

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П.Н.Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

Е.М. КУДРЯВЦЕВ, С.Д. ЗОТОВ, А.А. ЛЕБЕДЕВ

5

**МЕДЛЕННЫЕ УЕДИНЁННЫЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ,
– О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ЭТОГО НОВОГО
ЯВЛЕНИЯ И О ПЕРСПЕКТИВАХ ЕГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ЗА СОСТОЯНИЕМ ГОРНЫХ ПОРОД**

МОСКВА 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Тезисы	3
Abstract	3
1. Введение	3
2. Основные (установленные экспериментально) свойства МУУВ (см. подробнее [3]).....	4
3. Примеры наблюдения и исследования сравнительно быстрых волн типа МУУВ.....	5
<u>3.1. Механо-люминесценция кварца при ударе остриём.</u>	6
<u>3.2. Механо-люминесценция меди при ударе плоского бойка, летящего с дозвуковой скоростью.</u>	8
4. Примеры наблюдения и исследования сравнительно медленных волн типа МУУВ.....	9
<u>4.1. Шлирен-метод для прозрачных материалов (плавленый кварц, стекло, плексиглас) с ИК-лазерным возбуждением волн типа МУУВ.</u>	9
<u>4.2. Термопарные измерения для массивной меди (возбуждение электронным пучком).</u>	12
4.3. Заключение.....	15
5. Благодарности.....	16
Литература.....	16

Тезисы

Обнаруженные в 1992г в ФИАНе медленные уединённые упругие волны (МУУВ) рассмотрены с точки зрения возможности применения их для контроля за состоянием геологических сред. Обсуждены общие свойства и приведены примеры исследования МУУВ в кварце и ряде других веществ.

Abstract

The Slow Solitary Elastic Waves (SSEW) discovered in 1992 in Lebedev Physical Institute are discussed as the possible tool for the geological environment control. The general SSEW features and some examples of its studies in quartz and some others staffs are presented.

1. Введение¹

Обнаруженные в 1992 г. в Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН медленные уединённые упругие волны (МУУВ) с дискретными скоростями [1] около 17 лет исследовались в лабораторных условиях (см. обзоры [2-3]; причём до 2004г. эти волны назывались Волнами изменения отражения и проводимости (ВИОП) по первым методам их регистрации). Недавно нам стало известно о способной выдавать эффективные прогнозы модели землетрясений Ш.А.Губермана [4,5], в которой роль гипотетических D-волн, возможно, играют один или несколько компонентов МУУВ (см. нашу статью в этом сборнике [6]). Эта информация заставляет поднять вопрос об исследовании волн типа МУУВ в натуральных условиях. Вот почему мы с готовностью откликнулись на предложение сотрудников Московского государственного горного университета ознакомить участников всероссийской (с международным участием) «Недели горняка - 2009» с накопленными у нас результатами исследований МУУВ и обсудить с ними возможности исследований этого типа волн в условиях, приближенных к натурным

¹ По докладу на Всероссийской конференции «Неделя горняка-2009» МГГУ, январь 2009г, Москва

(или прямо в натуральных условиях). После этапа таких исследований можно было бы ставить вопрос о применении волн типа МУУВ для контроля за состоянием геологических сред и для решения других задач (в частности, для прогноза землетрясений [4,5,6] и результатов локальных техногенных воздействий на геологическую среду).

Ниже обсуждаются общие свойства МУУВ и приведены примеры исследования этого типа волн в кварце (наиболее подробно), а также в ряде других твёрдых веществ. Следует отметить, что в статье [6] приведены дополнительные сведения о конкретных исследованиях МУУВ в некоторых твёрдых (включая пористые) и жидких веществах.

2. Основные (установленные экспериментально) свойства МУУВ (см. подробнее [3]).

Волны типа МУУВ:

- возбуждаются импульсом лазера или электронного пучка, ударом, введением статической нагрузки (порог для возбуждения импульсом CO₂-лазерного излучения ~10кВт/см² при длительности импульса ~0,01 с), - причём удельная (на площадку воздействия) быстрота нарастания энергии возбуждающего импульса определяет скорости возникающих уединённых волн;
- МУУВ обычно состоят (при каждом конкретном условии возбуждения и регистрации) из серии нескольких, совместно возникших, уединённых волн (компонентов МУУВ), измеренные дискретные скорости которых U_i на (5-30)% ниже найденных по ф-ле:

$$U_i^{calc} = v_l / \beta^i, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (1);$$

где v_l – продольная скорость звука в веществе, β – отношение скоростей двух ближайших (по скорости) компонентов в данном образце, которое в разных материалах обычно лежит в интервале $\beta = 2,05 \pm 0,05$ [2,3]);

- интервал для скоростей различных компонентов МУУВ составляет более 9 порядков (от км/с до мкм/с; и нет оснований предполагать, что скорости не могут быть ещё меньше);

