



АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМЫЕ СПЕКТРЫ ЗАТУХАНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ В СУХОМ И ВОДОНАСЫЩЕННОМ ПЕСЧАНИКЕ ПРИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ

Э.И. Машинский

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru*

Представлены данные экспериментального исследования амплитудной зависимости затухания продольной волны в сухом и водонасыщенном песчанике, находящемся при гидростатическом давлении 10 МПа. При измерениях использовался метод отраженных волн на доминантной частоте излучаемого импульса 1 МГц в амплитудном диапазоне $\varepsilon \sim (0,3 - 2,0) \times 10^{-6}$. Спектры затухания Р-волны $Q_p^{-1}(f, \varepsilon)$ в частотном диапазоне 0,52 – 1,42 МГц в сухом и влажном состоянии образца имеют вид релаксационного пика, который зависит от величины амплитуды деформации. В насыщенном песчанике по сравнению с сухим песчаником величина затухания выше и пик затухания сдвинут к высоким частотам. С увеличением амплитуды затухание уменьшается в сухом песчанике на 4,5 %, а в насыщенном – на 9 %. Скорость Р-волны практически не зависит от амплитуды. Обсуждается возможный механизм дискретной (прерывистой) неупругости, который определяет вклад в искажение формы импульса и оказывает влияние на спектры затухания. Полученные результаты имеют фундаментальное и прикладное значение в сейсмике, акустике и других науках о Земле.

Релаксационные спектры, дискретная (прерывистая) неупругость, физика пород, нелинейное соотношение напряжение–деформация, неупругие сейсмические параметры, амплитудно-зависимые скорость волны и затухание, динамика волн

AMPLITUDE-DEPENDENT SPECTRA OF THE ATTENUATION OF A LONGITUDINAL WAVE IN DRY AND WATER-SATURATED SANDSTONE AT HYDROSTATIC PRESSURE

E.I. Mashinskii

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru*

Data of experimental study of amplitude dependence of P-wave attenuation in the dry and water-saturated sandstone under confining pressure of 10 MPa are presented. Measurements were conducted on samples using the reflection method at a dominant frequency of the initial impulse of 1 MHz in the amplitude range $\varepsilon \sim (0,3 - 2,0) \times 10^{-6}$. P-wave attenuation spectra, $Q_p^{-1}(f, \varepsilon)$ in the frequency range of 0,52 – 1,42 MHz in a dry and saturated sample have an appearance in the form of relaxation peak which depends on the strain amplitude. In the saturated sandstone, attenuation is greater and the attenuation peak is shifted to higher

frequencies compared to the dry sandstone. With increasing amplitude, wave attenuation decreases in dry sandstone by 4,5% and in saturated – by 9%. P-wave velocity practically doesn't depend on the strain amplitude. The possible mechanism of discrete (intermittent) inelasticity which determines the waveform distortion and exerts influence on wave attenuation spectra is discussed. The received results have fundamental and applied importance for seismics, acoustics and in Earth sciences.

Relaxation spectra, discrete (intermittent) inelasticity, rock physics, nonlinear stress-strain relation, inelastic seismic parameters, amplitude dependence of wave velocity and attenuation, wave dynamics

ВВЕДЕНИЕ

Динамические характеристики сейсмических волн как индикаторы сложных деформационных процессов в Земле могут быть использованы при решении многих задач фундаментального и прикладного значения. Одна из таких сложных задач относится к разделению пластов по флюидонасыщению и возможно даже по вещественному составу. Свойства горных пород, как и других твердых тел, в основном различаются по своим неупругим характеристикам, которые в большей степени связаны с динамическими параметрами волн, чем с упругими характеристиками. Поэтому современный подход предполагает использование новых данных о неупругости горных пород, которые могут быть использованы для повышения эффективности решения геологических задач.

В науках о Земле испытания различных типов горных пород при динамической нагрузке в диапазоне малых деформаций показывают разнообразные проявления неупругости вязкоупругого характера, которые описываются моделями стандартного неупругого тела [Dvorkin, Nur, 1993; Dvorkin et al., 2003; Mavko et al., 1998]. Некоторые перспективные индикаторы, как, например, частотная зависимость затухания (спектры затухания) продольных и поперечных волн, уже сейчас находятся в стадии разработки [Mavko, Dvorkin, 2005; Машинский, 2009; Mashinskii, 2006]. Использование упруго-неупругих параметров может повысить эффективность акустических и сейсмических методов в решении задач прогнозирования геологического разреза. Теория метода прогнозирования коллекторов заложена, например, в акусто-петрофизической модели (Rock Physics Model), которая подтверждена полевыми экспериментами [Dvorkin, Nur, 1993; Dvorkin et al., 1999]. Распространение волны в упруго-вязкой среде вызывает глобальный эффект Био, в результате которого происходит локальное течение (squirt flow) или их комбинация. Эти процессы ответственны за затухание волн и изменение величины упругого модуля в зависимости от частоты колебания в волне (частотная дисперсия) [Mavko, Dvorkin, 2005].

