Николай Коломейцев» (август–сентябрь 2000 г.). Всего выполнена 41 станция в Анадырском заливе, Восточно-Сибирском море и море Лаптевых с глубиной от 5 до 92 м.

Акустические измерения проводились с помощью портативного комплекса (Fuguno, Япония) на частотах 50 и 200 кГц с длительностью импульсов 1 мс при полуширине диаграммы направленности  $12^\circ$  и  $2.5^\circ$ , соответственно. Излучатели помещались на глубину около 2–3 м, ультразвуковые сигналы излучались и принимались в вертикальном направлении. Длительность сигнала обратного рассеяния  $\Delta t$  от верхнего слоя донных осадков определялась по осредненному профилю обратного рассеяния (после устранения шума и влияния качки судна) как промежуток времени, затрачиваемый на прохождение от поверхности дна до границы, ниже которой сигнал донного рассеяния (пороговый сигнал) составляет по амплитуде  $<2\%$  сигнала отражения от поверхности дна.

На станциях производился гранулометрический анализ осадков, которые поднимались на борт судна с помощью дночерпателя. Одновременно измерялась температура верхнего слоя донных осадков. Для этого использовался зонд в виде металлического стержня длиной 1.5 м с четырьмя датчиками температуры, расположенными на расстоянии 50 см друг от друга. Глубина вхождения зонда в верхний слой донных осадков составляла в среднем один метр. Точность измерения температуры составляла  $0.1^\circ\text{C}$ .

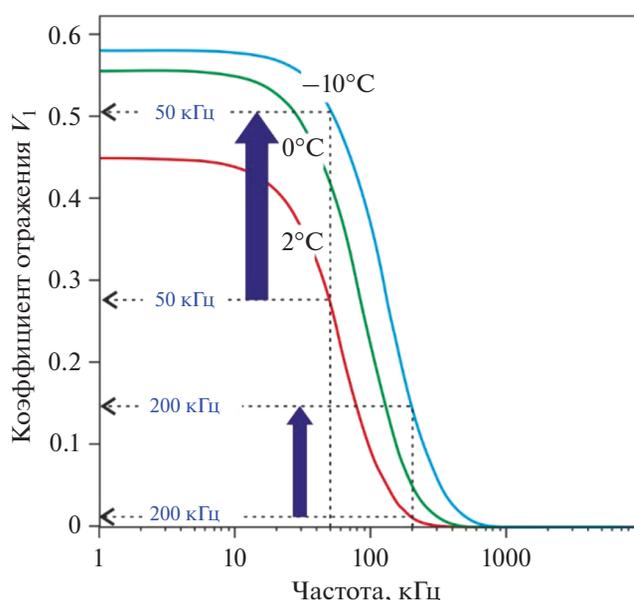


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения ультразвука  $V_1$  от границы между квазиоднородными слоями песка и глины в форме переходного слоя Эпштейна (рис. 16) с  $\Delta h = 10$  мм для различных температур. Фиолетовые вертикальные стрелки показывают увеличение коэффициента отражения от границы раздела при охлаждении от  $+2$  до  $-10^\circ\text{C}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. Модельные оценки

С использованием предложенной акустической модели (рис. 1, рис. 2) и соотношений (3) и (4) были выполнены расчеты, объясняющие температурные особенности рассеяния ультразвуковых волн от слоистых структур. На рис. 3 показаны частотные зависимости коэффициента отражения  $V_1$  (3) от переходного слоя, образованного слоями песка и глины, при различных значениях температуры для эффективной толщины  $\Delta h = 10$  мм. Для частот ниже 20 кГц наблюдается слабая зависимость  $V_1$  от частоты, а в диапазоне 20–200 кГц  $V_1$  быстро падает с увеличением частоты. Видно, что при охлаждении квазиоднородных слоев песка и глины от  $+2$  до  $-10^\circ\text{C}$  коэффициент отражения от их границы существенно увеличивается для обеих частот. При этом для частоты 50 кГц  $V_1$  возрастает в  $\sim 2$  раза (с 0.27 до 0.5), а для 200 кГц — в 15 раз (с 0.01 до 0.15).