- геометрические полуширины каждого импульса ~ одинаковы, независимо от их скоростей, и составляют около 1-5 мм (в условиях комнатного эксперимента);
- знак волны (волна сжатия или волна разрежения) характеризует конденсированную среду, в которой волна распространяется; знак сохраняется при отражениях от границ образца;
- скорости компонентов почти постоянны, уменьшаются на (1-10) % при отражениях (что приводит к «долгой жизни» компонентов МУУВ в образце);
- скорости - различаются для образцов с разной степенью примесей, дефектов и меняются с изменением статического нагружения (это открывает возможности для применений);
- МУУВ - универсальное явление: волны этого типа обнаружены более, чем в 30 конденсированных средах (все типы кристаллов, аморфные вещества, полимеры, биологические ткани, жидкости) и в образцах, имеющих 1-мерную (1D) форму (канал), 2-мерную (2D) - (плоские диск и эллипс) и 3-мерную (3D) формы. Степень ослабления волны с распространением на некоторое расстояние - самая большая в образцах 3-мерной формы;
- физические механизмы продольного звука и волн типа МУУВ - *различны*, так как (1) звук - это периодические колебания, а МУУВ - уединённые (однократные) волны-импульсы; (2) температурные зависимости скоростей U_i и v_l - противоположны, судя по ряду измерений этих величин для веществ как с обычной, так и - с редко встречающейся - аномальной зависимостью $v_l(T)$.

3. Примеры наблюдения и исследования сравнительно быстрых волн типа МУУВ.

Здесь мы рассмотрим конкретные результаты исследования МУУВ для тех случаев, когда скорости компонентов равны скорости звука или меньше её в $2 \div 32$ раза. При этом будут приведены данные о способе регистрации, исследуемом веществе, методе возбуждения МУУВ.

3.1. Механо-люминесценция кварца при ударе остриём.

Наиболее интересным с точки зрения применений в горном деле веществом из исследованных нами, - является кристаллический кварц, так как он является самым распространённым соединением литосферы Земли (55,2%, [7]). Нами (в кооперации с ФТИ РАН, Санкт-Петербург) проводится большой цикл исследований по механолюминесценции (МЛ) кварца (см.[8]- как первый результат этой работы). На рис. 1 приведена схема опытов.

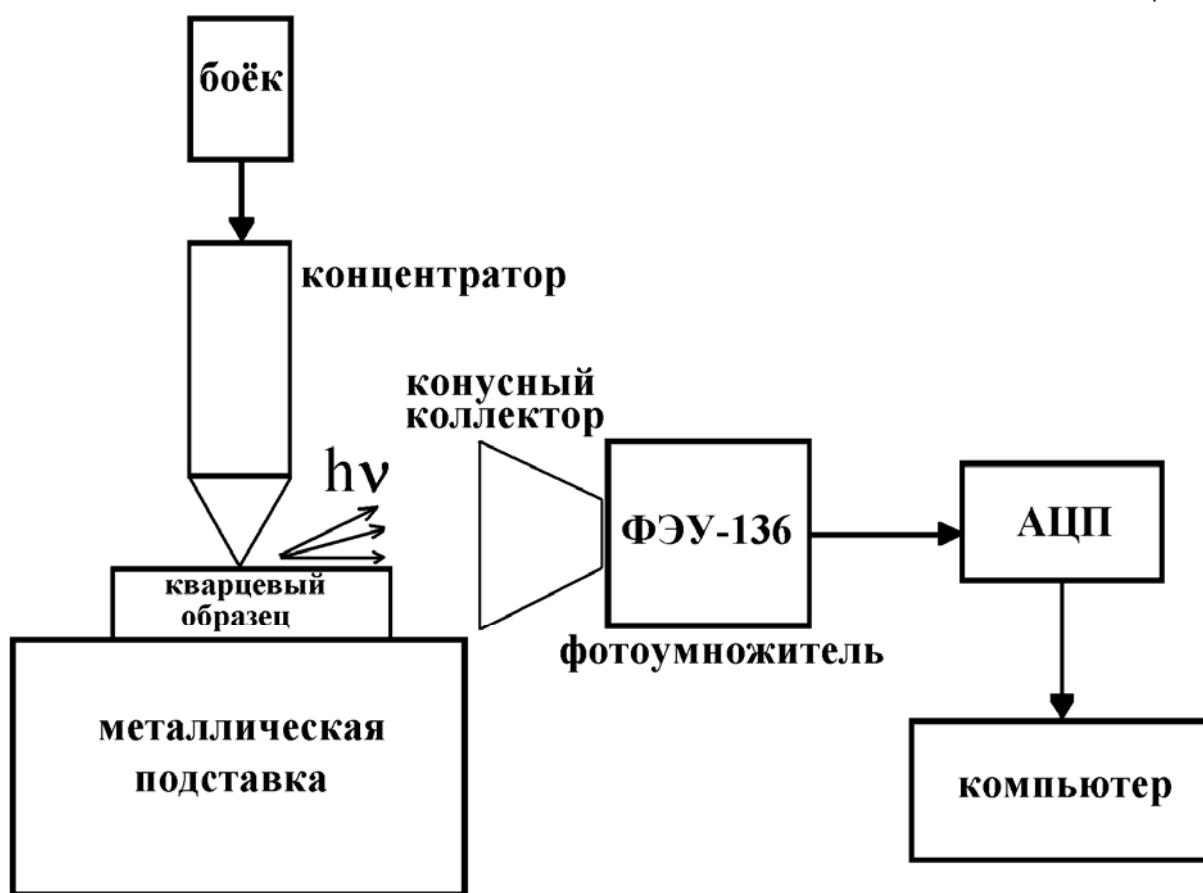


Рис.1. схема экспериментальной установки.

