

ВАРИАЦИИ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2022 г. Н. М. Шихова¹, А. В. Патонин¹, А. В. Пономарёв^{1,*}, В. Б. Смирнов^{1,2}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ), г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*E-mail: avp@ifz.ru

Поступила в редакцию 02.02.2022 г.

После доработки 08.02.2022 г.

Принята к публикации 10.02.2022 г.

В условиях трехосной деформации на управляемом гидравлическом прессе, при всестороннем давлении 5, 10 и 15 МПа, проведены эксперименты на песчанике, базальте и граните. Эксперименты на песчанике и базальте проводились с подачей и последующей модуляцией давления порового флюида (вода), а на граните – без подачи флюида. Регистрировались как сигналы акустической эмиссии (АЭ), возникающие в процессе разрушения материала, так и сигналы ультразвукового зондирования (УЗ) по 16 направлениям. По данным ультразвукового зондирования обнаружено изменение спектра мощности сигналов УЗ на разных стадиях испытания образца. Показано, что изменение медианы спектра мощности сигналов УЗ (медианной частоты – f_{med}) могут достигать более 100% в зависимости от степени разрушения породы, при этом изменения в спектральном составе сигналов УЗ динамичнее отражают развитие трещиноватости в образце, чем скорости распространения упругих волн. Обнаружена зависимость медианной частоты от прикладываемой осевой нагрузки. Показано, что при насыщении флюидом сухого образца происходит сильное смещение f_{med} в область низких частот. Смещение отдельных спектральных составляющих сигналов зондирования может служить индикатором изменений, происходящих в образце. Уменьшение величины f_{med} свидетельствует об увеличении степени разрушенности образца. Наиболее ярко этот эффект проявляется на высокопористых песчаниках.

Ключевые слова: лабораторное моделирование, ультразвуковое зондирование, трещиноватые среды, спектральный анализ.

DOI: 10.31857/S000233372204010X

ВВЕДЕНИЕ

Оценка напряженно-деформационного состояния горных пород и композитных материалов рассматривается в качестве одной из приоритетных задач геоконтроля. Для решения этой задачи в настоящее время привлекается широкий спектр геофизических методов, среди которых перспективными считаются акустические методы, основанные на анализе изменения кинематических и динамических характеристик упругих волн при распространении их в трещиноватой геосреде [Черепецкая и др., 2003]. Анализу подвергаются в основном волновые формы самих сигналов акустической эмиссии, возникающие в процессе разрушения материала. Волновые формы сигналов ультразвукового зондирования используются как для определения скоростей распространения упругих волн, так и для установления связи этих скоростей с добротностью геосреды. При

этом демонстрируется возможность селективной оценки величин межзерновой и трещинной пористости для горных пород [Жуков, Кузьмин, 2021]. Тем не менее, часть исследователей анализируют спектры сигналов ультразвукового зондирования на различных стадиях нагружения геоматериала [Stanchits et al., 2003]. Этими авторами отмечается усиление затухания высокочастотных составляющих спектра при увеличении трещиноватости среды. Одним из механизмов, вызывающих затухание волн на неоднородностях – микротрещинах, меньших по размеру, чем длина волны является то, что затухание вызывается кластерами зерен, а не отдельными зернами, и этот механизм является доминирующим [Blair, 1990]. В лабораторных экспериментах для эффективного исследования породы акустическими методами ультразвукового зондирования желательным использовать высокочастотную область ультразвукового диапазона.

При исследовании волнового поля, формируемого посылкой волнового пакета в случайно-трещиноватую среду, замечено [Виноградов и др., 1992; Шамина, 2005], что в общем случае трещиноватая среда является азимутально-частотным фильтром. Для сравнительно узкополосного сигнала, в зависимости от соотношения L/λ (где L — характерный размер неоднородности; λ — длина волны) среда может представлять собой фильтр низких частот, фильтр высоких частот или режекторный фильтр в том случае, когда частота максимума спектра волнового пакета близка к собственной частоте среды [Виноградов, Соловьева, 1999]. Там же указывается, что при вариациях угла между трещинами и осью нагружения от 0 до 90° отдельные составляющие спектра изменяются в несколько раз. Полученные [Виноградов и др., 1989] результаты показывают, что в направлении сжатия скорость упругих волн и преобладающая частота изменяются определенным образом с увеличением нагрузки. Скорость продольной волны вдоль оси нагружения (при нагрузках менее 80% от предела прочности образца) увеличивается, а преобладающая частота уменьшается.

При анализе спектральных составляющих сигналов ультразвукового зондирования изменение формы спектра, сдвиг резонансной или смещение медианной частот определяется наличием “мягких” неоднородностей в микроструктуре горных пород [Шкуратник, Мартынюк, 2014]. С.А. Стрижковым на моделях случайно-трещиноватых сред показано [Стрижков, 1981], что преобладающая частота волны ультразвукового импульса уменьшается при увеличении длины трещины вплоть до размеров, равной длине волны. Для высокочастотной части спектра трещина (ансамбль трещин) представляет собой крупномасштабную неоднородность, и эта часть спектра рассеивается в малом телесном угле. Для низкочастотной части спектра эта же трещина (ансамбль трещин) представляет собой мелкомасштабную неоднородность и является причиной изотропного рассеивания. Амплитудно-частотная зависимость проходящего импульса от плотности трещин в диапазоне 200–600 кГц имеет немонотонный характер с максимумом при соотношении длины трещины к длине волны примерно 0.5 [Стрижков, 1981], и концентрации трещин $10-15 \text{ см}^{-3}$.

С.Д. Виноградов отмечает [Виноградов, 2005], что ориентированная трещиноватость вносит анизотропию в среду без напряжений, в то время как при случайной трещиноватости анизотропия появляется лишь при приложении анизотропной нагрузки. Полученные этими авторами данные свидетельствуют о том, что на амплитуду принимаемого сигнала УЗ изменение угла влияет сильнее, чем изменение числа трещин. Особенно сильно изменение угла между трещинами и лини-

ей излучатель—приемник сказывается при максимальном числе трещин. В работе [Шамина, Локайчик, 1992] выявлено, что с увеличением размера дефектов в среде, по мере приближения их размеров к длине зондирующей волны, амплитуды P - и S -волн уменьшаются тем больше, чем больше размер дефектов. Однако в ряде случаев при увеличении базы прозвучивания наблюдается увеличение амплитуд. При этом авторы на качественном уровне показали, что коэффициент затухания упругих волн пропорционален квадрату частоты при отношении длины дефекта к длине зондирующей волны близком к 1. В работе [Teisseyre et al., 1985] также отмечается, что преобладающая частота упругих волн, проходящих сквозь микроморфную среду, по мере роста количества дефектов плавно приближается к постоянной величине, которая связана с пространственным распределением, направленностью и размерами дефектов, определяющих эту среду.

Отмечается, что как в работах по интерпретации данных региональных исследований, так и при интерпретации волновых полей от разрывных нарушений, результаты физического моделирования упоминаются очень редко [Кузин, 2013]. При лабораторных исследованиях, ввиду небольших размеров самих испытуемых образцов и выраженных резонансных свойств, используемых для приема сигнала пьезодатчиков, не удавалось выявить четкую зависимость спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии от изменений напряженного состояния материала и его анизотропных свойств. Сильная зависимость спектра принимаемых акустических сигналов, излучаемых трещиной, от угла подхода волны к датчику не позволяет однозначно оценивать происходящие изменения. Развитие деформаций песчаника при одноосном нагружении характеризуется изменением формы спектров и центральных частот сигналов акустической эмиссии, вычисленных методом Хуана—Гильберта [Zhang et al., 2016]. Этими авторами для каждой из шести стадий разрушения выделены характерные комбинации присутствия трех кластеров частот — низких (50–150 кГц), средних (200–250 кГц) и высоких (300–400 кГц) с типичным распределением амплитуд спектральных составляющих.

