

УДК 622.611:620.179.16

**В.Н. Иньков, А.А. Закиров, Е.Б. Черепецкая**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫВЕТРИВАНИЯ МЕТОДАМИ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

*Рассмотрены возможности исследования процессов выветривания с помощью лазерно-ультразвуковой спектроскопии на примере облицовочной плитки из мрамора, подвергавшейся воздействиям разной природы в течение пятидесяти лет.*

*Ключевые слова: выветривание, лазерная ультразвуковая дефектоскопия, эхоскопия, мраморная плитка.*

**Семинар № 3**

---

**V.N. Inkov, A.A. Zakirov,  
E.B. Cherepetskaya**

### **THE INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF THE WEATHERING THROUGH LASER AND ULTRASONIC SPECTROSCOPY**

*Using laser ultrasonic spectroscopy the modifications by weathering were investigated in rocks on the basis of the different way influence on marble face-work taking place during last fifty years.*

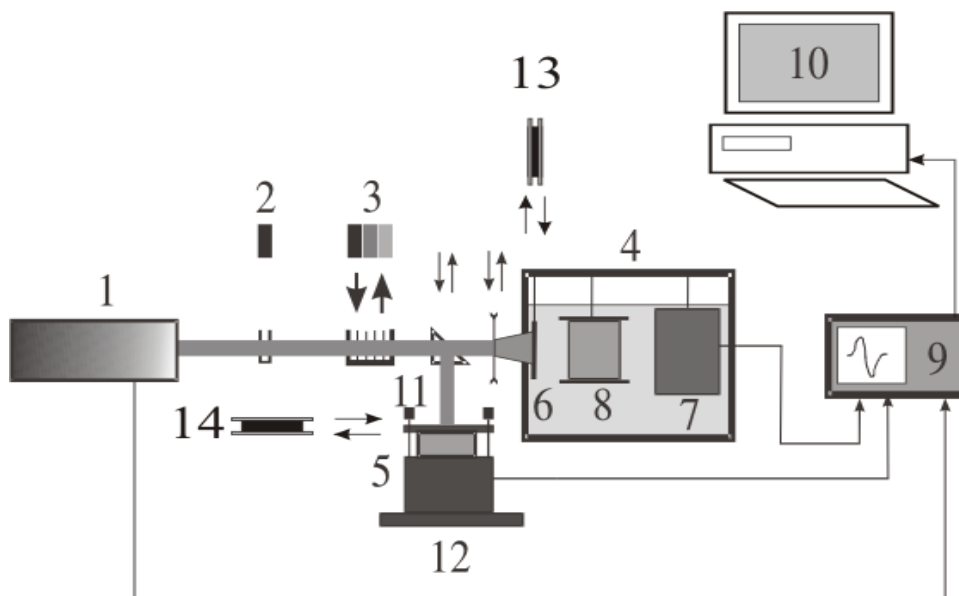
*Key words: weathering, laser ultrasonic defectoscopy, marble flag*

**О**пыт использования облицовочного мрамора, накопленный в монументальном, гражданском и промышленном строительстве, убедительно свидетельствует о его уникальных физико-механических свойствах, декоративности и долговечности [1]. В то же время экономичность мраморных покрытий во многом определяется реальными сроками их эксплуатации, которые зависят как от качества исходного минерального сырья, так и от степени структурной поврежденности, возникающей в процессе его обработки, соответствующих строительно-монтажных

работ, а также в результате различных природных и техногенных воздействий непосредственно в месте установки

Своевременная и надежная информация о степени структурной поврежденности мраморной облицовки является необходимым условием для принятия обоснованных и эффективных технологических решений по её реставрации, частичной или полной замене, что важно как с точки зрения эксплуатационной безопасности, так и с точки зрения рационального использования природных ресурсов.