МЛ возникала при воздействии удара острия по оптически обработанному образцу прозрачного высоко-качественного синтетическо-го кварца (в первой работе [8] использовался природный кристаллический кварц. Качественно - результаты не изменились). Удар острия вызывает рождение двух процессов: (1) *подготовку* свечения МЛ в результате образования в образце «дерева» трещин и других дефектов и (2) движение нескольких компонентов МУУВ вниз-вверх- и

так далее - по образцу. После того, как свечение МЛ «назрело» (задержка в данных условиях составляет около 50 мкс), компоненты МУУВ выносят дефекты на поверхность образца, где те рекомбинируют и высвечиваются в виде МЛ. Регистрация свечения велась с помощью фотоумножителя (в режиме регистрации фотонов сигнал иногда «зашкаливало», то есть отношение сигнал/шум в этих опытах было вполне достаточным). На рис. 2 приведена запись механолюминесценции для одного из опытов из серии продолжающихся сейчас экспериментов с синтетическим кварцем. Образец имел размер $5 \times 7 \times 11 \text{ мм}^3$, удар остриём приходился по верхней грани $7 \times 11 \text{ мм}^2$, так что возбуждённые компоненты МУУВ двигались вниз-вверх поперёк образца толщиной 5 мм (см. врезку слева внизу на рис. 2).

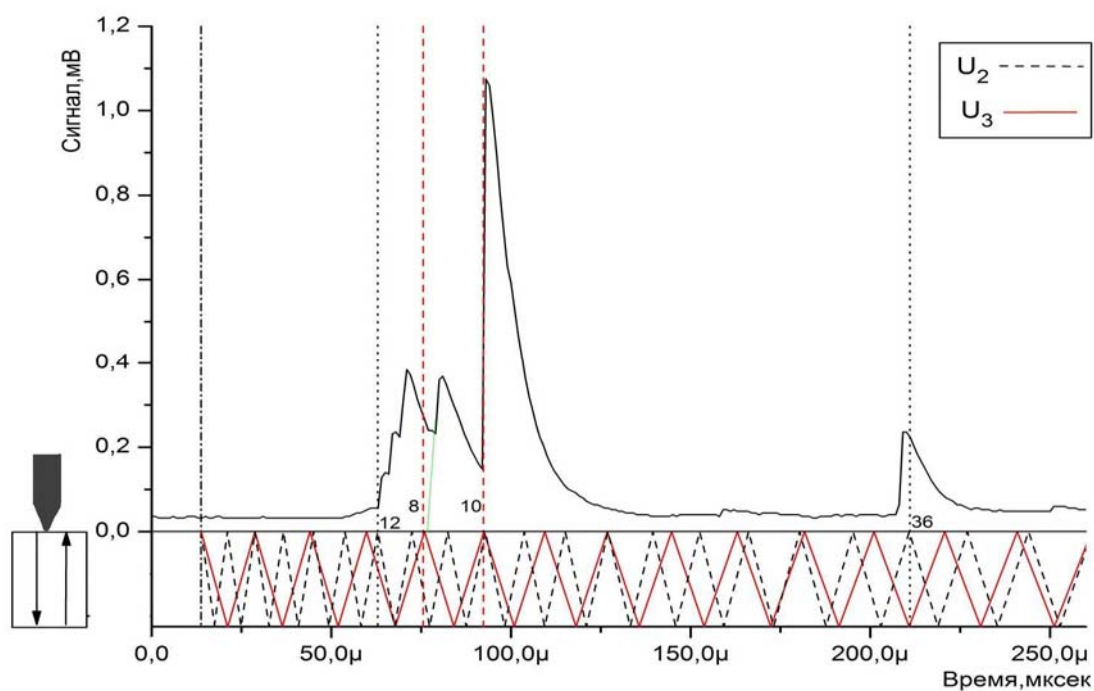


Рис.2. Запись механолюминесценции (эксперимент с синтетическим кварцем, образец размером $5 \times 7 \times 11 \text{ мм}^3$) и соответствующая $(x-t)$ -диаграмма, расшифровывающая её как результат движения по образцу компонентов МУУВ с номерами $i=3$ и $i=2$.

Ниже записи МЛ на рис. 2 приведена наша расшифровка модуляции МЛ в виде $(x-t)$ -диаграммы движения компонентов МУУВ по образцу после удара

острия. Видно, что основной пик МЛ соответствует 10-му приходу компонента $i=3$ на поверхность, а два более мелких пика, приблизительно, - 12-му и 36-му приходам компонента $i=2$ МУУВ. Проведенные с несколькими образцами разного размера исследования МЛ позволили надёжно зарегистрировать 4 из наиболее быстрых компонентов МУУВ ($i=0,1,2,3$). Скорость первого совпадает со скоростью продольного звука в кварце, остальных - отличается от него, примерно, в 2,4, 8 раза). Эта работа продолжается в настоящее время.

3.2. Механо-люминесценция меди при ударе плоского бойка, летящего с дозвуковой скоростью.

