

УДК 550.837.2:621.396.6

М.С. Судакова¹, М.Л. Владов²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ПЕСКА В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ –20 ДО +20 °С

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СЦ РАН, 625026, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Малыгина, 86

Moscow State University, Faculty of Geology, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, 625026, Tyumen region, Tyumen, Malygina st., 86

Область фазового перехода воды разделяет две области аппроксимации грунта с точки зрения его упругих свойств. Представляет интерес изменение акустических характеристик, как кинематических, так и динамических, в процессе замерзания и оттаивания, так как они могут быть индикаторами различных неупругих характеристик процесса перехода из одного состояния в другое. Статья посвящена решению следующих задач: создание измерительной ячейки, вносящей минимальные искажения в процесс получения волновых картин проходящих p и s волн, обеспечение контроля за температурой образца, проведение ультразвуковых измерений с шагом по времени, обеспечивающим необходимую детальность, анализ зарегистрированных волновых картин и их изменения в процессе фазового перехода.

Ключевые слова: ультразвуковые измерения, затухание сигнала, мерзлые грунты, неконсолидированные грунты, динамические характеристики.

Water phase transition divides the areas of soil approximation from the point of view of its elastic properties. It is interesting to study changing of acoustic characteristics, both kinematic and dynamic, in the process of freezing and thawing, since they can be indicators of various inelastic characteristics of the transition from one state to another. In the article we present results of initial stage of research on the topic identified in the title. This includes: design of a measuring cell that introduces minimal distortions in ultrasonic p and s waves measurements on water-saturates ground sample, monitoring sample temperature, performing ultrasonic measurements with a time step that provides necessary detailing for observing time and temperature dependencies of the waves characteristics registered during the phase transition data analysis.

Key words: ultrasound, attenuation, frozen ground, unconsolidated ground, dynamic characteristics.

Введение. Из общей площади суши и шельфа нашей планеты почти 40% занято многолетне-мерзлой криолитозоной [Ершов, 2002]. Перед специалистами стоят не только научные задачи изучения и наблюдения за многолетнемерзлыми породами (ММП), но и множество практических задач, связанных со строительством, прокладкой дорог и трубопроводов, бурением разведочных и промысловых скважин в зоне развития ММП. Необходима постоянная поддержка безопасности строительных и инженерных объектов, связанных с их тепловым воздействием на многолетнемерзлые породы [Осипов, 2017]. В последние десятилетия активно обсуждается вопрос деградации мерзлоты, обусловленной как глобальными, так и локальными причинами. Задача изучения и мониторинга состояния мерзлых пород стоит на повестке дня и является не только научной, но и практической.

На сегодняшний день физические свойства как мерзлых, так и талых пород и грунтов довольно хорошо изучены; использованию геофизических методов, в частности сейсморазведки, для исследования пород и грунтов верхней части разреза посвящено множество работ, например, такие монографии, как [Зыков, 2007; Фролов, 1998; Горяинов, 1992].

Сейсморазведка изучает упругие свойства среды, к которым относят значения скорости распространения упругих волн, интенсивность и форму колебаний при их распространении [Ерофеев и др., 2006]. Тем не менее до настоящего времени сохраняется положение, когда основной изучаемый параметр волновых картин упругих волн — время прихода продольной волны. Это объясняется тем, что скорость распространения волн связана с прочностными и деформацион-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, ст. преп., канд. физ.-мат. н., ИКЗ ТюмНЦ СО РАН; *e-mail*: m.s.sudakova@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, заведующий кафедрой, профессор, доктор физ.-мат. н.; *e-mail*: vladov@geol.msu.ru

ными характеристиками устойчивыми для разных типов грунтов корреляционными соотношениями, которые используются в инженерной геологии и строительстве [Ананьев, Потапов, 2005]. При этом динамические параметры остаются без внимания исследователей.

Мерзлые дисперсные породы содержат большое количество разных типов воды в различных агрегатных состояниях, находящихся в свою очередь в зависимости от температуры. Это обеспечивает специфические связи между частицами грунта, создавая консолидированную среду, в известной степени близкую к идеально упругому телу Гука [Зыков, 2007; Скворцов и др., 2014]. Однако при повышении температуры и оттаивании связи разрушаются, и весь массив переходит из монолитного состояния в неконсолидированное [Ершов, 2002; Вакулин, 2011].

Фактически область фазового перехода воды разделяет две области аппроксимации грунта с точки зрения его упругих свойств. В области жидкого состояния воды аппроксимация неконсолидированной среды идеально упругим телом Гука очевидно неправомерна. Ряд современных теорий распространения упругих волн в неконсолидированных средах, составляющие элементы которых имеют линейные размеры много меньшие длин волн упругих колебаний, плохо согласуются между собой.