Настоящая работа посвящена возможности исследования процессов выветривания с помощью лазерно-ультразвуковой спектроскопии [2,3] на примере облицовочной плитки из мрамора, покрывавшей полы главного здания МГУ им. М.В. Ломоносова и подвергавшейся в течение пятидесяти лет переменным механическим воздействиям (при перемещении людей), а также периодическим воздействиям влаги и химических моющих средств в процессе уборки. Измерения проводились в двух режимах: режиме «проходящих» волн и режиме эхоскопии.



**Рис. 1. Схема лазерной ультразвуковой установки «ГЕОСКАН-02М»:** 1 – твердотельный лазер, 2 – рассеиватель, 3 – набор светофильтров, 4 – низкочастотная ячейка, 5 – высокочастотная ячейка, 6 – оптико-акустический генератор, 7 – низкочастотный приемник, 8 – образец, 9 – осциллограф, 10 – компьютер, 11 – оптико-акустический генератор (светофильтр СЗС), 12 – высокочастотный акустический приемник, 13, 14 – сменные оптико-акустические генераторы.

Исследования в режиме «проходящих» волн проводились на установке «Геоскан-02М», блок-схема которой приведена на рис.1. В данной установке в качестве источника лазерных импульсов использовался импульсный Nd:YAG-лазер 1, работающий в режиме модуляции добротности. Максимальная энергия в импульсе 260 мДж, их длительность – 10 нс. Оптический пучок первоначально падал на рассеиватель 2, который служил для формирования равномерного по поперечному сечению распределения интенсивности. Затем системой светофильтров 3 варьировалась энергия лазерного импульса от 300 мДж до 10 мДж.

Сформированный оптический пучок попадал на низкочастотную 4 оптико-акустическую ячейку в виде кюветы с иммерсионной жидкостью, в

которую погружался генератор 6 акустических импульсов. Генератором служила пленка из полиэтилена высокого давления, акустический импеданс которой был близок к акустическому импедансу иммерсионной жидкости. В результате поглощения в пленке лазерного импульса и последующего ее расширения возбуждался однополярный импульс сжатия, длительность переднего фронта которого составляла 50 нс, что соответствовало рабочей полосе частот от 100 кГц до 12 МГц, амплитуда давления ~ 10 МПа, рабочая апертура - до 20 мм. Сигнал регистрировался задемпфированным широкополосным пьезоприемником 7 на основе ПВДФ пленки толщиной 110 мкм. Оценки показали, что полоса пропускания идеально задемпфированного пьезоэлемента, определяемая его толщиной

$h$  и скоростью продольных волн  $c_l$  в данном пьезоэлектрике, по уровню 0,5 составляет  $f_l \approx c_l / 2h$ . При использовании ПВДФ пленки ( $c_l = 1,4 \cdot 10^3$  м/с для ПВДФ) толщиной 110 мкм полоса пропускания составляла 8 МГц. Приемник был совмещен с предусилителем, а рабочая полоса частот всего приемного тракта составляла 0,3 - 8 МГц. При этом диаметр приемной апертуры был равен 53 мм. Порог детектирования широкополосного пьезоэлемента в режиме холостого хода определялся шумовым зарядом его емкости и составлял 5 Па. Поэтому динамический диапазон данной части установки был равен 60 дБ.