Анализ спектральных составляющих принимаемых сигналов ультразвукового зондирования в лабораторных исследованиях проводится редко. При исследовании связи роста нагрузки с объемом песка разного размера зерен и связанными с этим изменениями в доминантной частоте и амплитуде принимаемого ультразвукового сигнала показано, что при увеличении нагрузки и уменьшении доли пустот между зернами доминирующая частота принимаемого УЗ сигнала может увеличиться в 3–4 раза [Gheibi, 2018]. В последних работах ряда исследователей отмечается, что

оценка связанных с разрушениями горных пород вариаций амплитуды и средней частоты ультразвукового сигнала зондирования признается удачным подходом для характеристики процессов разрушения в горных породах. Одновременно указывается, что изменения непосредственно скоростей распространения упругих волн оказываются гораздо менее чувствительными к микромасштабным механическим изменениям [Shirole et al., 2020].

Задача настоящей работы — на основании проведенного анализа спектров мощности принимаемых сигналов ультразвукового зондирования, получаемых в лабораторных экспериментах, проводимых в условиях контролируемого сложного напряженно-деформированного состояния в условиях флюидной инициации целых и “разломных” образцов, изучить поведение медианной частоты сигналов УЗ. Оценить степень ее изменения в ходе всего эксперимента. Определить меру изменений медианной частоты, отражающей изменение напряженно-деформационного состояния и свойств образца.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Испытания образцов горных пород проводились на управляемом гидравлическом прессе INOVA [Патонин и др., 2013] в условиях трехосной деформации при всестороннем давлении 5, 10 и 15 МПа и избыточном осевом давлении до 350 МПа. В качестве исходного материала использовались высокопористый песчаник с пористостью 18–20%, базальт с пористостью 0.1% и гранит с пористостью 0.01%. Для повышения пористости базальта и гранита применялась методика увеличения трещинной компоненты пористости методом прогрева материала при температуре до 400°C [Казначеев, 2019]. В результате неоднородного теплового расширения материала формируется новая сеть микротрещин, которая увеличивает общую пористость. Данная методика положительно показала себя в аналогичных исследованиях, при этом общая пористость материала возрастала примерно в 10 раз [Смирнов и др., 2020]. Предварительно подготовленные образцы, цилиндры высотой 60 и диаметром 30 мм, запаивались в жакет из отожженной медной пластины, толщиной 0.1 мм и устанавливались в специальную ячейку для испытания [Патонин и др., 2013]. Система регистрации ультразвуковых сигналов состояла из 16 пьезоэлектрических датчиков, равномерно расположенных на поверхности образца. Половина этих датчиков могла работать в режиме излучения ультразвукового импульса (рис. 1).

Система регистрации на основе модулей ADM212x40M записывала волновые формы сигналов акустической эмиссии со всех 16 приемных

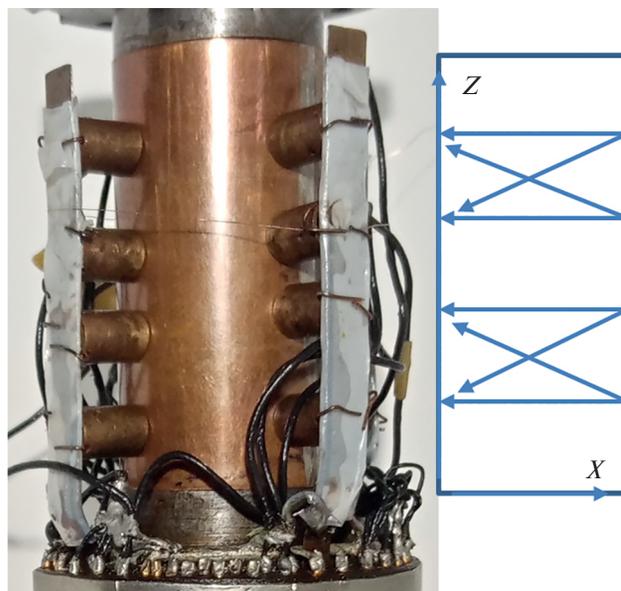


Рис. 1. Образец в ячейке для испытания с системой 16 ультразвуковых датчиков (4 линейки по 4 датчика в двух ортогональных плоскостях) и схема направлений ультразвукового прозвучивания (плоскость XOZ).

датчиков с разрешением 12 бит и частотой оцифровки 2.5 МГц на канал. Через заданные интервалы времени система с регистрации сигналов АЭ переключалась на подачу ультразвуковых импульсов по выбранным направлениям — 8 горизонтальных и 8 наклонных направлений (см. рис. 1) [Патонин и др., 2013]. При этом частота оцифровки волновых форм ультразвукового зондирования повышалась до 40 МГц на канал. Сигналы с генератора импульсов Г5-63 амплитудой 60 вольт подавались на датчики-излучатели. Коэффициент усиления предварительных усилителей составлял 40 дБ при полосе пропускания (на уровне 0.7) от 5 кГц до 1.25 МГц. Циклы зондирования повторялись с интервалом 20 с. В одном цикле зондирования проводились измерения по 16 направлениям. Длительность записи одной волновой формы сигнала зондирования составляла 10240 точек оцифровки или 256 мкс. Это означало, что упругая волна успевала пробежать всю длину образца до 10 раз. Образец нагружали с постоянной скоростью деформации 10^{-5} с^{-1} при контролируемом всестороннем давлении. В опытах на песчанике и базальте на уровне 80% от предела прочности материала в верхнюю часть образца инжестировалась вода.

Спектр мощности зарегистрированных сигналов УЗ вычислялся методом Уэлча [Марпл, 1990]. Для расчетов использовался пакет инженерных приложений Matlab. В качестве количественных характеристик спектра мощности использовались центроид (1) и медианная частота (2). Эти

параметры волновых форм используются не только в сейсмологии [Беседина и др., 2020], но и при анализе сигналов АЭ в лабораторных экспериментах [Остапчук и др., 2016; Kocharyan et al., 2018]:

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^n f_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad (1)$$

где: f_i – i -я частота спектра; A_i – ее амплитуда; n – количество анализируемых частот спектра. Медианная частота f_{med} находится из условия:

$$\int_{f_{min}}^{f_{med}} S(f) df = \int_{f_{med}}^{f_{max}} S(f) df, \quad (2)$$

где $S(f)$ – спектр мощности, а f_{min} и f_{max} – минимальные и максимальные частоты спектра.

Качественно эти две оценки нам представлялись схожими, для анализа мы использовали расчет медианной частоты спектра мощности f_{med} . При этом f_{med} служит емкой интегральной количественной характеристикой, которая отражает перераспределение дисперсии сигнала по частотам в процессе изменений условий нагружения образца [Беседина и др., 2020; Kocharyan et al., 2018]. Для детального анализа динамики медианной частоты нами были использованы волновые формы, зарегистрированные на датчиках, находящихся в верхней части образца (рис. 1). Такое расположение максимально приближено к месту инъекции поровой жидкости.

СПЕКТРЫ СИГНАЛОВ УЗ НА ЭТАЛОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

В лабораторных исследованиях для регистрации сигналов акустической эмиссии и сигналов ультразвукового зондирования используются пьезоэлектрические датчики. Имея высокую чувствительность, эти датчики обладают рядом недостатков. Геометрические размеры пьезокристалла определяют их резонансные характеристики. Демпфирование (уменьшение их добротности) приводит к понижению чувствительности датчика. Уменьшение их габаритов, и соответствующий переход в область высоких резонансных частот, также уменьшает чувствительность датчиков. Поэтому все исследователи подбирают размеры и конфигурацию самих пьезокристаллов, исходя из поставленных задач и размеров исследуемого объекта (с тем, чтобы размеры пьезокристалла, по возможности, были меньше длины регистрируемой волны). Эти условия не всегда возможно соблюдать. Учесть все возникающие частотные искажения в этой системе достаточно трудно. Для выявления ча-

стных характеристик системы ультразвукового зондирования мы провели тестирования эталонного образца из алюминия при всестороннем давлении 10 МПа. Расчет количественных характеристик спектров мощности принимаемых ультразвуковых волн от источника сигналов, не меняющего свои характеристики в ходе всего эксперимента, в этом случае был выполнен для подтверждения неизменности характеристик приемо-передающего измерительного тракта при изменениях условий нагружения образца. При этом предполагается, что характеристики алюминия меняются несущественно при используемых нами давлениях. На рис. 2 показан спектр мощности сигналов ультразвукового зондирования для одного из направлений при увеличении осевой нагрузки до 135 МПа. Поскольку абсолютная калибровка датчиков не производилась, этот и все последующие спектры рассчитывались по сигналам на выходе тракта регистрирующей системы, выраженным в мВ. Эта шкала была неизменной во всех экспериментах, что позволяет сравнивать между собой спектры мощности как в ходе отдельного эксперимента, так и в разных экспериментах.