Например, широко известны три неупругие модели двухфазных неконсолидированных осадков: модель Био–Столла (BSM) [Stoll, 1980]), расширенная модель Био–Столла с учетом выжимания флюида и потерь на сопротивление сдвигу (BICSQS) [Chotiros, Isakson, 2004] и модель межзернового трения (GS) Букингема [Buckingham, 2005]. Общая теория распространения упругих волн в неконсолидированной среде, учитывающая дисперсию акустических свойств и поглощение акустической энергии в среде и связывающая свойства среды и свойства акустического сигнала, отсутствует.

Примеры зависимостей скоростей упругих волн в водонасыщенных дисперсных грунтах различной засоленности от температуры можно найти, например, в работах [Yoshisuke et al., 1972; Li et al., 2016]. Динамические параметры сигнала — амплитуда, частота, ширина спектра — практически не рассматриваются.

Температурная зависимость значений скоростей распространения акустических волн выглядит как «ступень» с одним значением для мерзлого состояния и другим — для немерзлого. При этом область перехода по температурной шкале от левой асимптоты «ступени» к правой мало исследована. В работе [Воронков и др., 1991] лишь отмечено, что переход должен занимать интервал от -2 до $+2$ °C и что значения скорости волн значительно отличаются для мерзлых низкотемпературных и для

мерзлых высокотемпературных грунтов. В статье [Скворцов и др., 2014] отмечена неоднозначность определения состояния водонасыщенных песчано-глинистых ММП при близкой к нулю отрицательной температуре только по значениям скорости, и предлагается использовать коэффициент Пуассона как более надежный критерий.

Несмотря на то что лабораторным ультразвуковым измерениям на образцах грунтов различного состава при положительных и отрицательных значениях температуры посвящено довольно много статей, например [Kurfurst, 2011; Li et al., 2016; Дучков и др., 2017], нам удалось найти только одну работу, в которой рассматриваются динамические характеристики продольных волн в дисперсных засоленных грунтах при температуре от -30 °C до $+10$ °C [Dou, 2015], динамические параметры поперечных волн не исследованы.

Таким образом, динамические параметры продольных и поперечных волн, прошедших через дисперсный грунт, не используются для характеристики состава и состояния (например, в зависимости от температуры) этого грунта. Кроме того, по нашему мнению, представляет интерес изменение акустических характеристик как кинематических, так и динамических в процессе замерзания и оттаивания грунтов, так как они могут быть индикаторами различных неупругих характеристик процесса перехода из одного состояния в другое.

Рассмотрим результаты начального этапа исследований по теме, обозначенной в названии. Цель исследований — анализ изменений кинематических и динамических характеристик сейсмического сигнала на всех стадиях перехода от мерзлого грунта к талому и наоборот. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) создание измерительной ячейки, содержащей модельный образец неконсолидированного грунта, — водонасыщенный песок, вносящей минимальные искажения в процесс получения волновых картин проходящих продольных и поперечных волн;

- 2) обеспечение контроля за температурой образца в измерительной ячейке в процессе ультразвуковых измерений на двух типах волн;

- 3) проведение ультразвуковых измерений с шагом по времени, обеспечивающим необходимую детальность для построения зависимостей характеристик волновых полей от времени и температуры;

- 4) анализ зарегистрированных волновых картин и их изменений в процессе фазового перехода.

Материалы и методы исследования. Фото измерительной ячейки и схема измерений приведены на рис. 1. В качестве модельного образца неконсолидированного грунта был взят подмосковный флювиогляциальный среднезернистый чистый песок, полностью насыщенный водопроводной водой. Такой образец не имеет собственной формы и нуждается в некоторой оболочке, контейнере и

т.п., что позволило бы зафиксировать линейные размеры образца и положение источников и приемников на его поверхности. Здесь возникают проблемы с исключением влияния оболочки на результаты измерений. Материал контейнера не должен участвовать в процессе распространения проходящей волны от источника к приемнику.

Максимально возможный размер контейнера подбирали исходя из того, что проходящий сквозь образец сигнал должен уверенно выделяться на фоне помех, учитывая, что неконсолидированные грунты характеризуются высокими значениями поглощения упругих волн [Holmes et al., 2007]. Для возможности анализа сигналов, прошедших разный путь в образце, хотя бы две стороны контейнера должны отличаться по длине.

В соответствии с вышеизложенным был подобран пластиковый контейнер, имеющий форму параллелепипеда с квадратом в основании со стороной 4,5 см и высотой 10 см. В сторонах контейнера были проделаны круглые отверстия, диаметр которых равен диаметру основания датчиков. Внутри контейнер был выстлан полиэтиленом, закрывающим отверстия под датчики. Датчики не соприкасались с контейнером, и контакт образца с датчиками осуществлялся только через полиэтиленовую пленку. Акустический контакт датчиков с образцом был постоянен в течение всех циклов замораживания и размораживания. Внутри образца постоянно находился датчик логгера. Для замораживания образец помещали в морозильную камеру, в которой поддерживалась температура -28°C . Для оттаивания образец извлекался из морозильной камеры в помещение с комнатной температурой около 20°C .