Характер дисперсии упругого модуля (или скорости волны) и декремента затухания (инверсной добротности Q^{-1}) может указывать на величину и степень насыщения породы, а также на ее дефектность. Такая модель подразумевает наличие связи релаксированного и нерелаксированного модуля с дисперсией затухания. Частотная зависимость затухания определяется моделью стандартного линейного тела (в современной трактовке – стандартного неупругого тела) через следующее выражение [Dvorkin et al., 2003]:

$$Q^{-1}(\omega) = \Delta \frac{\omega\tau_r}{1 + (\omega\tau_r)^2}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота, $\tau_r = 1/2\pi f_{\text{пик}}$ – релаксационное время ($f_{\text{пик}}$ – частота релаксационного максимума или критическая частота), Δ – дефект модуля, зависящий от величины упругих модулей в низкочастотном и высокочастотном приближении. Дефект упругого модуля определяется как:

$$\Delta_p = \frac{M_u - M_r}{\sqrt{M_r M_u}}, \quad \Delta_s = \frac{G_u - G_r}{\sqrt{G_r G_u}}, \quad (2)$$

где M_r, G_r и M_u, G_u – релаксированный и нерелаксированный упругие модули продольной и поперечной волн соответственно.

Формула (1) в общем случае описывает классический дебаевский пик. Когда частота распространяющегося сигнала совпадает с частотой пика (критической частотой, определяемой временем релаксации), имеет место максимальное затухание

$$Q_{p-\text{max}}^{-1} = \frac{M_u - M_r}{2\sqrt{M_r M_u}}, \quad Q_{s-\text{max}}^{-1} = \frac{G_u - G_r}{2\sqrt{G_r G_u}}. \quad (3)$$

Изучение частотной зависимости затухания в горных породах в условиях пластового давления показало новые возможности для диагностики сухих и флюидонасыщенных пород. Амплитудная зависимость затухания сейсмических и акустических волн в некоторых горных породах обнаружена в полевых и лабораторных экспериментах при распространении продольных и поперечных волн различного частотного диапазона [Машинский и др., 1999, 2007; Zaitsev et al., 1999; Mashinskii, 2006]. Получены перспективные амплитудно-зависимые эффекты, касающиеся параметра затухания. Это сдвиг спектра затухания продольных и поперечных волн по осям частот и инверсной добротности, изменение ширины релаксационного пика при изменении интенсивности излучаемого сигнала, остаточный гистерезис параметра затухания [Mashinskii, 2006; Машинский, 2009; Машинский, Голиков, 2012]. Пики затухания были обнаружены даже в монокристаллах природного дымчатого кварца [Mashinskii, 2008]. Эти пики были объяснены наличием микропор и включений, содержащихся в этом кварце. Подтверждением этому служит тот факт, что в прозрачном ненарушенном кварце этих дефектов нет и пики затухания в том же частотном и амплитудном диапазоне отсутствуют. Перспективным параметром для дифференциации породы по водонасыщению может быть отношение ширины релаксационного пика к его частоте $\Delta f_{0,7} / f_{\text{пик}}$. Это отношение является *амплитудно-зависимым* в водонасыщенном песчанике и *амплитудно-независимым* в сухом песчанике. Относительное изменение ширины пика при сравнении водонасыщенного песчаника с сухим песчаником $(\Delta f_{0,7} / f_{\text{пик}})_{\text{нас}} / (\Delta f_{0,7} / f_{\text{пик}})_{\text{сух}}$ при шестикратном изменении амплитуды излучаемого импульса составляет около 40 % [Машинский, 2009]. Таким образом, параметр ширины пика затухания может быть дополнительным индикатором водонасыщения песчаников. Дальнейшее изучение подобных эффектов может быть полезным для решения прикладных задач акустического каротажа, сейсмической разведки.