Как можно видеть из рис. 2, основные моды и медианная частота не зависят от прикладываемого осевого давления. Немного увеличивается высокочастотная составляющая спектра при неизменности ее формы. Соответственно можно говорить о том, что ни сами пьезокристаллы, ни зона контакта образец–датчик не претерпевают существенных изменений при изменении величины осевого давления.

Далее мы попытались оценить степень влияния инжестируемой жидкости на спектральные характеристики ненагруженного образца. Для этого при комнатных условиях, без всестороннего, порового и осевого давления мы инжестировали воду в образец высокопористого песчаника. Соответствующие изменения спектра мощности для одного из выбранных направлений показаны на рис. 3.

На рис. 3 видно, что при инъекции воды спектральные составляющие перераспределяются в область низких частот. Высокочастотная составляющая сигнала УЗ затухает сильнее, причем влияние флюида очень существенно. Амплитуда принимаемой ультразвуковой волны в полностью насыщенном песчанике падает более, чем в 100 раз. Аналогичный эффект изменения спектрального состава наблюдался при инъекции воды в образец гранита [Stanchits et al., 2003].

ЭКСПЕРИМЕНТ НА ПЕСЧАНИКЕ

Эксперимент проводился на образце мелкозернистого песчаника с пористостью 18,5%. Начальное всестороннее давление 10 МПа. Образец

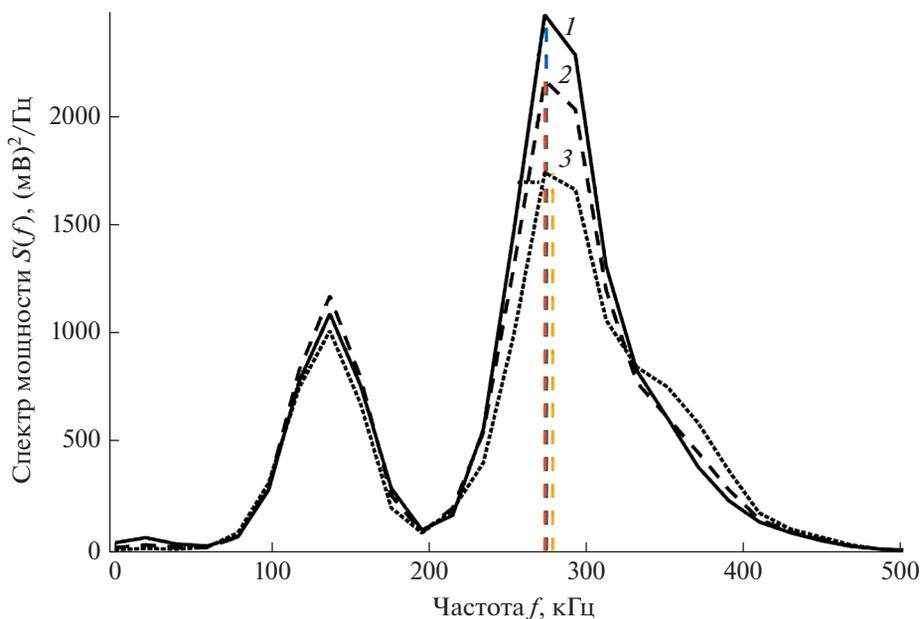


Рис. 2. Спектр мощности сигналов ультразвукового зондирования на образце из алюминия при различных осевых давлениях: 1 – 1 МПа; 2 – 65 МПа; 3 – 135 МПа. Положение пунктирной линии соответствует значению медианной частоты f_{med} .

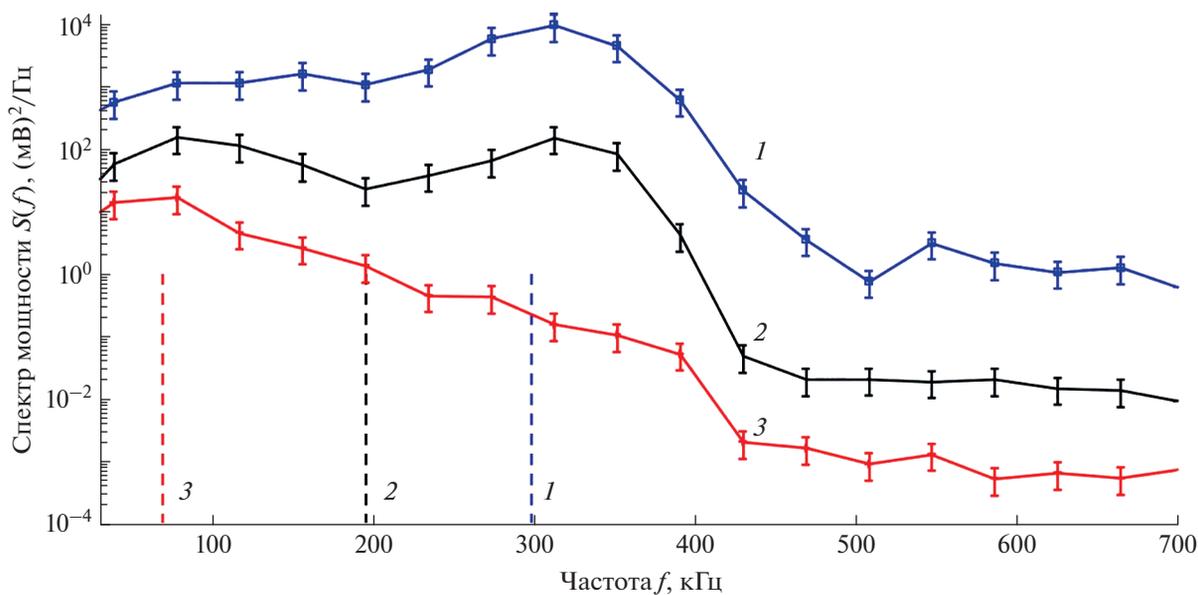


Рис. 3. Изменение спектра мощности сигнала ультразвукового зондирования при инъекции воды в образец песчаника: 1 – сухой; 2 – частично насыщенный; 3 – полностью насыщенный. Положение пунктирной линии соответствует значению медианной частоты f_{med} .

нагружался с постоянной скоростью деформации $1.2 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ до 900 с (рис. 4). Затем скорость деформации была уменьшена в 4 раза. На 1600 с испытания в образец инжестрировали воду под давлением 2.5 МПа. Подача флюида в образец осуществлялась ступенями по 1 МПа. После каждой

смены порового давления (P_p) выдерживалась пауза 200 с. На 2500 с испытания осевая нагрузка упала, что говорит об образовании в образце магистрального разлома, и поровое давление было сброшено до 0.1 МПа. Верхняя часть сформированного разлома вышла на край основания образца под углом 30° к оси нагружения. Увеличение