Определённый интерес для горного дела могут представлять результаты исследования волн типа МУУВ в массивных образцах меди. Можно думать (*и желательно это проверить*), что они мало отличаются от кусков руды тяжёлых металлов, с точки зрения возбуждения в них волн указанного типа. На этих результатах мы остановимся очень коротко.

Речь идёт об одной из серии работ К.Б. Абрамовой и др. по исследованию с помощью фотоумножителя *МЛ металлов*; в данном случае об исследовании МЛ меди после начала механического воздействия на образец [9]). Суть явлений, имеющих место в этом опыте, очень близка к тому, что описано выше в связи с исследованием МЛ кварца (существенным и важным отличием является непрозрачность меди). Наш анализ в 2001 году ряда осциллограмм, приведенных в [9], с которым согласилась К.Б.Абрамова, показал, что плоский удар бойка, приводивший к значительной деформации образца, возбуждал в образце сложный волновой процесс [10]. Сравнительно медленные солитонно-подобные импульсы многократно проходили в этом процессе через массивные металлические образцы меди (для анализа очень важно, что образцы имели *разную* толщину: 2,7 см и 5,0 см). На осциллограммах выделяются проявления двух встречных *пятых* ($i=5$) компонентов МУУВ, U_5 , которые проходили по образцу один с 5-ю и другой – с 6-ю отражениями от его поверхностей, вызывая МЛ *при выходе на тыльную поверхность образца*. (Это обстоятельство важно при перенесении результатов этого исследования на случай прозрачного кварца). Кроме того, мож-

но оценить скорость более быстрого компонента U_4 . Указанные компоненты МУУВ имели скорости (по оценке - до отражения от стенок) $U_4 = (0,21 \pm 0,01)$ км/с и $U_5 = (0,10 \pm 0,01)$ км/с. Такие скорости для меди (скорость звука $v_l = 4,70$ км/сек [7]), согласно выражению (1), составляют 79% и 77% от расчётных величин скорости компонентов $i = 4$ и $i = 5$, соответственно.

4. Примеры наблюдения и исследования сравнительно медленных волн типа МУУВ.

Теперь рассмотрим конкретные результаты исследования МУУВ в тех случаях, когда скорости компонентов составляли величины порядка см/с. При этом снова будут приведены данные о способе регистрации, исследуемом веществе, методе возбуждения.

4.1. Шлирен-метод для прозрачных материалов (плавленый кварц, стекло, плексиглас) с ИК-лазерным возбуждением волн типа МУУВ.

Наиболее достоверные сведения относительно знака исследуемой волны типа МУУВ, скоростей и геометрического размера её компонентов нам удалось недавно получить с помощью шлирен-метода в фотоэлектрическом варианте (см. схему эксперимента на рис. 3, где волны типа МУУВ вызывались воздействием CO_2 -лазерного импульса).

Этот метод применим для исследования сред, достаточно однородных и прозрачных для зондирующего параллельного пучка электро-магнитного излучения. В нашем случае исследовались пока плексиглас, плавленый кварц, стёкла на его основе. Как и кристаллический кварц, эти материалы прозрачны в видимой области спектра, поэтому для зондирования применялся обычный гелий-неоновый лазер. Он фокусировался линзой с фокусным расстоянием $f=200$ мм в центр образцов квадратного сечения с оптически-полированными боковыми стенками. Затем луч направлялся прямо на двух-секционный фотодетектор (или он мог быть сфокусирован на детектор сферическим зеркалом, как в случае, результат которого обсуждается ниже - на рис. 4.

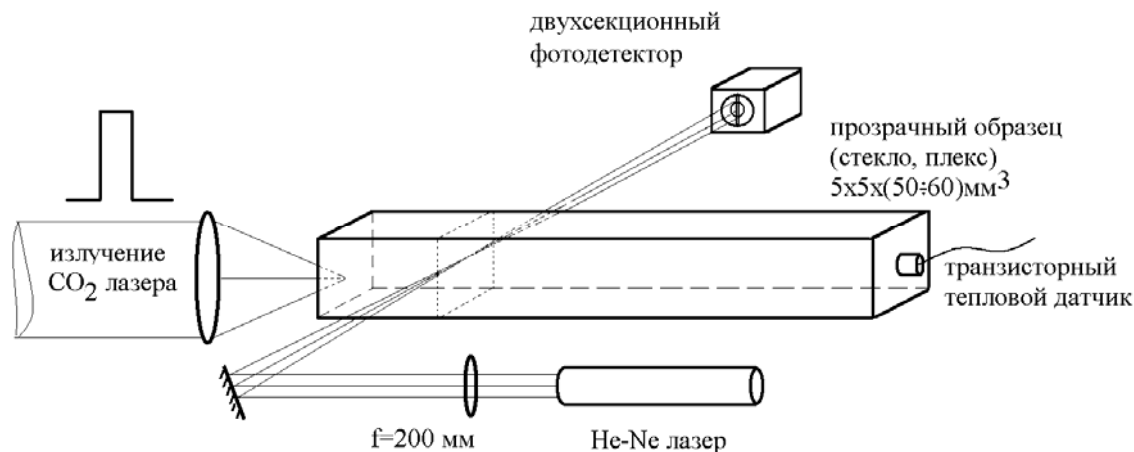


Рис. 3. Схема шлирен-метода регистрации изменений плотности. Импульс CO_2 -лазера запускает последовательность уединённых волн-импульсов; He-Ne-лазер зондирует канал в некотором сечении, тепловой датчик регистрирует приход волн к заднему торцу (работа ведётся в ФИАНе).