На рис. 4 показаны частотные зависимости нормированного коэффициента отражения ультразвука  $V_2/V_1 = \exp(-P^2/2)$  от слоя песка с различными параметрами шероховатости  $\sigma$  в случае нормального падения на поверхность раздела. Для низких частот, меньших 3 кГц, такая граница раздела будет практически идеальной, поэтому указанные шероховатости не уменьшают значение нормированного коэффициента отражения.

Для очень высоких частот, больших 1 МГц, наоборот, указанные шероховатости будут значительными, в результате чего нормированный коэффициент отражения от такой границы уменьшится практически до нуля.

Графики на рис. 4 построены для случая очень узкой диаграммы направленности эхолота. Для оценки влияния диаграммы направленности используемых эхолотов на графиках показаны соответствующие минимальные пороговые значения нормированного коэффициента отражения 0.6 для 50 кГц и 0.13 для 200 кГц эхолотов.

Из рис. 4 видно, что при охлаждении границы песка и глины от +2 до -10°C коэффициент отражения от его шероховатой границы существенно увеличивается для обеих частот. Отметим, что для эффективной регистрации охлаждения среды из-за наличия шероховатостей на поверхности раздела для разных  $\sigma$  оптимальный диапазон зондирующих частот будет различным. Так, из двух используемых нами частот для шероховатостей с  $\sigma = 5$  мм оптимальной будет 50 кГц, а для  $\sigma = 1$  мм – 200 кГц. При охлаждении с +2 до -10°C в этом случае величина нормированного коэффициента отражения  $V_2/V_1$  для частоты 50 кГц возрастает в ~6 раз (с 0.1 до 0.6), а для 200 кГц – в ~3 раза (с 0.25 до 0.7).

Таким образом, результаты моделирования (рис. 1, рис. 2, соотношения (3) и (4)) и выполненные ранее оценки [13] показали, что при охлаждении водонасыщенных пород и осадков в диапазоне температур от +2 до -10°C:

1) возрастает коэффициент отражения от слоистой структуры (из-за наличия шероховатостей границ раздела и ненулевых толщин переходных слоев);

2) уменьшается коэффициент поглощения  $\alpha$  на длине волны ультразвуковых волн (в результате уменьшения вязкого трения из-за перехода свободной воды в матриксу в связанную воду).

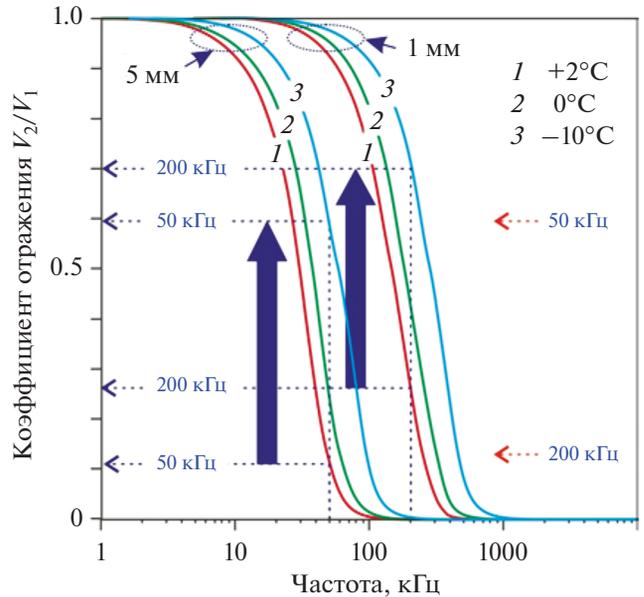
На верхней границе донных осадков амплитуда давления акустического импульса, отраженного от элемента слоистой структуры на глубине в осадках  $L$  в приближении плоской волны, составит:

$$p = p_0 V_i 10^{-\alpha L/10}, \tag{7}$$

где  $p_0$  – давление в падающем импульсе,  $V_i$  – коэффициент отражения ультразвука от  $i$ -го элемента слоистой структуры. Если величину порогового давления обозначить через  $p_{th}$  и учесть, что  $L = c\Delta t/2$ , где  $c$  – эффективная скорость звука в осадках, то

$$\Delta t = \frac{2}{\alpha c} 10 \lg \left( \frac{p_0 V_i}{p_{th}} \right). \tag{8}$$