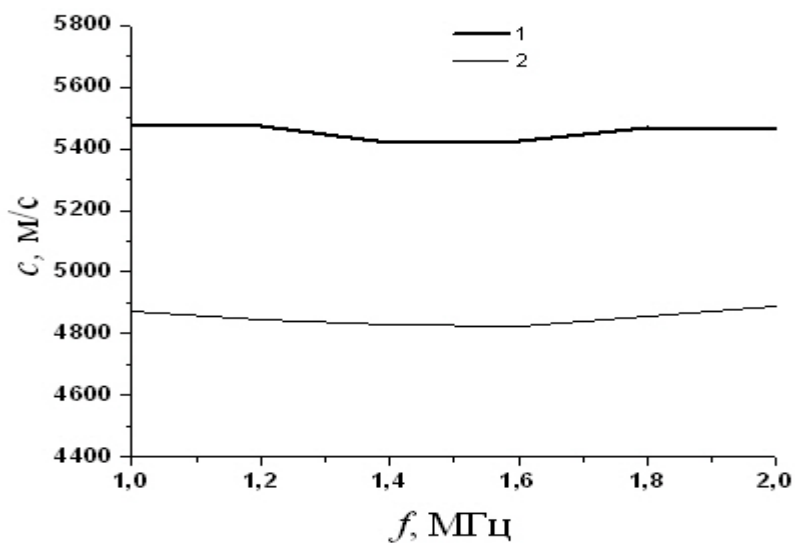
Образец помещался в кювету в специальном зажимном устройстве 8, позволяющем вращать его вокруг вертикальной оси. Сигнал с пьезоприемника подавался на запоминающий осциллограф 9. Поскольку лазер работал в импульсно-периодическом режиме, то проводилось усреднение по 128 реализациям, что позволяло увеличить отношение сигнал/шум, по крайней мере, на порядок. Усредненный сигнал подавался на персональный компьютер 10. С помощью пакета программ, написанных в среде «Matlab» и использующих быстрое Фурье-преобразование, находились амплитудный спектр сигналов (по нему рассчитывался коэффициент затухания в данном частотном диапазоне) и фазовый спектр (по нему рассчитывалась, соответственно, дисперсия скорости продольных волн).

С помощью описанной выше установки были исследованы образцы мрамора, представляющие собой прямоугольные пластинки толщиной 10 мм и площадью около 3500 мм<sup>2</sup>. Эти пластинки были изготовлены методом послойной распиловки по глубине мраморной плиты, подвергав-

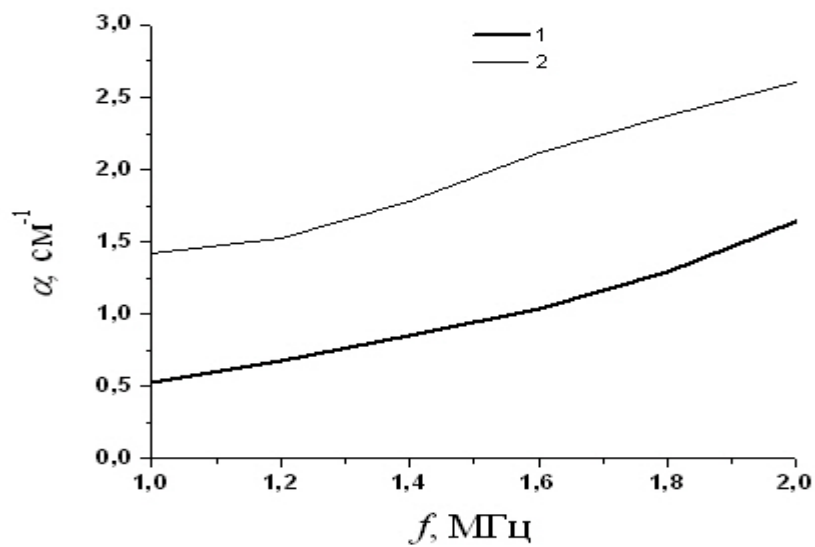
шейся в течение нескольких десятилетий одностороннему воздействию факторов естественного выветривания. В данной работе представлены результаты исследования двух образцов: первый (МГЗ 34) – пластинка, сделанная из поверхностного слоя плиты, который подвергался интенсивному внешнему воздействию, второй (МГЗ 38) – из слоя, взятого с глубины 20 мм, изношенность которого должна быть относительно незначительной.