Лазерный луч, настроенный симметрично на обе секции детектора перед опытом, даёт нулевой сигнал. Если во время опыта через зондирующий луч проходит компонент МУУВ, он вызывает в местах своего появления - изменение плотности, которое обуславливает оптическую неоднородность (с образованием разного знака градиентов показателя преломления на переднем и на заднем фронте неоднородности). В соответствии с этим (см. рис. 4) в случае прохода *вперёд* волны разрежения сигнал с двухсекционного детектора, пропорциональный градиенту плотности, будет иметь характер дублета с отрицательным первым - и положительным вторым импульсом (знаки импульсов определяются перед опытом с помощью специальной градуировки по отклонению зондирующего луча стеклянной пластинкой). В случае прохода волны *назад* знаки первого и второго импульса в составе сигнала детектора поменяются.

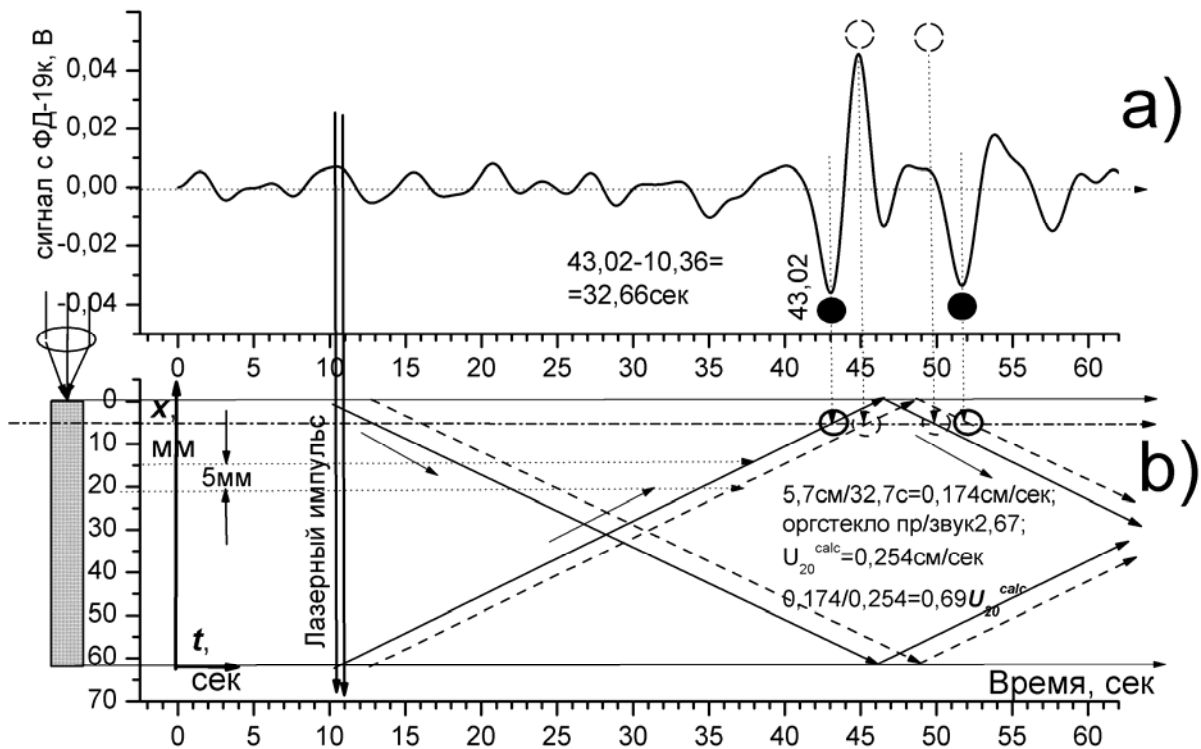


Рис. 4 а) б). Результаты измерений шпирен-методом для случая бруска из плексигласа. а)-запись шпирен-сигнала б) соответствующая ей (x-t)-диаграмма волнового процесса в образце (схема опыта на врезке слева, где штрих-пунктирная линия соответствует оптической оси зондирующего He-Ne-лазера).

На рис. 4а) представлены, в качестве примера, - результаты измерений для плексигласа по схеме рис.3. Сплошная линия - запись сигнала с двухсекционного детектора. На рис. 4 б) дана (x-t)- диаграмма волнового процесса, соответствующего этой записи по нашему предположению. Здесь видна пара компонентов МУУВ, возникших на обоих торцах образца после подачи лазерного импульса (на тыльном торце - с небольшим запаздыванием на время прохождения звука по образцу). Эта пара компонентов движется с одинаковой и постоянной скоростью, которая в условиях данного опыта составляет величину $0,17 \text{ см/сек}$. Такая скорость для плексигласа (скорость звука $v_l = 2,67 \text{ км/сек}$), согласно ф-ле (1), составляет 69% от расчётной величины скорости компонента $i = 20$.