Как указывалось выше, пороговый сигнал по амплитуде задавался равным 2% сигнала отражения



**Рис. 4.** Частотная зависимость нормированного коэффициента отражения ультразвука  $V_2/V_1$  от шероховатой границы песка и глины (рис. 1в) для различных температур. Расчет произведен для среднеквадратичных высот неровностей  $\sigma = 1$  мм и  $\sigma = 5$  мм, и температур +2, 0 и -10°C. Фиолетовые вертикальные стрелки показывают увеличение коэффициента отражения от границы раздела при охлаждении от +2 до -10°C. Красными пунктирными горизонтальными стрелками показаны соответствующие минимальные пороговые значения нормированного коэффициента отражения 0.6 для 50 кГц и 0.13 для 200 кГц эхолотов.

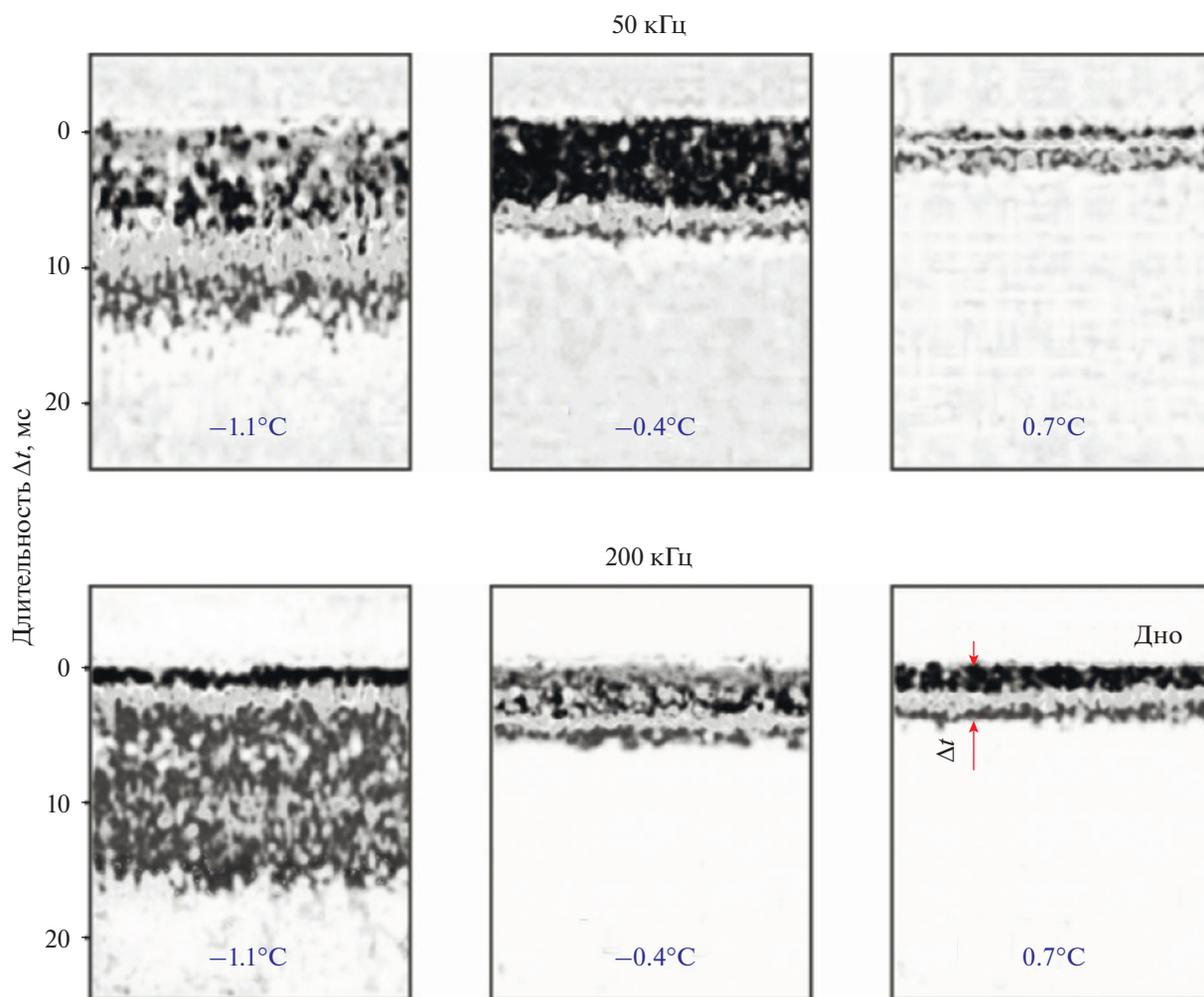
от поверхности дна, т.е.  $p_{th} = 0.02 V_{\text{дна}} p_0$ . Заменяя  $p_{th}$  в выражении (7), получим:

$$\Delta t = \frac{2}{\alpha c} 10 \lg \left( \frac{V_i}{0.02 V_{\text{дна}}} \right). \tag{9}$$

Из (9) следует, что при охлаждении  $\Delta t$  будет возрастать как из-за увеличения коэффициента отражения  $V_i$ , так и из-за уменьшения коэффициента поглощения  $\alpha$  на длине волны. Причем в большинстве случаев вклад уменьшения коэффициента поглощения будет преобладающим.

### 3.2. Натурные исследования

Натурные исследования, проведенные на арктическом шельфе, показали, что температура верхнего метрового слоя донных осадков составляла от -1.2 до +4.9°C. Длительность сигнала обратного рассеяния  $\Delta t$  от верхнего слоя осадков лежала в диапазоне от 1 до 19 мс. На рис. 5 приведены характерные примеры участков эхограмм с верхнем слоем осадков, полученные на станциях с различными температурами поверхности дна. Из приведенных эхограмм видно, что длительность сигнала обратного рассеяния от дна  $\Delta t$  с



**Рис. 5.** Фрагменты эхограмм с участками дна на частотах зондирования 50 и 200 кГц. Показаны температуры верхнего метрового слоя осадков.

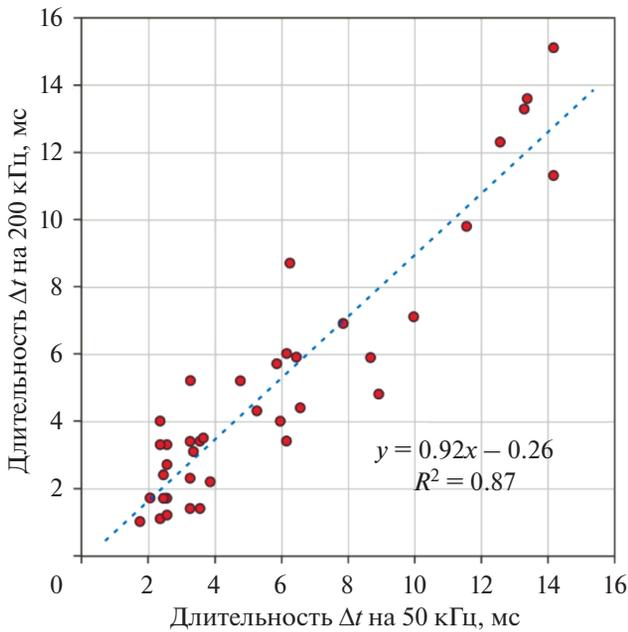
уменьшением температуры последовательно возрастает для обеих частот.