Результаты, полученные с помощью метода проходящих волн, представлены на рис. 2 и 3. Диапазон рассматриваемых частот составлял от 1 МГц до 2 МГц. Верхняя частотная граница определялась спектром прошедшего через образец акустического сигнала, а нижняя – характеристиками приемника и геометрическими размерами исследуемых образцов. Видно, что в исследуемом диапазоне частот отсутствует дисперсия скорости распространения продольных волн (рис. 2). Более того, в первом образце (МГЗ 34) скорость меньше, чем во втором (МГЗ 38). Эти значения скоростей соответственно, равны  $(4850 \pm 30)$  м/с и  $(5390 \pm 90)$  м/с. При этом коэффициент затухания ультразвука (рис. 3) для первого образца варьируется от  $1,5 \text{ см}^{-1}$  до  $2,6 \text{ см}^{-1}$  и во всем частотном диапазоне его значения больше, чем для второго, значения которого изменяются от  $0,5 \text{ см}^{-1}$  до  $1,1 \text{ см}^{-1}$ . Меньшие значения скорости распространения упругих волн и большие значения коэффициента затухания свидетельствовали о более нарушенной структуре поверхностного слоя по сравнению с глубинным слоем.

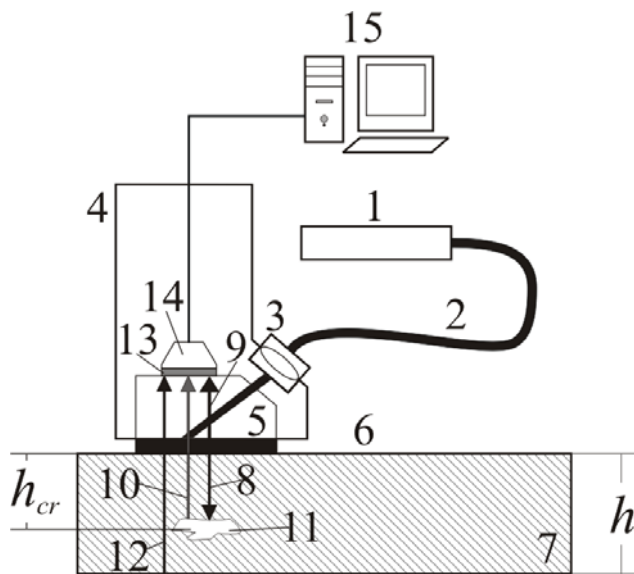
Для подтверждения данных выводов были проведены исследования в режиме эхоскопии.