Компонент этой пары, зародившийся на заднем торце образца, через 32,6 сек приходит к оси зондирующего лазера (отрицательный импульс, отмеченный

сплошным кружком на рис. 4а) и жирным полым кружком на схеме рис.4 б). Задний фронт этого импульса имеет + знак, отмеченный полыми кружками разной толщины на Рис. 4 а), б). Затем этот импульс отражается от торца. Теперь его переднему фронту соответствует импульс со знаком + (полые кружки разной толщины), а заднему фронту - отрицательный импульс (сплошной кружок и жирный полый, соответственно).

Расстояние между пиками в дублете позволяет найти геометрический размер неоднородности; как видно из рис.4, он составляет около 5 мм (эта величина сохраняется для всех, сильно различающихся по скоростям компонентов МУУВ).

4.2. Термопарные измерения для массивной меди (возбуждение электронным пучком).

Остановимся ещё раз на результатах исследования волн типа МУУВ в массивных образцах меди (на этот раз наблюдались сравнительно медленные скорости компонентов). В наших совместных опытах с МЭИ [11] они возбуждались *стандартным* источником высоко-энергетичных электронов. Очень простыми были применявшиеся в этих опытах детекторы (обычные термопары или транзисторные тепловые датчики). Схема опытов приведена на рис. 5.

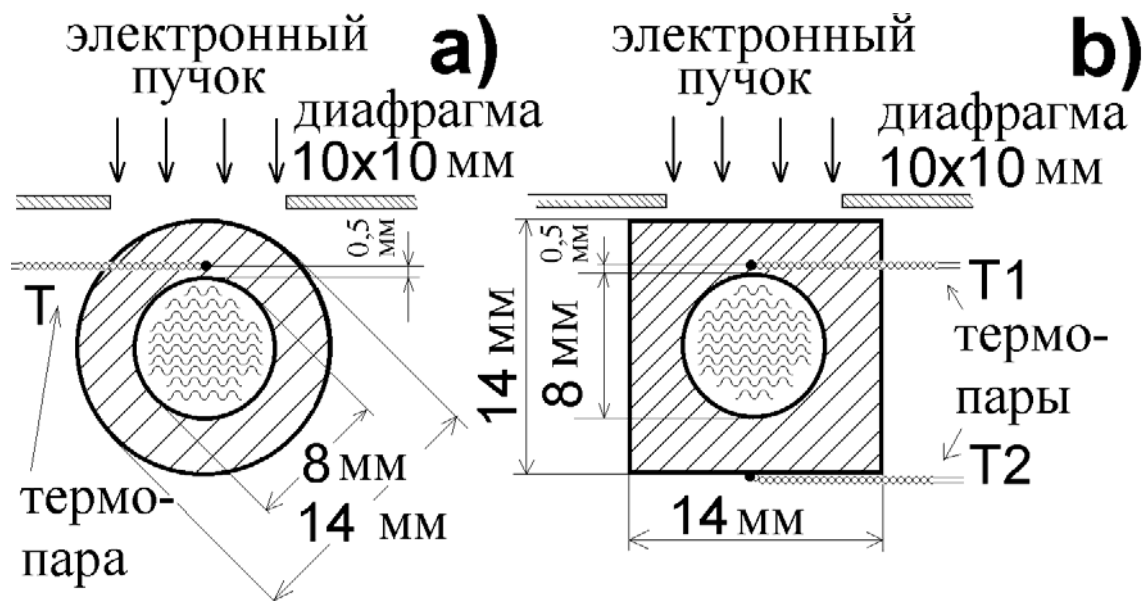


Рис.5. Схема двух вариантов установки МЭИ с электронным пучком.

Электронная пушка ЭЛА 60/15-Т давала пучок электронов, мощность которого составляла $(0,4 \div 7)$ кВт/см² на 1×1 см² участке поверхности медной трубы с наружным 14 мм и внутренним диаметром 8 мм. Через трубу прокачивалась холодная вода под высоким давлением. Труба была помещена в вакуумную камеру с форвакуумной и диффузионной откачкой. Выведение пучка на полную мощность происходило за время около 10 сек, после чего мощность оставалась примерно постоянной в течение 100-200сек. В работе с первым вариантом установки МЭИ регистрация температуры внутренней стенки облучаемой медной трубки, $T_{вн}$, с частотой записи 7 Гц производилась хромель-копелевой термопарой (её инерционность \sim мсек), вмонтированной в рабочий участок трубы со стороны внутренней поверхности на глубину $\sim 0,5$ мм. Максимальные значения $T_{вн}$ достигали 230-580°C.

На Рис.6а) представлена часть одной из сглаженных по 5 точкам записей, соответствующая выходу на установившийся режим.