Сравнение длительностей  $\Delta t$  для отдельных станций для двух частот показало, что между ними наблюдается достаточно хорошая линейная связь с  $R^2 = 0.87$  (рис. 6). В указанном представлении (рис. 6) не показана одна точка с максимальной зарегистрированной длительностью сигнала обратного рассеяния для частоты 50 кГц  $\Delta t = 18.6$  мс (для частоты 200 кГц  $\Delta t = 7.1$  мс), которая достаточно сильно выпадала из полученного распределения.

На рис. 7 приведены зависимости длительности сигнала обратного рассеяния ультразвука  $\Delta t$  для двух частот от температуры верхнего метрового слоя донных осадков. Видно, что с уменьшением температуры  $\Delta t$  в среднем увеличивается для обеих частот. При этом в области температур  $>1^\circ\text{C}$  наблюдается слабая температурная зависимость. Здесь  $\Delta t = 3.0 \pm 0.6$  мс для частоты 50 кГц и

$\Delta t = 2.4 \pm 0.9$  мс для 200 кГц. В области температур  $0-1^\circ\text{C}$  длительности эхосигналов в среднем составляют  $\Delta t = 5.2 \pm 2.1$  мс для частоты 50 кГц и  $\Delta t = 4.6 \pm 2.1$  мс для 200 кГц. Еще более холодному верхнему слою осадков с температурами  $<0^\circ\text{C}$  соответствуют большие значения средних величин длительностей:  $\Delta t = 11.3 \pm 3.9$  мс для частоты 50 кГц и  $\Delta t = 9.2 \pm 3.8$  мс для 200 кГц. Отметим, что температурные зависимости для двух частот, согласно приведенным трендам (рис. 7), хорошо согласуются между собой.

Выполненный гранулометрический анализ поверхностных осадков на станциях выявил большую неоднородность распределения частиц по размерам от 0.01 до 1 мм. Сравнение гранулометрических данных с измерениями температуры верхнего метрового слоя осадков показало, что для станций с температурами поверхности дна выше  $0.5^\circ\text{C}$  с увеличением размеров частиц  $\Delta t$  в среднем уменьшается. А для станций с температу-



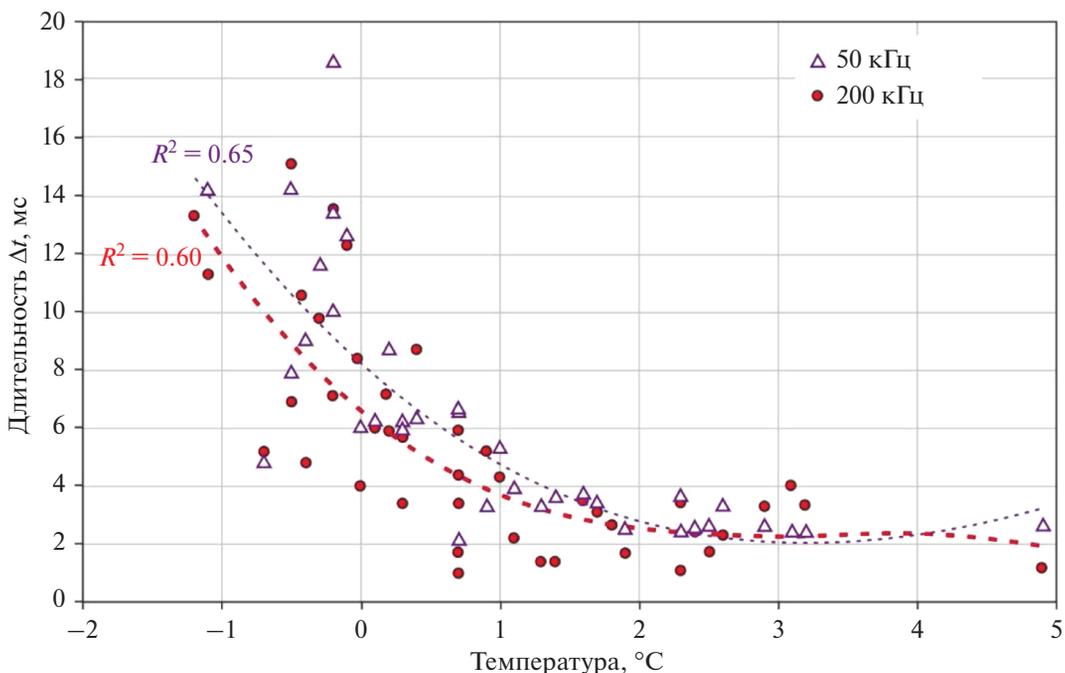
**Рис. 6.** Связь между длительностями сигналов обратного рассеяния от дна  $\Delta t$  для двух используемых частот зондирования. Показаны линейный тренд, его уравнение и значение  $R^2$ .