Методика измерений. Измерения проводили с использованием датчиков продольных и поперечных волн по методике прямых контактных измерений с использованием прямых волн. Датчики располагали один напротив другого по длинной и короткой сторонам измерительной ячейки. Интервал, необходимый для переключения каналов осциллографа между измерениями на разных базах, составлял не более 1 мин. Интервал времени между записями волнового поля с двух пар датчиков составлял 10 минут. Интервал времени между записями показаний логгера составлял 1 с между записями. Эксперимент считался законченным (образец полностью замороженным/

оттаявшим), если температура внутри образца приближалась к -20 или к $+20^{\circ}\text{C}$, и сигнал на осциллографе уже не менялся со временем.

Аппаратура. Аппаратура для лабораторных акустических измерений в виде стандартных комплексов отсутствует в отечественной промышленности и конструируется по требованиям задачи и условиям эксперимента из блоков и элементов промышленного производства и действующих макетов устройств, разработанных и созданных коллективом лаборатории [Владов и др., 2016].

Для измерений использовались пьезоэлектрический преобразователь продольных волн П111-0,1-П31МС и пьезоэлектрический преобразователь поперечных волн V1548 фирмы «PANAMETRICS-NDT» с частотой излучения 0,1 МГц, размер контактной поверхности (диаметр) — 26 и 25 мм соответственно.

Регистрация измерений проводилась с помощью двухканального цифрового запоминающего осциллографа ADS-2061MV. С помощью программного обеспечения Актаком DSO-Soft анализировались сигналы, полученные от осциллографа. Подключение осциллографа к ПК производилось по USB интерфейсу. Зарегистрированные в памяти ПК файлы с записями волновых картин и служебной информации с помощью специальной программы Актаком преобразовывались в промежуточный формат, а затем с помощью оригинальной программы с использованием MATLAB — в записи в формате «.sgu».

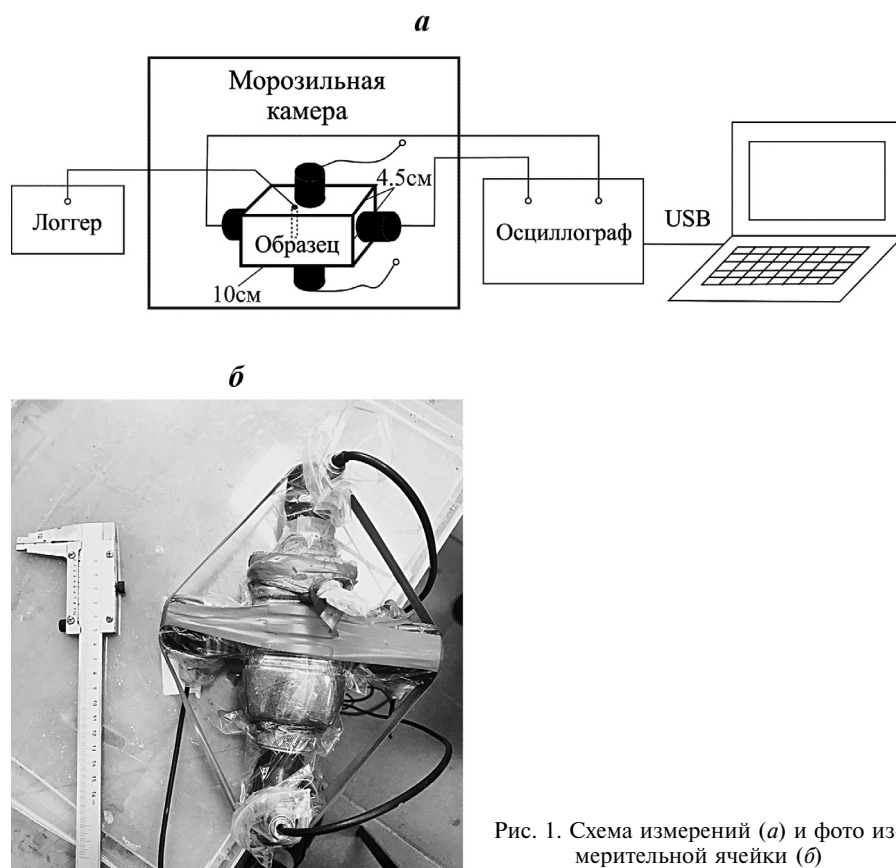


Рис. 1. Схема измерений (а) и фото измерительной ячейки (б)