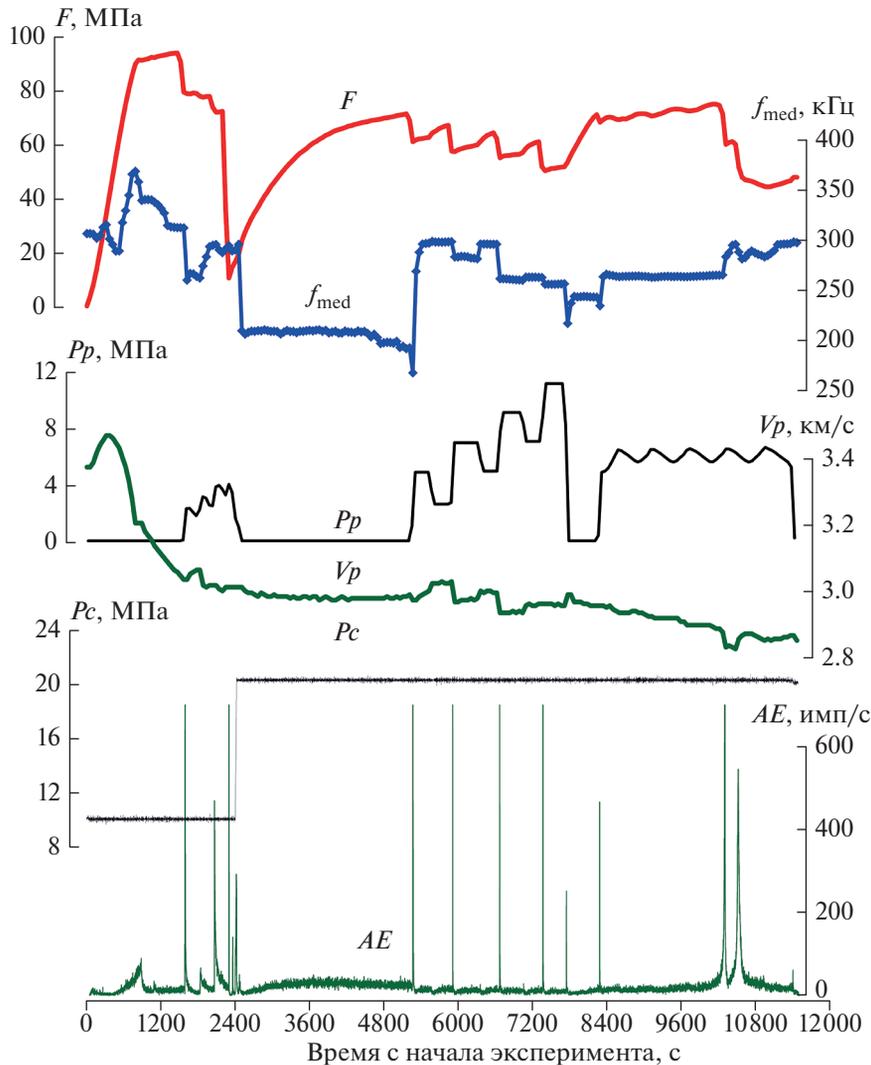


Рис. 4. Динамика осевой нагрузки (F), медианной частоты (f_{med}), порового давления (Pp), скорости продольных волн (Vp) и интенсивности потока (АЭ) в эксперименте с песчаником.

всестороннего давления до 20 МПа привело к зажатии берегов сформированного магистрального разлома. На рис. 4 приведены вариации осевой нагрузки (F), f_{med} , скоростей распространения упругих волн (Vp) и порового давления (Pp). Следующий этап нагружения (начиная с 2500 с) проходил при всестороннем давлении 20 МПа с той же постоянной скоростью нагружения. Постепенно скорость роста осевой нагрузки уменьшается. Незменность уровня интенсивности потока акустической эмиссии говорит о том, что происходит плавное скольжение берегов магистрального разлома. На фоне этого снова было увеличено поровое давление. При этом мы задавали ступенчатый режим изменения порового давления. Ступени прироста порового давления на 4 МПа чередовались со сбросом на 2 МПа.

По завершении ступенчатого цикла поровое давление было сброшено до 0.1 МПа и после небольшой паузы вновь поднято до 5 МПа. Третий, завершающий цикл изменения порового давления осуществлялся путем плавной его модуляции в виде треугольных импульсов. При этом длительность фазы подъема Pp была в 2 раза короче фазы его сброса. Полный размах изменения Pp в этих циклах составлял 1 МПа. Скорости распространения продольных волн от начала эксперимента и до момента образования магистрального разлома быстро падают с 3.3 до 2.6 км/с (примерно на 20%). Далее, в течение всего эксперимента их изменения не превышают 5%.

На рис. 5 приведены спектры мощности сигналов УЗ первой трети эксперимента. Спектр мощности на 100 секунде испытания (кривая 1 на рис. 5) характеризует начальное состояние образца.

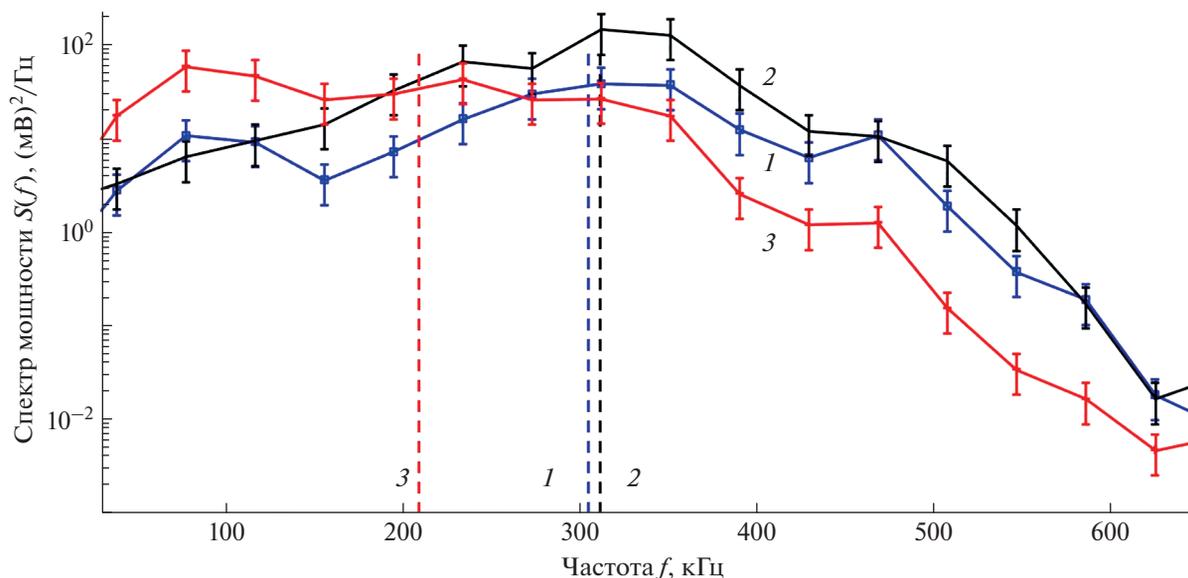


Рис. 5. Спектры мощности УЗ сигнала на отдельных временных интервалах эксперимента с песчаником: 1 – 100 с; 2 – 1500 с; 3 – 3600 с испытания. Положение пунктирной линии обозначает соответствующее положение медианной частоты f_{med} .

Спектр мощности на этапе формирования магистрального разлома при инжектировании флюида (1500 с испытания) показан на рис. 5 (кривая 2). Как можно видеть из рисунка, в несколько раз возрастает высокочастотная составляющая (примерно 310 кГц) и появляется среднечастотная (примерно 230 кГц). Понижение высокочастотной составляющей до уровня 0.5 от начального и появление преобладающей низкочастотной составляющей (около 100 кГц) наблюдается после образования магистрального разлома (3600 с испытания, кривая 3 на рис. 5).

ЭКСПЕРИМЕНТ НА БАЗАЛЬТЕ

На базальте эксперимент до конца испытания проходил при неизменном всестороннем давлении, равном 10 МПа. Пористость исходного материала составляла 0.1%. Для повышения пористости образец был предварительно выдержан в течение часа при температуре 400°C [Казначеев и др., 2019]. Эта процедура увеличила начальную трещинную пористость до 4%. Испытание образца проходило с постоянной скоростью деформации $0.6 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. На рис. 6 показана история нагружения с подачей порового давления, соответствующее изменение медианной частоты, скорости распространения упругих волн и интенсивности потока АЭ в ходе эксперимента.