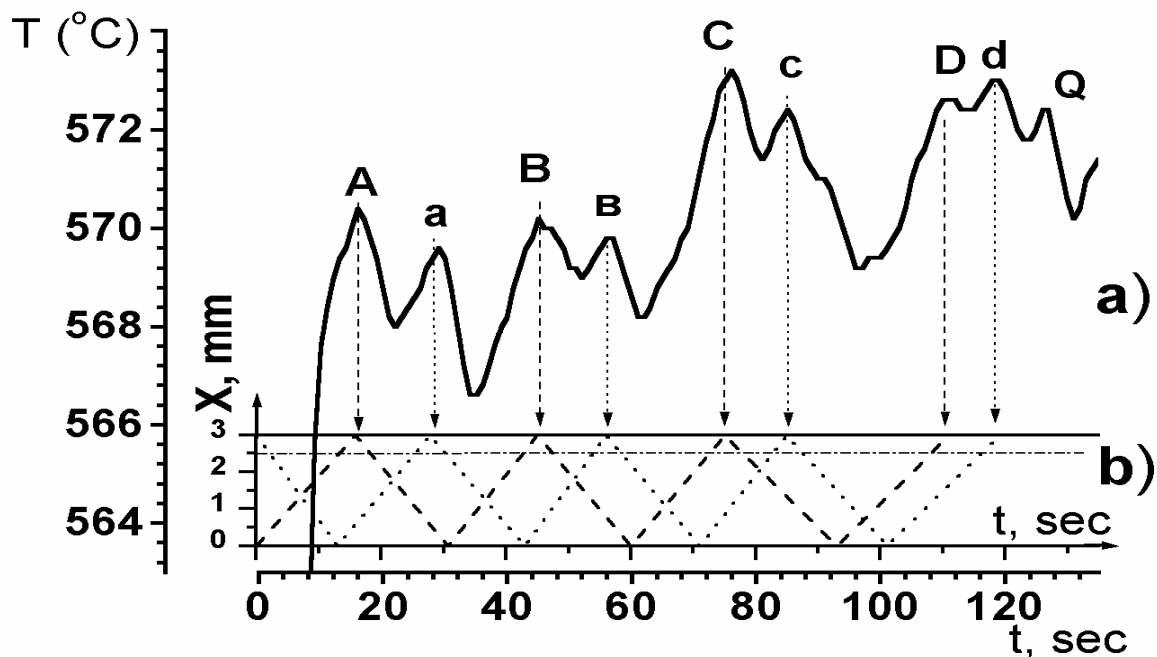


Рис. 6. а) часть записи вариации температуры на внутренней стенке для одного из опытов [11], соответствующая выходу на установившийся режим; б) (x-t) – диаграмма волновых процессов в образце, предложенная в [11].

На ней видны $\Delta T_{вн}$ – вариации температуры для медной трубки на расстоянии 0,5 мм от её внутренней поверхности. На записи, на фоне медленного роста T , видны $\Delta T_{вн}$, достигающие $(3 \div 5)^\circ\text{C}$ или $(0,6 \div 1,0) \%$ от всего изменения $(T_o - T_{макс})$.

На $(x-t)$ – диаграмме Рис.6 б) штриховыми отрезками представлено движение $c \sim$ постоянной скоростью одиночной волны, образовавшейся на лицевой, облучаемой поверхности. Она движется к внутренней поверхности, от которой отражается через 17 сек (первый максимум А на кривой Рис.6а), затем идёт к лицевой поверхности, где снова отражается (максимум Б) при подходе к термопаре. Далее процесс повторяется многократно (пики А, Б, В, Г). Можно видеть несколько меньшие по интенсивности пики а, б, в, г. Они, как и А, Б, В, Г, обусловлены приходом к той же термопаре другой одиночной волны, которая несколько меньше по интенсивности, движется \sim с той же скоростью, но зародилась на внутренней поверхности медной трубки (пунктирная линия на Рис.6б)). Оценка скорости указанных уединённых волн по данным для нескольких опытов составляет 0,018 см/с (см. Табл.1 в [11], где она мало зависит от установившейся температуры, менявшейся в пределах $(580 \div 1370)^\circ\text{C}$). Согласно ф-ле (1), в которой $\beta = 2,05$, обе найденные скорости соответствуют 23 -му компоненту МУУВ (от которого они составляют величину 56%, если не учитывать зависимость $v_l(T)$).

На ряде $\Delta T_{вн}$ – записей, которые мы не воспроизводим здесь, кроме тех же пиков, отождествляемых также как U_{23} , в промежутках между ними видны небольшие максимумы, соответствующие проявлениям последующего компонента МУУВ, то есть U_{24} , образовавшегося на лицевой стороне. Значение полученной скорости U_{24} , составляет 0,010 см/с (приблизительно, вдвое меньше, чем величины U_{23}).

Для корректного сравнения измеренных величин U_{22} и U_{23} с расчётными значениями по выражению (1), мы должны учесть зависимость $v_l(T)$ и взять продольную скорость звука для меди при $T \sim 400^\circ\text{C}$. По оценке [7, рис.3.5], модуль Юнга при таком нагреве для **Au** и **Ag** (для **Cu** данных найти не удалось) падает на 15%, что соответствует падению скорости звука на 8%. Тогда в соответствии с выражением (1), в котором $\beta = 2,05$, найденная скорость U_{23} состав-

ляет 61% от расчётной величины 23 -го компонента МУУВ. Это не вполне укладывается в обычную картину сравнения расчётных и измеренных значений скоростей МУУВ (измеренная величина обычно меньше расчётной, «теоретической», на величину от 30% до 5%). Стоит, однако, упомянуть, что, практически, все измерения скоростей МУУВ до сих пор проводились при нормальных условиях и комнатных температурах.

4. Заключение.