Исследования последних лет в физике твердого тела показали, что вязкоупругая модель может быть дополнена неупругим элементом прерывистого характера, который принимает участие в деформировании твердых тел [Baud et al., 2006; Derlet Maaf, 2013; Gurmani et al., 2011]. Предложена упруго-вязко-пластическая

модель с участием пластической составляющей деформации, которая способна представлять амплитудно-частотно-зависимый динамический модуль. В этой модели общий тензор напряжения определен суммой трех компонент: упругого, упруго-пластического и вязкоупругого модулей материала [Olsson et al., 2001]: $\sigma_{tot} = \sigma^e + \sigma^{ep} + \sigma^{ve}$. Для дислокационного механизма затухания амплитудная зависимость затухания определяется следующим выражением [Liu Chu-ming et al., 2007]:

$$Q^{-1} = \frac{C_1}{2\pi\varepsilon} \exp(-C_2 / \varepsilon) \quad (4)$$

$$C_1 = (\rho F_B L_N^3) / (6bEL_C^2), \quad C_2 = F_B / (bEL_C), \quad (5)$$

где ε – амплитуда деформации, E – модуль упругости, b – вектор Бюргера, ρ – плотность дислокаций, F_B – сила связи между дислокацией и атомом вещества (точка слабого закрепления), C_1 и C_2 – константы, которые могут быть экспериментально оценены, L_C – длина дислокации, L_N – сегмент дислокации.

В настоящее время в физике твердого тела и материаловедении большое внимание уделяется исследованию скачкообразной деформации твердых тел, которая происходит в области умеренных деформаций [Воробьев и Анпилогова, 2011; Головин и др., 2005; Песчанская и др., 2008; Экономов, 2002; Gurmani et al., 2011; Derlet, 2013; Zhou et al., 2010]. Здесь имеет место резкий переход от упругого деформирования к пластическому течению и такой скачек деформации сопровождается падением напряжения. Проявление такого эффекта сложным образом зависит от свойств материала и условий его нагружения. Предложены различные модели и математические формулировки задачи, объектом которой является процесс деформирования среды, имеющей зону катастрофического течения. Решение такой задачи позволяет получить закон деформации при скачке.

Дальнейшее развитие механической модели геологической среды базируется на учете данных дискретной (прерывистой) неупругости, полученных для различных материалов и непосредственно обнаруженных в горных породах. Некоторые данные о проявлениях дискретной неупругости в горных породах (песчаник, суглинки, кварц, кремний, мусковит, стишовит, слюда, сапфир, диорит, графит) при действии статической и динамической нагрузки описаны в работах [Luo et al., 2007; Yin et al., 2011; Mashinskii, 2012, 2014, 2016]. Процессы вязкоупругого и прерывистого характера в горных породах, как и в твердых телах, оказывают совместное влияние на динамические характеристики акустических и сейсмических волн.

В этой статье представлено экспериментальное изучение амплитудно-частотной зависимости затухания продольной волны в образцах сухого и водонасыщенного песчаника (для краткости – насыщенного песчаника) в условиях гидростатического давления и комнатной температуры. Это исследование представляет большой интерес для понимания микро деформационных механизмов в горных породах при распространении акустических и сейсмических волн.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Опытный образец мелкозернистого песчаника был изготовлен из керна, взятого с глубины 2534 м (Приразломная площадь), плотность песчаника – 2,42 г/см³, содержание мелкозернистой песчаной фракции составляет 85 % и фракции алевролита – 15 %. Эксперимент проводился при гидростатическом давлении

10 МПа и комнатной температуре. Образцы цилиндрической формы имеют следующие размеры: 40 мм в диаметре и 16 мм в длину. Торцевые поверхности образцов обрабатывались строго параллельно с высокой точностью (до 10 мкм) с использованием шлифовальных порошков. Это было сделано для исключения влияния шероховатости поверхностей образца на распространение отраженных волн и их амплитудно-зависимые характеристики.

Для экспериментов использовалась стандартная установка, широко применяемая для таких исследований [Jones, 1995; Winkler, 1983; Mashinskii, 2006]. Она представляет трехслойную модель, в которой первый и третий слои являются линией задержки и демпфером и выполнены из одинакового материала (бериллиевая бронза). Это обеспечивает идентичное отражение продольной и поперечной волн от границ раздела. Исследуемая порода находится между этими слоями. Возбуждение и прием ультразвуковых импульсов на частоте около 1 МГц осуществляется с помощью пьезокерамических датчиков, поляризованных на продольную и поперечную волны. Каждый датчик является комбинированной парой источник-приемник.