В отличие от песчаника базальт имеет прочность в несколько раз большую. Формирование магистрального разлома на этом материале может

носить лавинообразный характер. Для исключения аварийной ситуации и растяжения по времени процесса образования магистрального разлома режим нагружения образца был переведен с постоянной скорости деформации в режим с контролем потока сигналов АЭ [Патонин и др., 2013]. Особенность этого режима в том, что как только интенсивность акустической эмиссии превышает заданный порог, деформация образца приостанавливается, что приводит к падению интенсивности АЭ и возобновлению деформации. Режим контроля потока АЭ использовался только на этапе формирования магистрального разлома (6000–9500 с). На графике интенсивности АЭ этого этапа видны характерные изменения потока, связанные с приостановлением осевой деформации. После выхода нагрузочной кривой на некоторый постоянный уровень в образец была инжектирована вода (9400 с). Процесс инжекции сопровождался резким ростом интенсивности акустической эмиссии (с 1–5 событий в секунду до 50–100 событий в секунду), падением несущей способности материала и образованием магистрального разлома. Максимальная осевая нагрузка в эксперименте не превышала 337 МПа. После образования магистрального разлома осевая нагрузка упала до 150 МПа, и осевая деформация образца была остановлена (10000 с). На 14000 с эксперимента в образец стали подавать модулирующее поровое давление (P_p). Амплитуда модуляции P_p увеличивалась от цикла к циклу на интервале 14000–17000 с. С 17000 с осевая деформация образца была возобновлена и началась

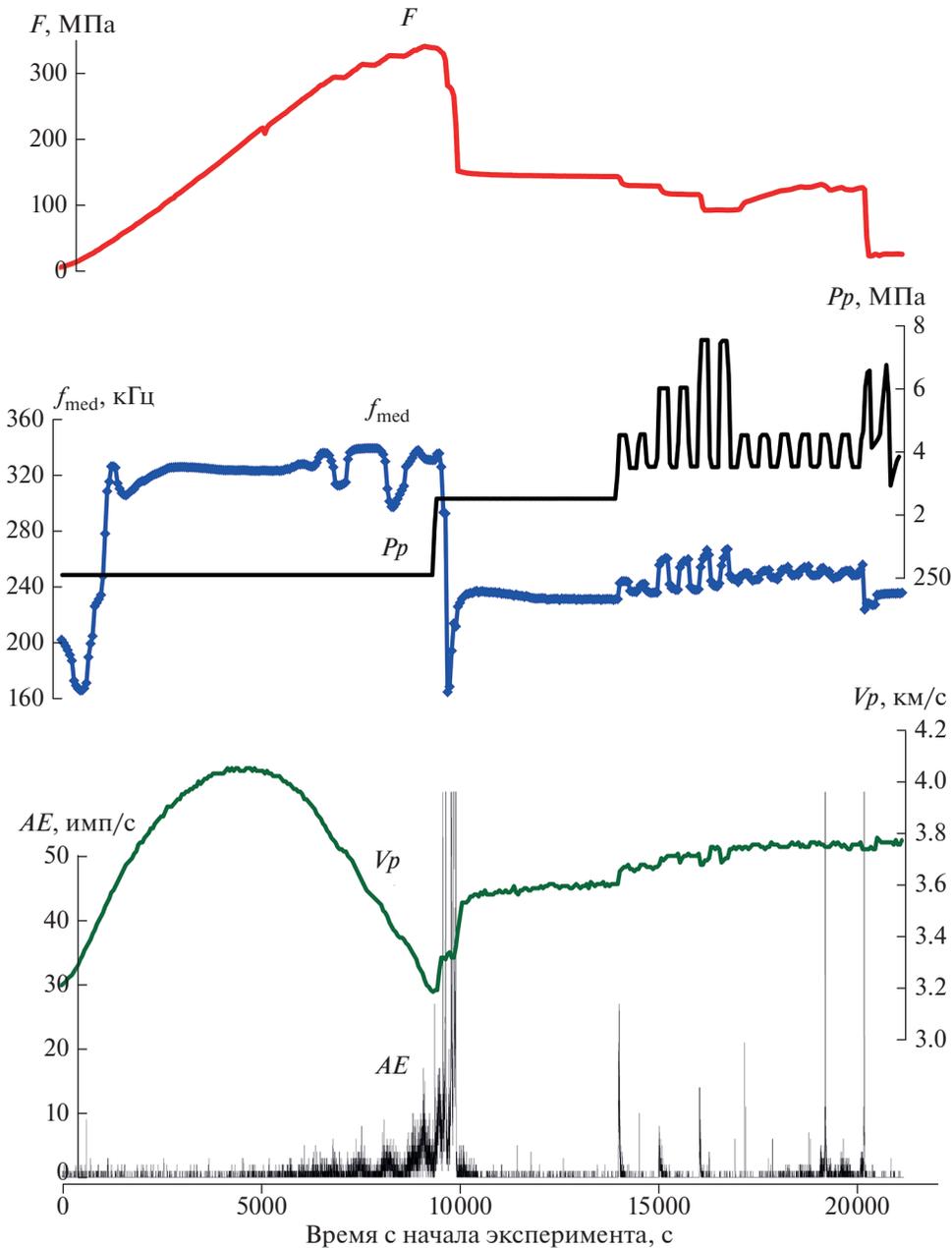


Рис. 6. Динамика осевой нагрузки (F), медианной частоты (f_{med}), порового давления (P_p), скорости продольных волн (V_p) и интенсивности потока (AE) в эксперименте с базальтом.

периодическая модуляция порового давления постоянным размахом в 1 МПа. Так же как в опыте с песчаником наибольшие изменения скоростей распространения упругих волн происходили на участке до момента образования магистрального разлома (13%). Далее, до конца испытания, изменения скоростей не превышали 3%. На рис. 7 приведены спектры мощности сигналов УЗ на различных этапах испытания.

На начальном этапе нагружения двумодальный вид спектра мощности (кривая 1 на рис. 7)

соответствует неразрушенному образцу. Этап упругой деформации образца (при осевой нагрузке около 50% от предела прочности) характеризуется существенным ростом амплитуды высокочастотной составляющей при неизменной амплитуде низкочастотной составляющей спектра (кривая 2 на рис. 7). Инжекция воды в область магистрального разлома приводит к резкому (в 10–20 раз) уменьшению амплитуды спектра мощности на всех частотах и смещению f_{med} в область более низких частот (кривая 3 на рис. 7).

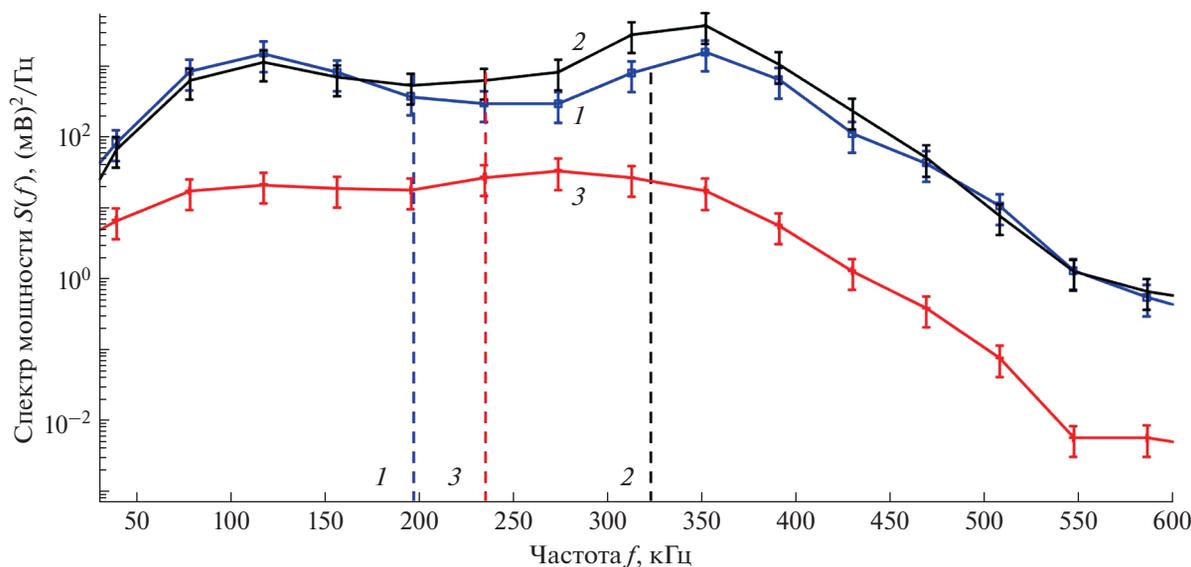


Рис. 7. Спектры мощности УЗ сигнала на отдельных временных интервалах эксперимента с базальтом: 1 – 120 с; 2 – 5014 с; 3 – 10326 с испытания. Положение пунктирной линии обозначает соответственное положение медианной частоты f_{med} .