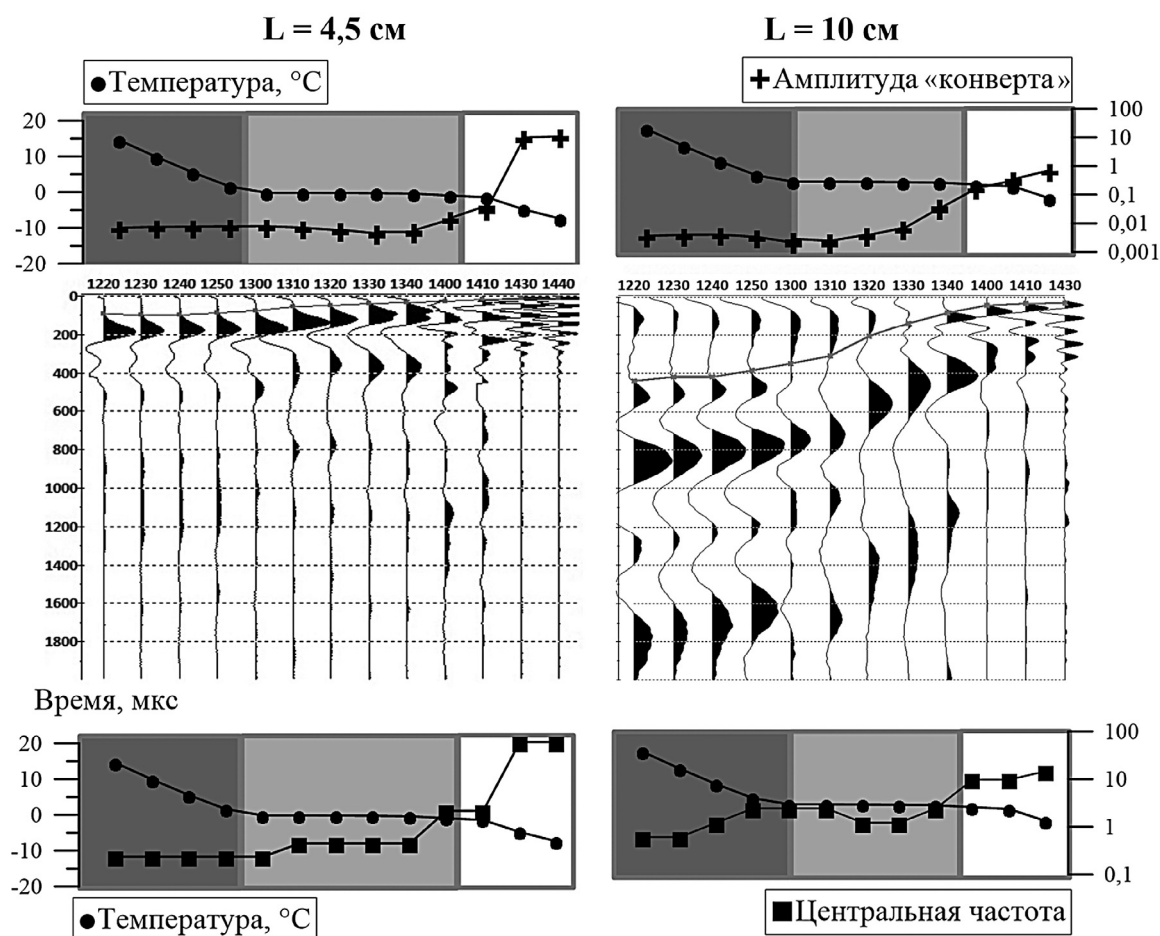


Рис. 2. Цикл замораживания, p -волны. Описание рисунка см. в тексте

Для измерения температуры использовался четырехканальный логгер «НОВО» «U2 Otudoor/Industrial», точность измерения $0,1^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследования и их обсуждение. Измерение параметров записи со временем. Результаты эксперимента показали сложность получения качественных записей продольных волн для образцов водонасыщенных неконсолидированных сред из-за большого затухания сигнала, особенно при положительных значениях температуры на фоне шумов и помех. Существенная доля трудностей связана с желанием проследить весь цикл замораживания или размораживания на одном образце с минимальными изменениями режима работы аппаратуры, при этом