рами верхнего слоя осадков ниже  $0.5^\circ\text{C}$  корреляция между размером частиц и  $\Delta t$  отсутствует.

Таким образом, эксперименты показали, что на обследованном обширном участке шельфа

Арктики длительность донного эхосигнала  $\Delta t$  в области нулевых и отрицательных температур в основном определяется температурой верхнего слоя осадков и в среднем увеличивается с уменьшением температуры (рис. 7). Такая зависимость хорошо согласуется с приведенными выше модельными оценками и объясняется увеличением  $\Delta t$  как из-за возрастания коэффициента отражения ультразвука  $V$  от слоистой структуры (рис. 1), так и из-за уменьшения коэффициента поглощения  $\alpha$  в осадочной толще при охлаждении.

Отметим, что представленные на рис. 7 результаты получены на станциях, отличающихся различными морфологическими и гранулометрическими характеристиками, расположенными на разных глубинах и зачастую разнесенных на расстояние сотен километров друг от друга. Тем не менее, оказалось, что основным фактором, определяющим длительности донных эхосигналов  $\Delta t$ , является температура  $T$  верхнего слоя осадков. Конечно, при измерении в двух разных точках при одинаковой температуре  $T$  измеренные длительности могут значительно отличаться из-за различных особенностей структуры и пространственной изменчивости физических характеристик, таких как скорость звука, плотность и коэффициент затухания [24]. Вариации указанных характеристик обусловлены составом донных пород (глинистый ил, алевролиты, песок и т.п.), степенью их пористости и газонасыщенности (см. разброс по вертикали на рис. 7). Однако, если



**Рис. 7.** Зависимости длительности сигнала обратного рассеяния ультразвука для двух частот от температуры верхнего метрового слоя донных осадков. Для каждой частоты показаны кубические тренды и значения  $R^2$ .

спустя некоторое время выполнить такие измерения в этих же точках повторно, то по изменению длительности  $\Delta t$  можно будет судить о характере (охлаждение/нагревание) и динамике температурных изменений. Таким образом, предложенный метод активной высокочастотной акустической термометрии позволит осуществить требуемое наблюдение за температурными изменениями мерзлых водонасыщенных пород на суше и верхнего слоя донных осадков.

#### 4. ВЫВОДЫ

Показана возможность реализации метода активной высокочастотной акустической термометрии, основанной на излучении высокочастотных акустических импульсов и измерении длительности сигнала обратного рассеяния  $\Delta t$  в верхнем слое водонасыщенных пород или донных осадков. Согласно предложенной акустической модели, возрастание  $\Delta t$  при охлаждении в области нулевых и отрицательных температур происходит как из-за увеличения коэффициента отражения ультразвука от слоистой структуры, так и из-за уменьшения коэффициента поглощения в водонасыщенной среде. Натурные исследования, проведенные на участке арктического шельфа, подтвердили наличие такой зависимости при температуре верхнего слоя осадков  $T < 1^\circ\text{C}$ . Таким образом, предложенный подход для мониторинга охлажденных и мерзлых пород и осадков позволит осуществить требуемое наблюдение за температурными изменениями мерзлых водонасыщенных пород на суше и верхнего слоя донных осадков.