ЭКСПЕРИМЕНТ НА ГРАНИТЕ

В отличие от двух, ранее представленных экспериментов, эксперимент на граните проходил на сухом образце без подачи порового давления. Исходная трещинная пористость материала так же была увеличена при температуре 400°C [Казначеев и др., 2019] с 0.01 до 1.2%. В ходе эксперимента всестороннее давление изменялось ступенями и составляло на последовательных стадиях нагружения 5, 10 и 15 МПа. Осевая нагрузка на каждой из стадий прикладывалась циклически (рис. 8), причем максимальное значение нагрузки в каждом последующем цикле увеличивалось. На первом этапе испытания при всестороннем давлении 5 МПа происходило прорастивание магистрального разлома. На 4-м цикле нагрузки этого этапа, при подходе к пределу прочности, после длительной паузы из режима с постоянной скоростью деформации перешли в режим контроля потока АЭ с опцией аварийного отката [Патонин и др., 2013] и продолжили нагружение до момента образования магистрального разлома. Режим контроля потока АЭ с опцией аварийного отката отличается от простого контроля потока АЭ тем, что при достижении потока сигналов АЭ установленного значения пресс резко (на заданную величину) уменьшает осевую деформацию. То есть происходит быстрый, принудительный сброс осевой нагрузки. Данный режим используется нами только в опытах на гранитных материалах. В момент образования магистрального разлома (4300 с) осевая нагрузка упала с 225 до 60 МПа. После этого всестороннее давление было увеличено до 10 МПа. Тем самым берега сформирован-

ного разлома были зажаты. Сразу после образования магистрального разлома осевое нагружение образца было остановлено. Это предотвратило скольжение берегов сформированного разлома. Следующие циклы осевого нагружения образца проходили при всестороннем давлении 10 МПа. На последнем цикле подъема осевой нагрузки III этапа при 120 МПа увеличение осевой деформации не приводило к увеличению нагрузки. Это означало, что осевая нагрузка превысила силу трения берегов магистрального разлома и осевая деформация происходит за счет смещения берегов.

На 6800 с испытания осевая нагрузка была сброшена, а всестороннее давление увеличено. Завершающий этап IV испытания проходил при всестороннем давлении 15 МПа. На третьем цикле подъема осевой нагрузки этого этапа ее значение превысило максимальное значение предыдущего этапа. Лишь на четвертом цикле, при осевом давлении 145 МПа берега магистрального разлома начали проскальзывать. С этого момента (6500 с эксперимента) изменилось поведение медианной частоты. Вместо противофазного изменения f_{med} от нагрузки (4500–6500 с эксперимента) стало синфазное ее изменение (6500–9500 с эксперимента). На рис. 9 приведены спектры мощности сигналов УЗ на различных этапах испытания.

В отличие от предыдущих двух экспериментов, на разных стадиях испытания нет ярко выраженного изменения вида спектра мощности. Начальный этап нагружения (кривая 1 на рис. 9) характеризуется наиболее высоким значением f_{med} , величина которой падает перед образованием

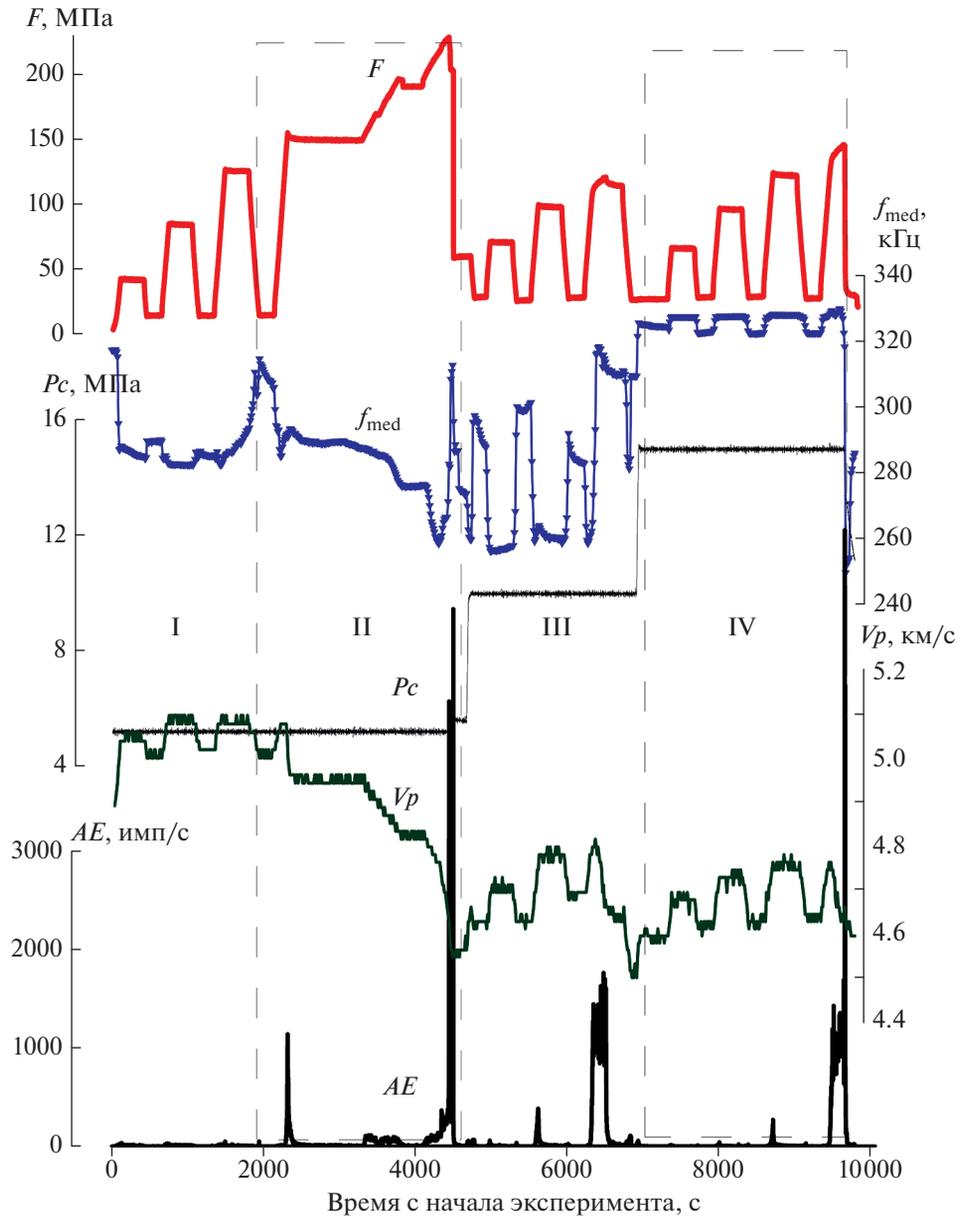


Рис. 8. Динамика осевой нагрузки (F), медианной частоты (f_{med}), порового давления (P_p), скорости продольных волн (V_p) и интенсивности потока (АЭ) в эксперименте с гранитом. Римскими цифрами I–IV обозначены участки изменения f_{med} , соответствующие разным этапам испытания.