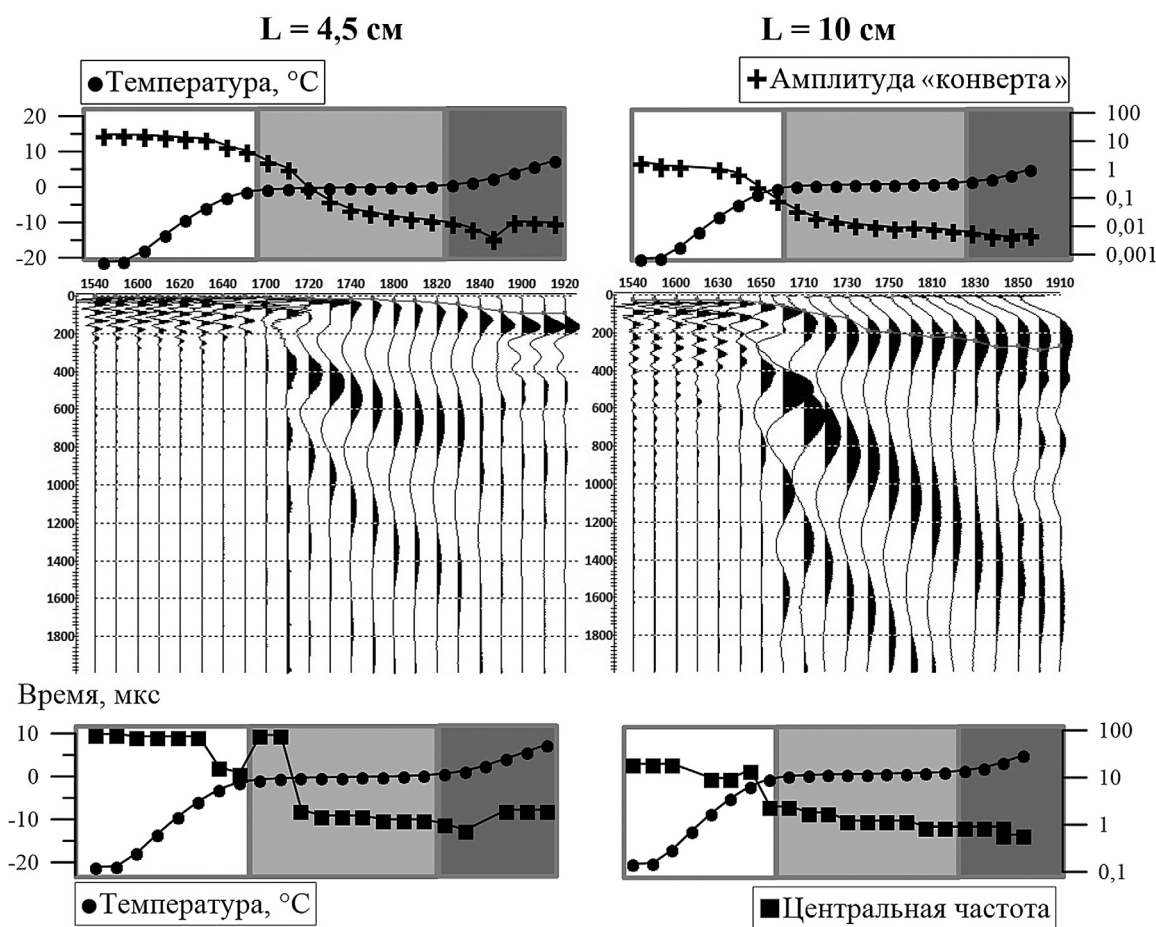
- время прихода волн на малой базе измерений при отрицательной температуре более чем на порядок меньше времени прихода волны при измерениях на большой базе при положительной температуре;

- амплитуда полезного сигнала на малой базе измерений при отрицательной температуре на 3–4 порядка больше, чем при измерениях на большой базе при положительной температуре;

- амплитуды шумов и наводок, а также длительность аппаратных наводок в начальной части

записи, которые маскируют момент прихода полезного сигнала, сохраняются в течение всего цикла измерений.

На рис. 2–5 приведены необработанные сейсмограммы из зарегистрированных трасс для двух баз измерений и двух типов волн. Вертикальный масштаб для сейсмограмм продольных и поперечных волн отличается в 1,5 раза. Для лучшей визуализации усиление подобрано таким образом, чтобы амплитудный уровень всех трасс на одной сейсмограмме был одинаков. На записях продольных волн, полученных при положительных значениях температуры с расстоянием между датчиками 10 см (правые части на рис. 2, 3), амплитуда сигнала в районе первого вступления сравнима с амплитудой наводки от импульса запуска, которую можно наблюдать в верхней части записи. На остальных записях вступление сигнала отчетливо выделяется на фоне шумов и помех. Наводка от импульса запуска присутствует на всех трассах, полученных с датчиками продольных волн, и не меняется со временем, но становится незаметна на фоне относительно большого сигнала при измерениях на базе 4,5 см и в случае мерзлого образца на базе 10 см. Для более уверенного выделения первого вступления импульса волны,

Рис. 3. Цикл оттаивания, p -волны. Описание рисунка см. в тексте

прошедшей через 10 см неконсолидированного песка, необходимо разработать аппаратные или методические изменения.

Для исследования были выбраны следующие эффективные параметры: скорость распространения волн в образце, амплитуда «конверта»: сумма абсолютных значений максимальной и минимальной амплитуды сигнала и центральная частота, соответствующая максимуму спектральной плотности. Динамические параметры «снимались» автоматически в программном пакете RadexPro в окне, равном двум видимым периодам (4 фазам), которые отсчитывались от времени вступления сигнала. Контроль за работой модуля проводился вручную на выборочных трассах.

На рис. 2–5 отображено изменение записи продольных волн, температуры внутри образца и динамических параметров сигнала со временем. Время показано по оси X в формате ЧЧММ, L — расстояние между датчиками. Темно-серым показана положительная температура, светло-серым — нулевая, белым — отрицательная. На сейсмограммах серым цветом показано время вступления сигнала. Применена процедура выравнивания амплитуд разных трасс одной относительно другой.