Декремент затухания вычислялся при использовании соотношения [Diallo et al., 2003; Winkler, 1983]

$$Q^{-1} = \alpha V / 8,686\pi f = \alpha \lambda / 8,686\pi, \quad (6)$$

где α – коэффициент поглощения, дБ/м⁻¹, V – фазовая скорость, м/с⁻¹ и f – частота, Гц. Величина α вычисляется при использовании соотношения [Winkler, Plona, 1982]:

$$\alpha(\omega) = \frac{8,686}{L} \ln \left[\frac{|R_{23}| A_{top}(f)}{|R_{12}| A_{bot}(f)} (1 - R_{12}^2(f)) \right], \quad (7)$$

где L – двойная длина образца, м, $A_{top}(f)$ – амплитуда Фурье отраженного импульса от верхней границы образца, $A_{bot}(f)$ – амплитуда Фурье отраженного импульса от нижней границы образца, $R_{12}(f)$ – коэффициент отражения от верхней границы и R_{23} – коэффициент отражения от нижней границы. В нашем случае границы являются идентичными и поэтому $R_{12}(f) = -R_{23}(f)$. Коэффициент отражения вычисляется из выражения:

$$R(f) = \frac{\rho_r V_r(f) - \rho_b V_b(f)}{\rho_r V_r(f) + \rho_b V_b(f)}, \quad (8)$$

где ρ_r и ρ_b – плотность породы и бериллиевой бронзы, кг/м⁻³, соответственно, $V_r(f)$ и $V_b(f)$ – скорости волны, м/с⁻¹.

Декремент затухания продольной волны в сухом и насыщенном песчанике измерялся на различных величинах амплитуды излучаемого сигнала, изменяемых по замкнутому циклу. Сначала амплитуда импульса дискретно увеличивалась от минимальной величины до максимальной (восходящий курс), а затем обратно уменьшалась по тем же значениям амплитуд до исходной величины (нисходящий курс):

$A_{\min} = A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_{\max} = A_6 \dots \rightarrow \dots A_1$ (на рисунках увеличение амплитуды помечено стрелкой \uparrow , ее уменьшение – стрелкой \downarrow). Величины относительной деформации амплитуды импульса следующие: $\varepsilon_1 \approx 0,3 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_2 \approx 0,5 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_3 \approx 1,0 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_4 \approx 1,3 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_5 \approx 1,7 \times 10^{-6}$ и $\varepsilon_6 \approx 2 \times 10^{-6}$. Измерение величины затухания производилось на каждом амплитудном уровне. Спектры затухания вычислялись в полосе частот $\Delta f_{\min-\max} = 0,52 - 1,41$ МГц, свободной от дифракционных эффектов. Для повышения помехоустойчивости регистрация проводилась с накоплением сигнала.

Наши измерения являются относительными. Здесь не ставится задача точного определения абсолютной величины затухания, нас интересует качественное поведение параметра затухания при изменении величины амплитуды. Мы проводим сравнительный анализ изменения величины и формы частотной зависимости затухания, зарегистрированных на различных амплитудах при неизменности всех остальных условий. Такой прием как повторное измерение всех параметров затухания на одинаковой восходящей и нисходящей амплитуде ($A_{n\uparrow} = A_{n\downarrow}$) для каждой ее величины позволяет установить достоверность получаемого результата.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе акустические записи были изучены как в обычном аналоговом виде, так и в первичном цифровом виде, с высокоразрешающим отображением сигнала в увеличенном масштабе. Такое отображение получено соединением всех точек квантования ($t_{\text{квант}}$) цифровых амплитудных значений на трассе прямолинейными отрезками, т. е. без сглаживания. Представление сигналов в таком виде позволяет детально рассмотреть динамический процесс на амплитудно-временном профиле, $A(t)$, с разрешением во времени в один квант, $t_{\text{квант}} = 32,5$ нс. В результате имеется возможность обнаружить специфические искажения формы волны во времени, которые, как ожидается, могут быть связаны с проявлениями дискретной (прерывистой) неупругости. Иллюстрации приведены как в аналоговом, так и цифровом отображении.