магистрального разлома (кривая 2 на рис. 9). На заключительном этапе испытания f_{med} возвращается к первоначальному значению (кривая 3 на рис. 9). Диапазон изменения f_{med} лежит в пределах 270–317 кГц. На образцах песчаника и базальта этот диапазон гораздо шире (150–360 кГц).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценку доверительных интервалов медианной частоты можно провести с помощью двух подходов: статистического и аналитического. Проведе-

ние нескольких повторных записей сигналов зондирования (с последующим вычислением спектра мощности) для каждой точки эксперимента не осуществлялось, однако на некоторых стадиях проведенных экспериментов можно выделить участки, где условия испытаний оставались неизменными. То есть ультразвуковые зондирования, соответствующие этим временным интервалам, можно считать многократными повторами волновых форм и использовать их для статистического анализа разброса вычисленной медианной частоты. Мы провели такой анализ для участка с

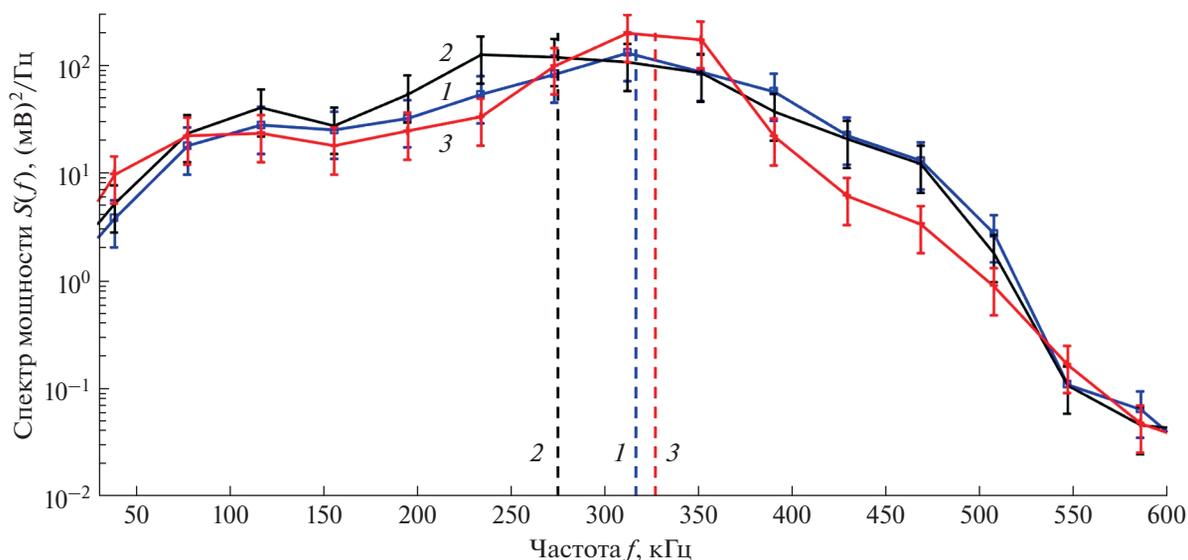


Рис. 9. Спектры мощности УЗ сигнала на отдельных временных интервалах эксперимента с гранитом: 1 – 30 с; 2 – 3973 с; 3 – 8056 с испытания. Положение пунктирной линии обозначает соответствующее положение медианной частоты f_{med} .

11000 с по 13000 с эксперимента, представленного на рис. 6. Среднее значение медианной частоты на этом интервале для 33 ультразвуковых форм составило 230 ± 0.047 кГц, что свидетельствует об устойчивости оценок медианной частоты используемым алгоритмом и низкой величине разброса этого параметра.

Добавим также, что для расчета медианной частоты использовалась стандартная функция *medfreq* пакета Матлаб. По определению медианной частоты (2) основной вклад в погрешность ее вычисления вносят ошибки расчета интеграла от спектра мощности по заданному отрезку частот численным методом прямоугольников (используемого в Матлаб при расчете медианной частоты) и стандартные погрешности оценок спектра мощности. Доверительные интервалы спектральных оценок приведены нами на графиках $S(f)$ (рис. 3, рис. 5 и рис. 7), и не превышают 10% от величин $S(f)$. Относительная погрешность метода прямоугольников для вычисления интегралов в правой и левой частях формулы (2) также не превосходит первых процентов. Следовательно, интервал погрешностей расчета медианной частоты не превышает первых процентов от ее приведенного значения.

В проведенных экспериментах на образцах горных пород (песчаник, базальт, гранит) с многофакторным внешним влиянием (осевая нагрузка, всестороннее и поровое давления) обнаружены сложные, “разнознаковые” (увеличение–уменьшение) изменения медианной частоты спектров мощности. При этом мы наблюдаем, что в зависимости от состояния, в котором находится образец, отклик медианной частоты на один и тот же

воздействующий фактор может изменяться. Данное поведение говорит о комплексном влиянии характеристик среды на распределение спектральных составляющих сигналов.

Как отмечалось во введении, известны различные механизмы влияния ряда факторов на величину и частотную зависимость затухания. В полученных эмпирических результатах в некоторых случаях можно видеть проявление некоторых из этих факторов:

а). Сжатие порового пространства при увеличении осевой (и всесторонней) нагрузки на стадиях, когда другие факторы (разрушение, флюид) еще не проявляются.

На начальном этапе нагружения (первые сотни секунд) происходит сжатие порового пространства. Косвенным подтверждением этого процесса является незначительное увеличение интенсивности потока АЭ, медленный прирост осевой нагрузки при неизменной скорости деформации и незначительное уменьшение объема образца (уменьшение радиуса образца). Во всех трех представленных экспериментах в это время наблюдается временное понижение f_{med} . Дальнейшее увеличение осевой нагрузки проходит в условиях квазилинейной (упругой) деформации материала. Этот процесс во всех трех экспериментах сопровождается резким повышением медианной частоты.

б). Развитие трещиноватости в сухих образцах без существенного увеличения напряжений на стадии начала дилатансии характеризуется уменьшением скорости роста осевой нагрузки, повышением интенсивности потока АЭ и увели-

чением диаметра образца. На этом этапе мы не наблюдаем общей тенденции поведения медианной частоты. Тем не менее, на песчанике и граните (рис. 4 и рис. 8) прослеживается тенденция понижения f_{med} . На образце базальта (рис. 6) мы видим сильные флуктуации f_{med} с некоторым трендом в сторону понижения. Сильная зависимость изменения f_{med} от ориентации трещиноватости, отмеченная рядом авторов [Виноградов и др., 1992; Шамина, 2005], наиболее ярко проявляется на гранитных и базальтовых образцах. В отличие от образца песчаника, который имеет слабую анизотропию и равномерный по размерам зерен состав, породы базальтов и гранитов имеют более неравномерную, крупно-блочную структуру (размеры зерен первые мм). Мы предполагаем, что по этой причине формируемая в них на этом этапе сеть микротрещин обладает выраженной анизотропией, что и вносит флуктуации в поведение f_{med} .

в). При первой подаче порового давления флюида (вода) начинается обводнение порового и трещинного пространства. Как и при инъекции воды в ненагруженный образец (рис. 3), в опытах на песчанике и базальте (рис. 4 и рис. 6) наблюдается резкое понижение f_{med} за счет падения высокочастотных составляющих спектра. Во всех трех экспериментах, на представленных геоматериалах в середине испытания формируется магистральный разлом, который делит образец на два больших блока. При модуляции порового давления на образце базальта (рис. 6) наблюдается корреляция f_{med} и порового давления. Такой четкой картины корреляции мы не наблюдаем на образце песчаника (рис. 4). Можно предположить, что это связано с высокой (18–20%) пористостью песчаника. Наличие большого количества флюида в межпоровом пространстве нивелирует другие факторы, возможно влияющие на изменение f_{med} . На сухом образце гранита (рис. 8) после образования магистрального разлома наблюдается зависимость f_{med} от прикладываемой осевой нагрузки. При этом на первых трех циклах изменения осевой нагрузки изменения f_{med} находятся в противофазе. Начиная с четвертого цикла модуляции осевой нагрузки изменения f_{med} синфазны. Особенность этого эксперимента в том, что при формировании магистрального разлома на 4500 с (рис. 8) мы предотвратили скольжение берегов свежеформированного разлома, зажав его повышением всестороннего давления. На первых трех циклах изменения осевой нагрузки не происходит смещения берегов разлома. Лишь на четвертом цикле осевой нагрузки берега начинают проскальзывать. Это подтверждается резким всплеском потока АЭ. В это время в области магистрального разлома появилась зона дробления. Мы предполагаем, что именно она и вызвала изменение знака корреляции f_{med} и осевой нагрузки.