Характер записей сигналов и их изменения во времени одинаков для записей датчиков продольных и поперечных волн. При охлаждении образца после достижения нулевой температуры постепенно увеличиваются видимая частота записи и время прихода сигнала, возможно, пока вода во всем образце не замерзнет. После полного замерзания воды при дальнейшем понижении температуры сигнал становится стабильным: с относительно большой центральной частотой и малым временем прихода волны. После полного замерзания образца в несколько раз уменьшается длительность сигнала по сравнению с областью положительных значений температуры.

Амплитуда сигнала при охлаждении не меняется со временем при положительной температуре, а по достижении 0°C начинает постепенно расти. Темп роста снижается после прохождения области фазового перехода воды, однако амплитуда продолжает увеличиваться и выходит на асимптоту при температуре внутри образца ниже -5°C .

Центральная частота сигнала продольных и поперечных волн в полностью замерзшем образце на 2–3 порядка выше центральной частоты сигнала в образце в талом состоянии. Амплитуда «конверта» выше на 3–4 порядка.

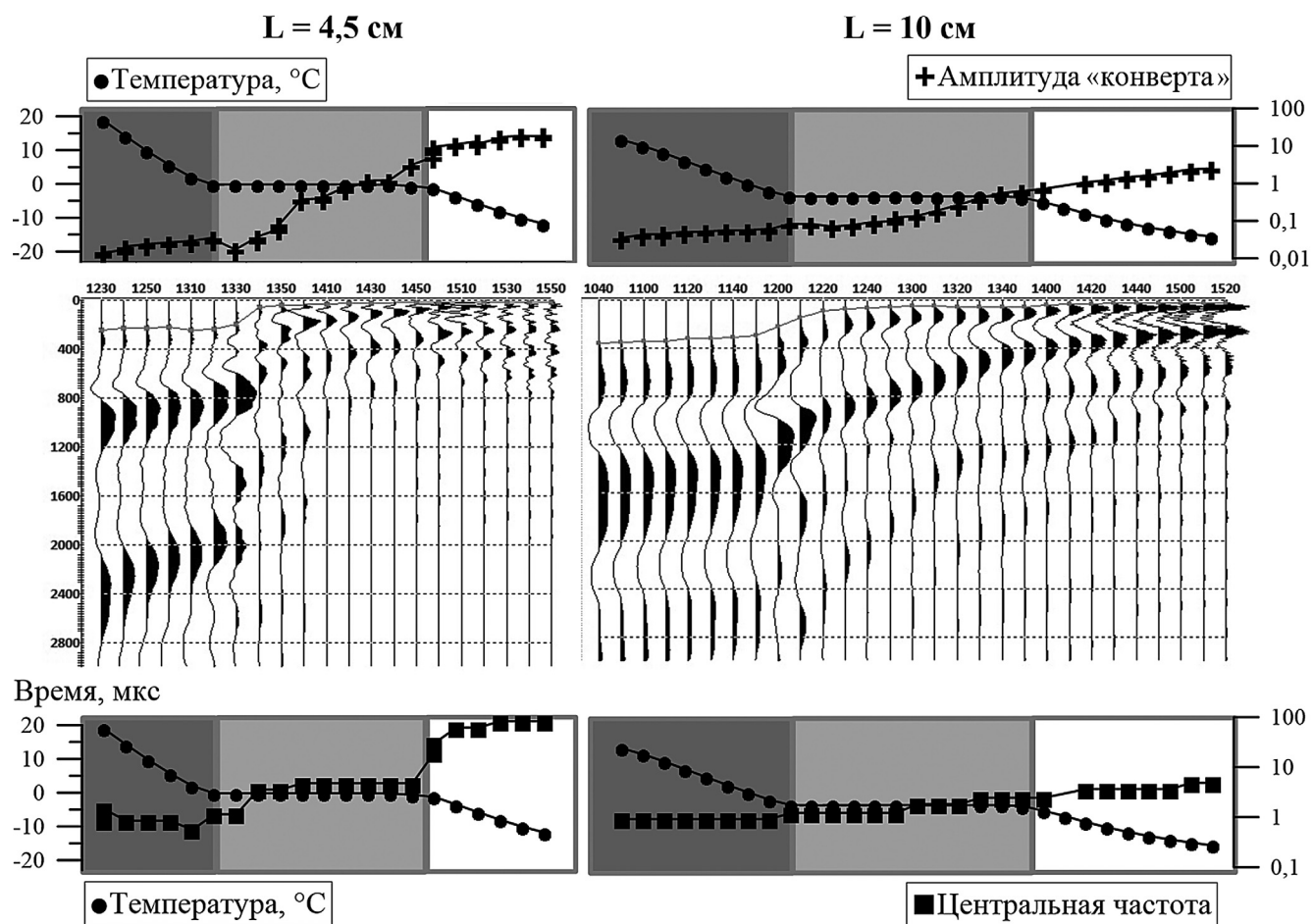


Рис. 4. Цикл заморзания, s -волны. Описание рисунка см. в тексте

Видимое изменение параметров записи при практически постоянном значении температуры около 0°C в области фазового перехода в течение относительно долгого времени свидетельствует о переходе образца из одного состояния в другое, установлении или разрушении структурных связей, изменении его механических свойств. Поэтому параметры волнового поля могут быть использованы для количественного описания этого процесса.