Наблюдаемые в приведенных выше экспериментальных работах медленные уединённые упругие волны с дискретными скоростями, безусловно, представляют интерес как в физическом, так и в прикладном смысле. Это является весомым основанием для расширения проводимых в последние годы исследований свойств МУУВ в различных твердых и жидких средах и разработки методов их использования, в частности, для диагностики и прогноза состояния, как горных пород, так и технических объектов. При обсуждении наших докладов на данной конференции было высказано сомнение относительно возможности перенесения результатов по исследованию МУУВ, полученных для чистых, однородных материалов в лаборатории, - на реальные геологические среды с их неоднородностью по составу и структуре. Однако, нам кажется, что вполне возможно для начала попытаться пронаблюдать обсуждаемые волны типа МУУВ в тех же лабораторных условиях, но уже для образцов конкретных *реальных* горных пород, которые должны иметь сравнительно крупные размеры. При этом было бы правильно использовать для возбуждения в них волн типа МУУВ мощные импульсные лазеры с достаточно широким пучком (такие возможности существуют). Это позволит обеспечить такой режим воздействия на исследуемое вещество, при котором фронт образовавшихся волн можно будет рассматривать как плоский. Тогда и потери энергии при распространении таких волн будут уменьшены, а расстояния пробега - увеличатся, что облегчит получение достоверных результатов при использовании реальных образцов геологических сред. Работы в этом направлении, как экспериментальные, так и теоретические - без-

условно заслуживают продолжения и дальнейшего развития, несмотря на то, что до сих пор физический механизм волн типа МУУВ не установлен.

5. Благодарности.

Авторы благодарят сотрудников Московского государственного горного университета за приглашение обсудить возможности совместных исследований нового типа волн для контроля за состоянием геологических сред.

Литература.

1. E.M.Kudriavtsev, S.D.Zotov, V.V.Krivov, E.N.Lotkova, Yu.I.Rybalko, "Reflection and conduction wave in HTSC after IR laser irradiation", *Material Research Society - Meeting of Fall'92, Book of abstracts*, N3, 25, Boston, USA, 1992.
2. Е.М. Кудрявцев, В.И. Емельянов, М. Утрик. «Нестационарный перенос энергии солитона - подобными волнами в твердом теле после воздействия лазерного импульса», *Инженерно-физический журнал*, 2000, том 73, № 6, стр. 1261-1267. Минск, Белоруссия.
3. Кудрявцев Е.М. «Последовательность из многих уединённых упругих волн с дискретными, вдвое убывающими, начиная от скорости звука, скоростями, возбуждаемая однократным импульсом в конденсированных средах». (Сборник трудов XIII сессии РАО, т.1 Физическая акустика. Распространение и дифракция волн, сс.204-207, Москва, ГЕОС, 2003) <http://rao.akin.ru/rao/sess13/sect1f.htm> pp.165-168 (PDF, 220K)
4. Губерман Ш.А. «О некоторых закономерностях возникновения землетрясений». // *ДАН СССР*. 1975. Т. 224. №3. С. 573-576.
5. Губерман Ш.А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. М.: Недра, 1987.-261с.
6. Кудрявцев Е.М., Макляев Е.Ф., Зотов С.Д. «Медленные уединённые упругие волны как возможная реализация гипотетических D-волн

- Ш.А.Губермана, обуславливающих землетрясения в его модели». (следующая статья в данном сборнике).
7. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова.- М.; Энергоатомиздат, 1991. -1232с. (Табл.44.2.)
 8. К.Б.Абрамова, С.Д.Зотов, Е.М.Кудрявцев, И.П.Щербаков, «Временная структура импульса механолюминесценции как подтверждение генерации солитоноподобных возбуждений в кристаллическом кварце при ударе остриём», Труды 19 сессии РАО (Нижний Новгород, 2007) *Имеются в Интернете на анлийском языке*: К.В. Abramova, S.D.Zotov, Kudriavtsev E.M., I.P. Scherbakov. ([http://rao.akin.ru/Proc.of XIX Sess.of the RAS, Sept. 2007 Phys.Acoust.\(PDF,144K\)p77-79](http://rao.akin.ru/Proc.of_XIX_Sess.of_the_RAS,Sept.2007/Phys.Acoust.(PDF,144K)p77-79)).
 9. К.Б.Абрамова, В.П. Валицкий, Н.А.Златин, Б.П. Перегуд, И.Я.Пухонто, З.В. Федичкина. «Люминесценция металлов, сопровождающая их деформацию и разрушение», ЖЭТФ, 1976, т.71, вып.5(11), стр.1873-1879.
 10. Е.М. Kudriavtsev, К.В. Abramova, I.P. Scherbakov, “Soliton-type waves of reflection and conduction in metals at static loading as a possible tool of precatastrophic damage indications”, in: *Laser - Induced Damage in Optical Materials: 2001*, Gregory J. Exarhos, Arthur H. Guenther, Keith L. Lewis, M.J. Soileau, Christopher J. Stolz, Editors, Proceedings of SPIE (2002), Vol. **4679**, pp.167-172.
 11. Е.М.Кудрявцев, А.В.Варава, А.В.Дедов, А.Т.Комов. «Наблюдение медленных компонентов солитоноподобной волновой структуры в массивном образце меди при возбуждении электронным пучком», «Краткие сообщения ОИЯИ» № 5,6 [97]-99, сс. 13-21, 1999г.