**Рис. 2** Частотные зависимости скорости распространения продольных волн в образцах мрамора: 1 – МГЗ 34, 2 – МГЗ 38



**Рис. 3** Частотные зависимости коэффициента затухания ультразвука в образцах мрамора: 1 – МГЗ 34, 2 – МГЗ 38



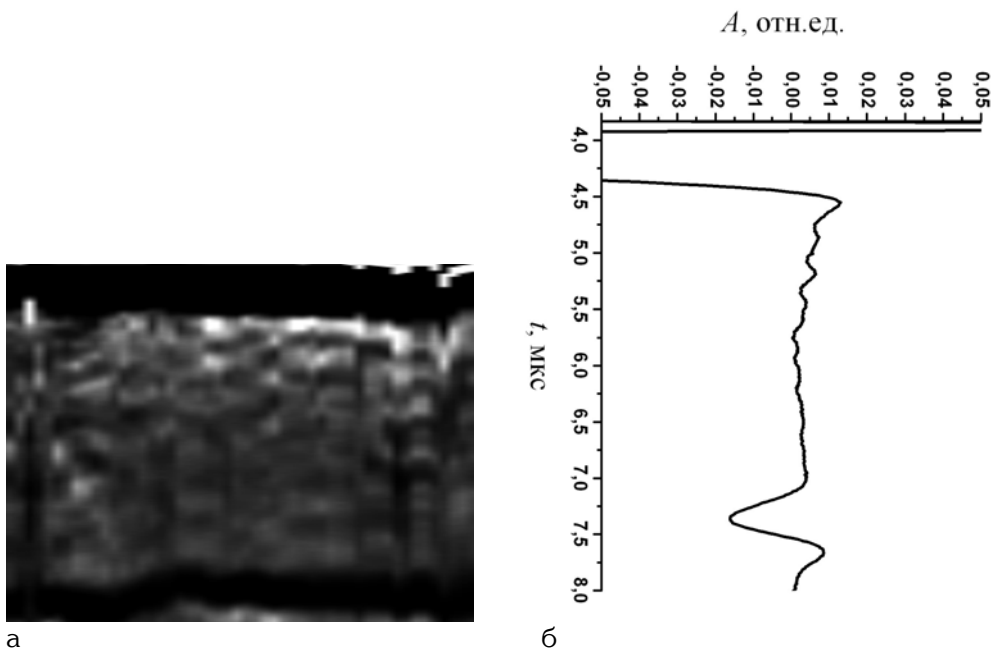
**Рис. 4. Блок-схема дефектоскопа:**

1 – лазер, 2 – оптоволокну, 3 – оптическая система, 4 – корпус рефлектметра, 5 – прозрачная призма, 6 – оптико-акустический генератор, 7 – образец, 8 – акустический импульс, распространяющийся в образце, 9 – эталонный акустический импульс, отраженный от поверхности образца, 10 – акустический импульс, отраженный от дефекта, 11 – дефект, 12 – донный акустический импульс, 13 – пьезоприемник, 14 – усилитель, 15 – компьютер

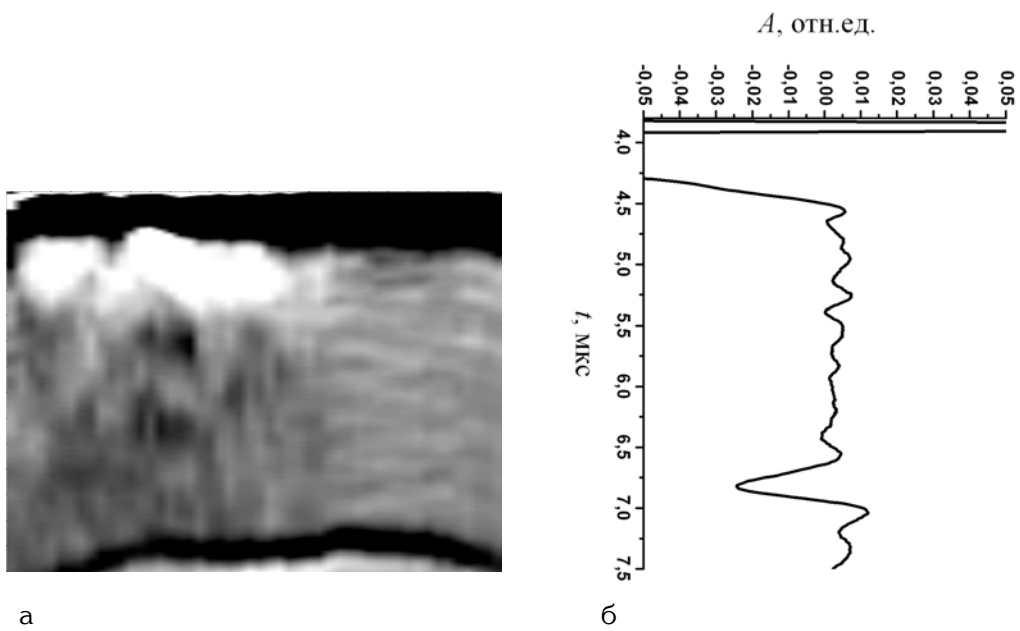
Блок-схема установки, работающей в данном режиме, приведена на рис. 4. Импульс полупроводникового лазера 1 через оптическое кварцевое волокно 2 поступает в систему формирования пучка 3 и через боковую поверхность прозрачного цилиндра 5 из плексиглаза падает на поверхность оптико-акустического генератора 6. Материал оптико-акустического генератора подобран таким образом, чтобы его акустический импеданс был близок к акустическому импедансу прозрачного цилиндра. В результате поглощения лазерного импульса в генераторе и его последующего расширения возбуждаются два акустических импульса. Первый из них 9, распространяющийся в цилиндр-звуковод, является эталонным. Его длительность составляет 100 нс, а пространственная протяженность, равная произведению скорости распространения продольных волн на длительность, как правило, не превышает  $0,4 \div 0,5$  мм. Для таких импульсов «мертвая зона» составляет 0,5 мм, что позволяет обнаружить неоднородности