Вид кривых зависимостей амплитуды и времени прихода волн от температуры или времени замораживания в эксперименте не меняется и в процессе оттаивания, меняется лишь направленность процесса.

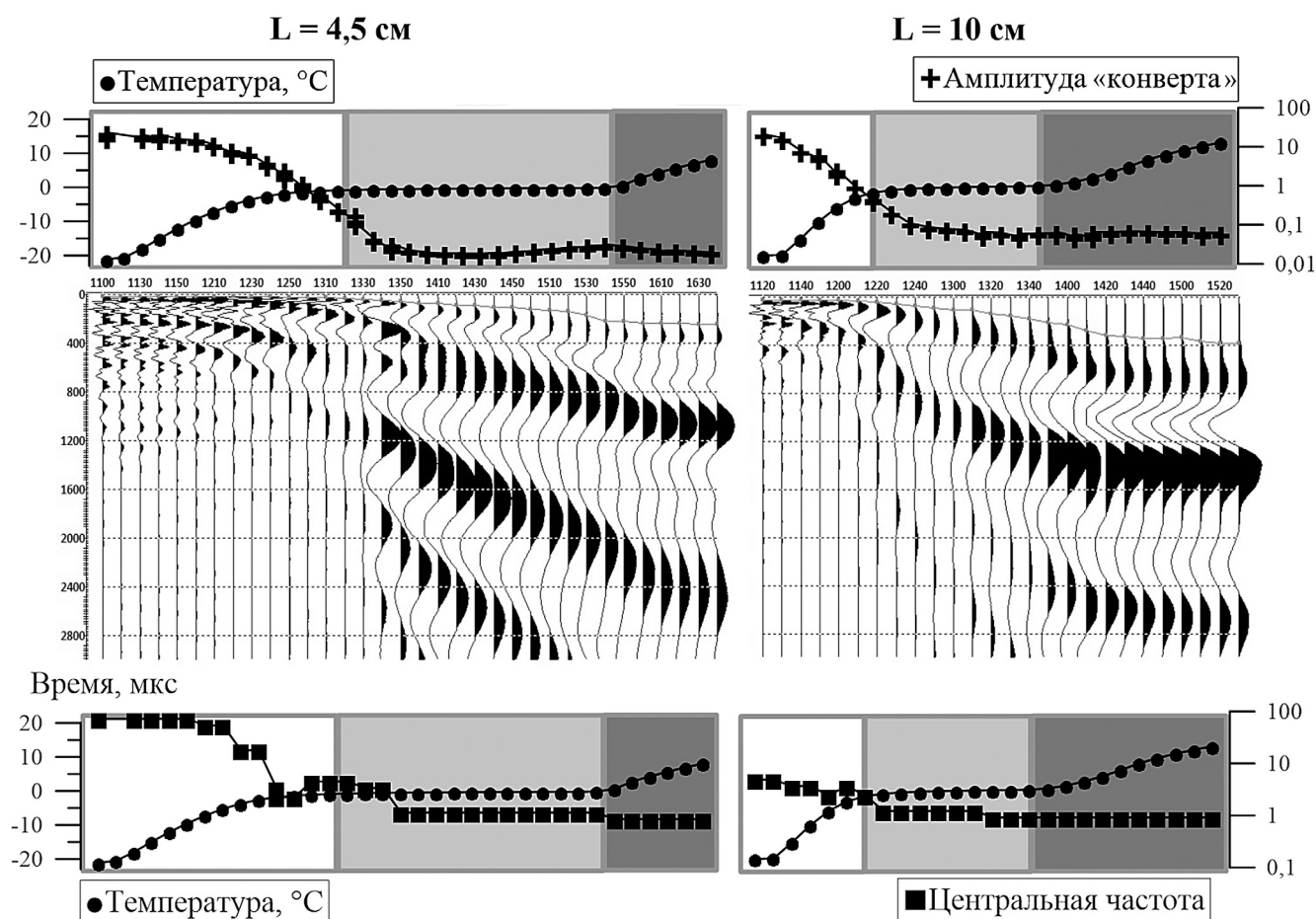
Амплитуда сигнала и его видимая частота выше при измерениях на расстоянии 4,5 см по сравнению со значениями, измеренными на расстоянии между датчиками 10 см. Это заметное влияние поглощения упругой энергии как частотно-зависимого фактора, однако его количественный анализ выходит за рамки этой статьи.

Заключение. Предложенная технология измерений позволяет детально по времени и температуре получить волновые картины продольных и поперечных волн при замораживании и оттаивании грунта.