Обобщая анализ поведения f_{med} в представленных лабораторных экспериментах можно сказать, что в случае одновременного воздействия нескольких факторов сложно, а порой невозможно дать однозначную, объективно-обоснованную интерпретацию обнаруженных вариаций медианной частоты, равно как и других исследуемых спектральных особенностей сигналов ультразвукового зондирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия экспериментов с образцами различных горных пород (песчаника, гранита и базальта). Проанализированы типичные режимы нагружения, применяемые в лаборатории при решении задач изучения особенностей процесса разрушения горных пород в условиях контролируемого сложного напряженно-деформированного состояния при флюидной инициации целых и “разломных” образцов. Обнаружены характерные изменения медианной частоты ультразвуковой зондирующей волны при существенных изменениях осевой нагрузки, всестороннего и порового давлений. Показано, что изменения медианной частоты УЗ волн могут быть существенными в зависимости от условий испытания и развития трещиноватости породы. Эксперименты показали, что меняется как величина затухания, так и его частотная зависимость. Изменения в спектральном составе сигналов ультразвукового зондирования оказались чувствительны как к трещиноватости образца, так и к степени заполнения флюидом его порового пространства. На этапе нагружения до 80% от предела прочности образца обнаружена прямая зависимость медианной частоты от приложенного напряжения. Показано, что динамика медианной частоты как интегральной характеристики спектра мощности, отражает ряд механизмов частотной зависимости затухания, включая обводненность и относительную степень разрушенности среды. Уменьшение величины f_{med} свидетельствует об увеличении величины раздробленности материала, которая может послужить причиной полного разрушения образца. Сложное и неоднозначное поведение медианной частоты при наличии нескольких влияющих факторов не позволяет делать объективные заключения об условиях, в которых находится горная порода. Тем не менее, медианная частота может служить индикатором изменений, происходящих в геосреде. Вариации медианной частоты отражают перераспределение энергии записанного сигнала по частотам, что является следствием изменения частотной зависимости коэффициента затухания. В условиях отсутствия калибровки источников и приемников колебаний “по АЧХ” мониторинг затухания и его частотной зависимости можно проводить на ос-

нове спектрального состава записей, унифицированных по величине и спектральному составу импульсов ультразвукового зондирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Исследования проводились в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика. 1989. 607 с.
- Беседина А.Н., Кишкина С.Б., Кочарян Г.Г., Ряховский И.А.* Анализ микросейсмического фона до и после сильных землетрясений на примере чилийской зоны субдукции // *Физика Земли*. 2020. № 2. С. 10–20.
- Виноградов С.Д., Троицкий П.А., Соловьева М.С.* Влияние трещиноватости и напряжений в среде на параметры распространяющихся упругих волн // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1989. № 4. С. 42–56.
- Виноградов С.Д., Троицкий П.А., Соловьева М.С.* Изучение распространения упругих волн в среде с ориентированной трещиноватостью // *Физика Земли*. 1992. № 5. С. 14–34.
- Виноградов С.Д., Соловьева М.С.* Параметры упругих волн, распространяющихся в нагруженной трещиноватой среде // *Физика Земли*. 1999. № 4. С. 68–74.
- Виноградов С.Д.* Трещиноватая среда и упругие волны // *Геофизические исследования*. 2005. Вып. 2. С. 3–15.
- Жуков В.С., Кузьмин Ю.О.* Экспериментальные исследования влияния трещиноватости горных пород и модельных материалов на скорость распространения продольной волны // *Физика Земли*. 2020. № 4. С. 39–50. <https://doi.org/10.31857/S000233720040109>
- Казначеев П.А., Майбук З.Ю., Пономарев А.В.* Оборудование и методика исследования термоакустоэмиссионных эффектов памяти в горных породах // *Сейсмические приборы*. 2019. Т. 55. № 1. С. 29–45.
- Кузин А.М.* Физическое моделирование рассеянных волн в интерпретации сейсмических данных. Сборник научных трудов УкрГГРИ. 2013. № 4. С. 52–60
- Марпл-мл С.Л.* Цифровой спектральный анализ и его приложения М.: Мир. 1990. 265 с.
- Остапчук А.А., Павлов Д.В., Марков В.К., Крашенинников А.В.* Исследование сигналов акустической эмиссии при сдвиге деформировании трещины // *Акустический журн*. 2016. Т. 62. № 4. С. 503–512.
- Патонин А.В., Пономарев А.В., Смирнов В.Б.* Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород // *Сейсмические приборы*. 2013. Т. 49. № 1. С. 19–34.
- Стрижков С.А.* Исследование характера частотных изменений Р-волны на моделях случайно-трещиноватых сред // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1981. № 5. С. 92–96.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Исаева А.В., Бондаренко Н.Б., Патонин А.В., Казначеев П.А., Строганова С.М., Потанина М.Г., Chadha R.K., Arora K.* Флюидная инициация разрушения в сухих и водонасыщенных горных породах // *Физика Земли*. 2020. № 6. С. 86–105.
- Шамина О.Г., Локайчик Т.* Распространение упругих волн в физических моделях случайно-неоднородных сред // *Физика Земли*. 1992. № 4. С. 78–86.
- Шамина О.Г.* Сейсмоакустические методы в геофизических исследованиях Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: ИФЗ РАН. 2005. 96 с.
- Шкуратник В.Л., Мартынюк А.Р.* Исследование упруго-нелинейных параметров образцов горных пород на основе анализа сдвига резонансной частоты ультразвукового сигнала под влиянием механического нагружения // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. № 7. С. 221–226.
- Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л., Карабутов А.А., Макаров В.Л.* Теоретическая оценка параметров ультразвуковых импульсов, возбуждаемых в геоматериалах лазерным излучением // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2003. № 4. С. 11–18.
- Blair D.P.* A direct comparison between vibrational resonance and pulse transmission data for assessment of seismic attenuation in rocks // *Geophys.* 1990. V. 55. P. 51–60.
- Kocharyan G.G., Ostapchuk A.A., Pavlov D.V.* Traces of Laboratory Earthquake Nucleation in the Spectrum of Ambient Noise Article // *Scientific reports*. 2018. V. 8. № 1. P. 10764.
- Stanchits S., Lockner D., Ponomarev A.* Anisotropic Changes in P-Wave Velocity and Attenuation During Deformation and Fluid Infiltration of Granite // *Seismological Soc. Amer.* 2003. V. 93. № 4. P. 1803–1822.
- Shirole D., Hedayat A., Ghazanfari E., Walton G.* Evaluation of an Ultrasonic Method for Damage Characterization of Brittle Rocks // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2020. V. 53. P. 2077–2094.
- Teisseyre R., Dresen L., Kozak J., Waniek L.* Physical properties of micromorphic medium: theory and experiment under varying conditions // *Acta Geophys. Polonica*. 1985. V. XXXIII. № 4. P. 341–356.
- Gheibi A., Hedayat A.* Ultrasonic investigation of granular materials subjected to compression and crushing // *Ultrasonics*. 2018. V. 87. P. 112–125
- Zhang J., Peng W., Liu F., Zhang H., Li Z.* Monitoring Rock Failure Processes Using the Hilbert–Huang Transform of Acoustic Emission Signals // *Rock Mech. Rock Eng.* 2016. V. 49. P. 427–442.

Variations in Ultrasonic Signal Spectra for Triaxial Testing of Rock Samples

N. M. Shikhova^a, A. V. Patonin^a, A. V. Ponomarev^{a, *}, and V. B. Smirnov^{a, b}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

**e-mail: avp@ifz.ru*

Experiments on sandstone, basalt and granite were carried out under conditions of triaxial deformation on a controlled hydraulic press at confining pressure of 5, 10 and 15 MPa. The experiments on sandstone and basalt were conducted with the injection of a fluid (water) and subsequent modulation of a pore-fluid pressure, and the experiments on granite were performed without fluid injection. The acoustic emission (AE) signals arising during fracturing of the material and the echo signals of ultrasonic transducers (US) in 16 directions were recorded. Changes in the power spectra of the recorded US signals at different stages of samples' testing are detected. It is shown that the changes in the median power spectrum of the US signals (median frequency f_{med}) can reach more than 100% depending on the degree of rock fracture, and, compared to elastic velocities, the changes in the spectral content of the US signals more dynamically reflect the development of fracturing in the sample. The dependence of median frequency on the applied axial load is established. It is shown that in the case of fluid saturation of a dry sample, f_{med} shifts strongly towards the low frequencies. Shifting of individual spectral components of the US echo signals can serve as an indicator of the changes taking place in the sample. A decrease in f_{med} testifies to the increase in the degree of destruction (fracturing) of the material. The effect is most pronounced in highly porous sandstones.

Keywords: laboratory modeling, ultrasonic sensing, fractured media, spectral analysis