структуры материала на глубинах от 0,5 мм. Второй импульс 8 распространяется непосредственно в исследуемый образец 7 и, отражаясь от неоднородностей 11 также поступает в звуковод. Все акустические сигналы регистрируются широкополосным пьезоприемником 13 из ПВДФ-пленки, приклеенной на тыльное основание звукопровода и демпфированной слоем полимеризованной эпоксидной смолы. Чувствительность пьезоприемника на основе ПВДФ-пленки толщиной  $h = 30$  мкм составляет 600 мВ/атм. Электрический сигнал с пьезоприемника 13 через усилитель 14 поступает на компьютер 15. Акустический контакт исследуемого образца с лицевой поверхностью оптико-акустического генератора обеспечивается использованием тонкого слоя воды и ручным прижимом.

На основании акустических треков, полученных в различных точках при сканировании по поверхности образца, формируется лазерный ультразвуковой скан, который несет информацию о внутренней структуре образца.



**Рис. 5. Лазерный ультразвуковой скан внутренней структуры образца мрамора МГЗ 34 (а) и один из акустических треков (б)**



**Рис. 6. Лазерный ультразвуковой скан внутренней структуры образца мрамора МГЗ 38 (а) и один из акустических треков (б)**

Изображения, построенные по результатам лазерной ультразвуковой эхоскопии образцов, представлены на рис. 5, 6. При этом на рис. 5, 6, б представлены акустические треки сигналов, прошедших через образец и отраженных от неоднородностей. По ним строятся изображения внутренней структуры образцов (рис. 5, 6, а). Видно, что внутренняя структура образца МГЗ 38, соответствующего глубинному слою облицовочной плитки, достаточно однородна, присутствуют только две небольшие области разуплотнения (две более темные области на рис. 6, а). В акустическом треке (рис. 6, б) хорошо виден донный сигнал, отраженный от тыльной поверхности образца. Это свидетельствует о

достаточно слабом рассеянии упругой волны на неоднородностях. Для образца МГЗ 34, взятого с поверхности, наблюдается значительное разуплотнение и нарушенность внутренней структуры (рис. 5, а), что проявляется в увеличении числа и размеров затемненных областей, а амплитуда донного сигнала в 1,5 раза меньше. Более того, вся структура становится неоднородной и характеризуется чередованием акустически более плотных областей с менее плотными.

Таким образом, использование методов лазерной ультразвуковой спектроскопии позволяет отслеживать изменения внутренней структуры образцов горных пород под влиянием процессов выветривания. ■■

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев Ю.И. Облицовочно-декоративный камень (в границах бывшего СССР). М.: Внешторгиздат, 1993. - 276 С.
2. Чабанов В.Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов. – Л.: ЛГУ, 1986. – 345 С.

3. Иньков В.Н., Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л. Ультразвуковая эхоскопия геоматериалов с использованием термооптических источников продольных волн//ФТПРПИ. – 2004. - №3. – С.104-107.

---

#### Коротко об авторах

Иньков В.Н. – кандидат технических наук, старший преподаватель каф. физики;  
Закиров А.А. – старший преподаватель каф. математики  
Черепецкая Е.Б. – доктор технических наук, профессор каф. ФТКП  
Московский государственный горный университет,  
Moscow state mining university, Russia, ftkp@mail.ru;