Изучены амплитудно-частотные характеристики акустического сигнала непосредственно при изменении фазового состояния грунта. Полученные записи пригодны для акустического описания процесса перехода от одной модели среды — идеально упругого тела Гука (с соответствующей моделью распространения упругих волн в нем) — к пока неформализованной модели неконсолидированной и неидеально упругой многокомпонентной среды, где описание процесса распространения волн не формализовано в рамках общей теории.

Структура полученных записей сигналов и их изменений во времени одинакова для записей датчиков продольных и поперечных волн, изменение параметров и характеристик записи при оттаивании такое же, как и при охлаждении, но в обратном порядке. При охлаждении после достижения нулевой температуры видимая частота записи, время прихода и амплитуда сигнала постепенно увеличиваются. Дальнейшее уменьшение температуры до $-3...-5^{\circ}\text{C}$ приводит к стабилизации сигнала и увеличению его амплитуды и частоты на 2–3 порядка по сравнению с талым состоянием образца.

Возрастание динамических параметров записи со временем в цикле заморзания (и уменьшение со временем в цикле оттаивания) при постоянном

Рис. 5. Цикл оттаивания, s -волны. Описание рисунка см. в тексте

значении температуры, равном 0°C , свидетельствует о переходе образца из одного состояния в другое, установлении или разрушении структурных связей, изменении его механических свойств.

Результаты проведенных лабораторных исследований позволяют утверждать, что динамические параметры сигнала можно использовать для определения состояния грунта при решении

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ананьев В.П., Потапов А.Д. Инженерная геология: Учебник для строительных специальностей вузов. М.: Высшая школа, 2005. 575 с.

Вакулин А.А. Основы геоэкологии: Учеб. пособие. 2-е изд. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2011. 220 с.

Владов М.Л., Стручков В.А., Токарев М.Ю. и др. Об ультразвуковых измерениях на образцах неконсолидированных сред. Геофизика. Вып. 2. М.: Ред.-изд. центр ЕАГО (Тверь: Полипресс), 2016. С. 24–31.

Воронков О.К., Моторин Г.А., Михайловский Г.В., Кунцевич С.П. Сейсмогеологические классификации грунтов криолитозоны // Криосфера Земли. 1991. Т. 1. № 3. С. 47–54.

Горяинов Н.Н. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1992. 264 с.

Дучков А.Д., Дучков А.А., Пермяков М.Е. и др. Лабораторные измерения акустических свойств гидратосодержащих песчаных образцов (аппаратура, методика и результаты) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 6. С. 900–914.

геоэкологических задач сейсмоакустическими методами. Анализ связи значений кинематических и динамических характеристик упругих волн с характеристиками грунта и его состоянием в дальнейшем станет основой методики решения обратной задачи акустики в области фазового перехода.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (проект № 16-17-00102).

Ерофеев Л.Я., Вахромеев Г.С., Зинченко В.С., Номоконова Г.Г. Физика горных пород: Учебник для вузов. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 520 с.

Ершов Э.Д. Общая геоэкология. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002. 682 с.

Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. 234 с.

Осинов В.И. Биосфера и экологическая безопасность [Текст]: юбилейная лекция. М.: Российский ун-т дружбы народов, 2017. 133 с.

Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 2. С. 83–90.

Фролов А. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 515 с.

Buckingham M.J. Compressional and shear wave properties of marine sediments: Comparisons between theory and data // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2005. Vol. 117. P. 137–152.

Chotiros N.P., Isakson M.J. A broadband model of sandy ocean sediments: Biot-Stoll with contact squirt flow and shear drag // *Acoust. Soc. Amer.* 2004. Vol. 116. P. 137–152; 2011–2022.

Dou S. Field and Laboratory Investigations on Seismic Properties of Unconsolidated Saline Permafrost: Ph.D. Dissertation // *Earth and Planet. Sci.* Berkeley: University of California, 2015.

Holmes J., Carey W., Dediu S., Siegmann W. Nonlinear frequency-dependent attenuation in sandy sediments // *J. Acoustical Soc. Amer.* 2007. N 4. P. 218–222.

Kurfurst P. Ultrasonic wave measurements on frozen soils at permafrost temperatures Canadian // *J. Earth Sci.* 2011. Vol. 13. N 11. P. 1571–1576.

Li D., Huang X., Ming F., Zhang Y. The impact of unfrozen water content on ultrasonic wave velocity in frozen soils, advances in transportation geotechnics 3: The 3rd Intern. Conf. on Transportation Geotechnics. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 1210–1217.

Stoll R.D. Theoretical aspects of sound transmission in sediments // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1980. Vol. 68. P. 1341–1350.

Yoshisuke N., Martin R., Smith M. ultrasonic velocities of the dilatational and shear waves in frozen soils // *Water Res.* 1972. Vol. 8. N 4. P. 1024–1030.

Поступила в редакцию 01.11.2018

Поступила с доработки 27.02.2019

Принята к публикации 19.09.2019