Работа поддержана Программой Развития Томского Государственного Университета (Приоритет-2030). Исследования частично поддержаны Российским Научным Фондом (грант № 21-77-30001) в части оценки распределения температуры и Министерством науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части оценки экологических рисков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Manabe S., Spelman M.J., Stouffer R.J.* Transient response of a coupled ocean–atmosphere model to gradual change of atmospheric  $\text{CO}_2$  // *J. Clim.* 1992. V. 5. P. 105–126.
2. *Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O.* Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
3. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatina A., Chernykh D., Kosmach D., Pantelev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O.* The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2015. V. 373. P. 20140451. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0451>
4. *Yusupov V.I., Salyuk A.N., Karnaukh V.N., Semiletov I.P., Shakhova N.E.* Detection of methane ebullition in shelf waters of the Laptev Sea in the Eastern Arctic Region // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. № 2. P. 261–265.
5. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Kargina T., Chuvilin E., Bukhanov B., Umnikov A.* New catastrophic gas blowout and giant crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the expedition and data processing // *Geosciences*. 2021. V. 11. № 2. P. 71.
6. *Мансфельд А.Д.* Акустотермометрия. Состояние и перспективы // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 4–5. С. 546–556.
7. *Аносов А.А., Беляев Р.В., Клиньшов В.В., Мансфельд А.Д., Субочев П.В.* Пассивная широкополосная акустическая термометрия // *Журн. техн. физ.* 2016. Т. 86. № 4. С. 119.
8. *Аносов А.А., Ерофеев А.В., Пешкова К.Ю., Шербаков М.И., Беляев Р.В., Мансфельд А.Д.* Совместное использование пассивной акустической и инфракрасной термометрии для контроля УВЧ-нагрева // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 6. С. 690–696.
9. *Munk W., Forbes A.M.G.* Global ocean warming: an acoustic measure // *J. Phys. Oceanogr.* 1989. V. 19. P. 1765–1778.
10. *Mikhalevsky P.N., Gavrilov A.N.* Acoustic thermometry in the Arctic Ocean // *Polar Research*. 2001. V. 20. № 2. P. 185–192.
11. *Jackson D.R., Dworski J.G.* An acoustic backscatter thermometer for remotely mapping seafloor water temperature // *J. Geophys. Research: Oceans*. 1992. V. 97. № C1. P. 761–767.
12. *Бреховских Л.М., Годин О.А.* Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
13. *Фролов А.Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.
14. *Brekhovskikh L.* *Waves in layered media.* Elsevier, 2012. V. 16.
15. *Саломатин А.С., Шевцов В.П., Юсупов В.И.* Аппаратурный комплекс для исследования гидрофизических полей методом дистанционного акустического зондирования // *Океанология*. 1985. Т. 25. № 3. С. 697–702.
16. *Саломатин А.С., Шевцов В.П., Юсупов В.И.* Рассеяние звука и тонкая структура гидрофизических полей в океане / В кн.: Исследование гидрофизических полей акустическими методами. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1983. С. 27–34.
17. *Bjørnø L.* Scattering of sound // In *Applied Underwater Acoustics*. Elsevier, 2017. P. 297–362.
18. *Клей К.С., Медвин Г.* Акустическая океанография: Основы и применения / Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 580 с.
19. *Урик Р.Дж.* Основы гидроакустики / Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.

20. *McCann C., McCann D.M.* The attenuation of compressional waves in marine sediments // *Geophysics*. 1969. V. 34. № 6. P. 882.
21. *Bell D.W., Shirley D.J.* Temperature variations of the acoustical properties of laboratory sediments // *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. V. 68. № 1. P. 227–231.
22. *Shirley D.J., Bell D.W.* Temperature variation of the acoustic properties of laboratory sediments // *J. Acoust. Soc. Am.* 1979. V. 66. № 1. P. 45–46.
23. *Wang D., Zhu Y., Ma W., Niu Y.* Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. 2006. V. 44. P. 12–19.
24. *Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терехина Я.Е.* Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 3. С. 342–358.