Результаты. Проверка регистрирующего тракта на идентичность записи, проведенная на постоянной и переменной величинах амплитуды, показала достоверность полученных данных. На рис. 1 представлены записи входного и отраженного сигналов, зарегистрированных в сухом и насыщенном песчанике на постоянной амплитуде. Здесь показаны четыре последовательных измерения, сделанные на величине амплитуды A_4 . Входной и выходной импульсы являются идентичными для всех измерений. Однако время вступления отраженного сигнала в сухом и насыщенном песчанике не одинаково. Импульс, распространяющийся в насыщенном песчанике, отстает от импульса в сухом песчанике на $\sim 0,26$ мкс (задержка во времени составляет около 0,9 %). Спектры Фурье отраженной волны, полученные для сухого и насыщенного песчаника, представлены на рис. 2. Оба спектра на всех величинах амплитуд имеют осложнение в виде провала, однако в сухом песчанике провал расположен на переднем фронте спектра, а в насыщенном песчанике глубокий провал находится в центральной части спектра Фурье.

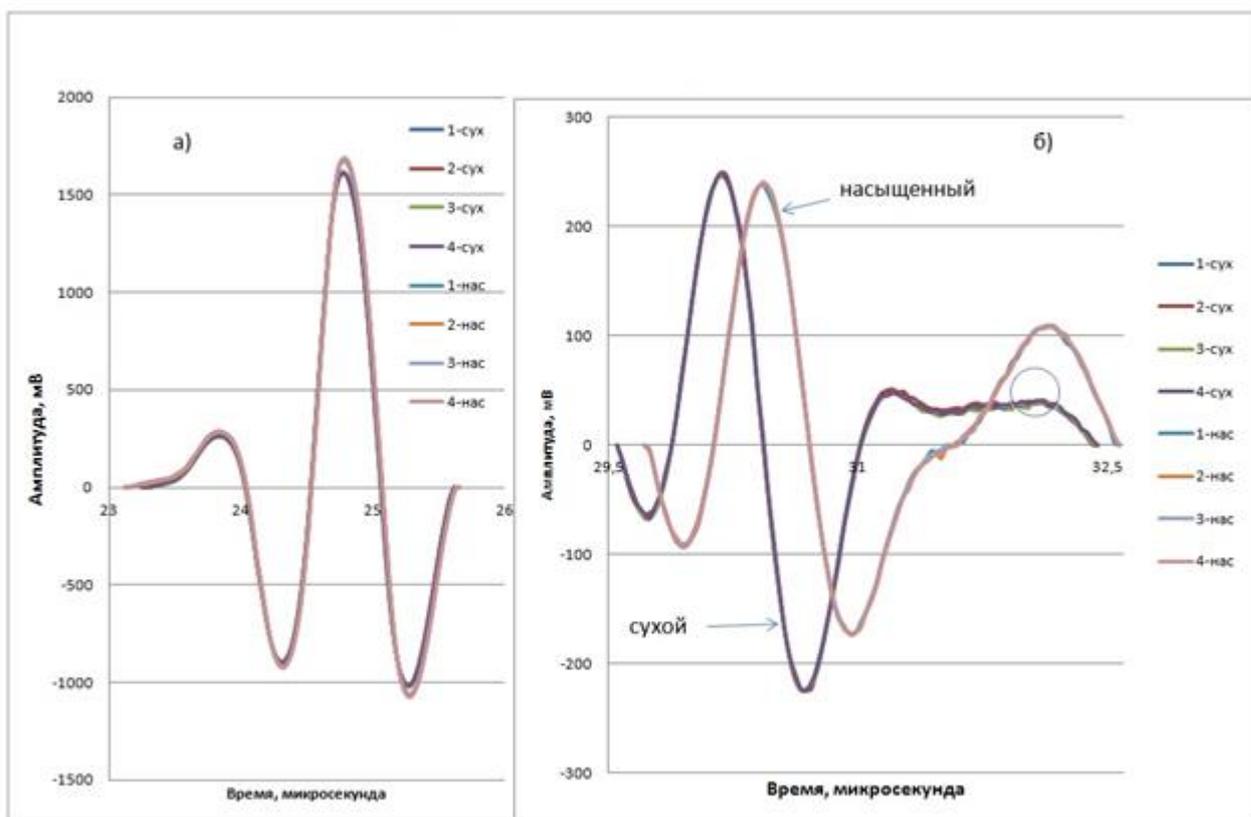


Рис. 1. Входной (а) и отраженный (б) сигналы в сухом и насыщенном песчанике, четыре измерения на одинаковой величине амплитуды

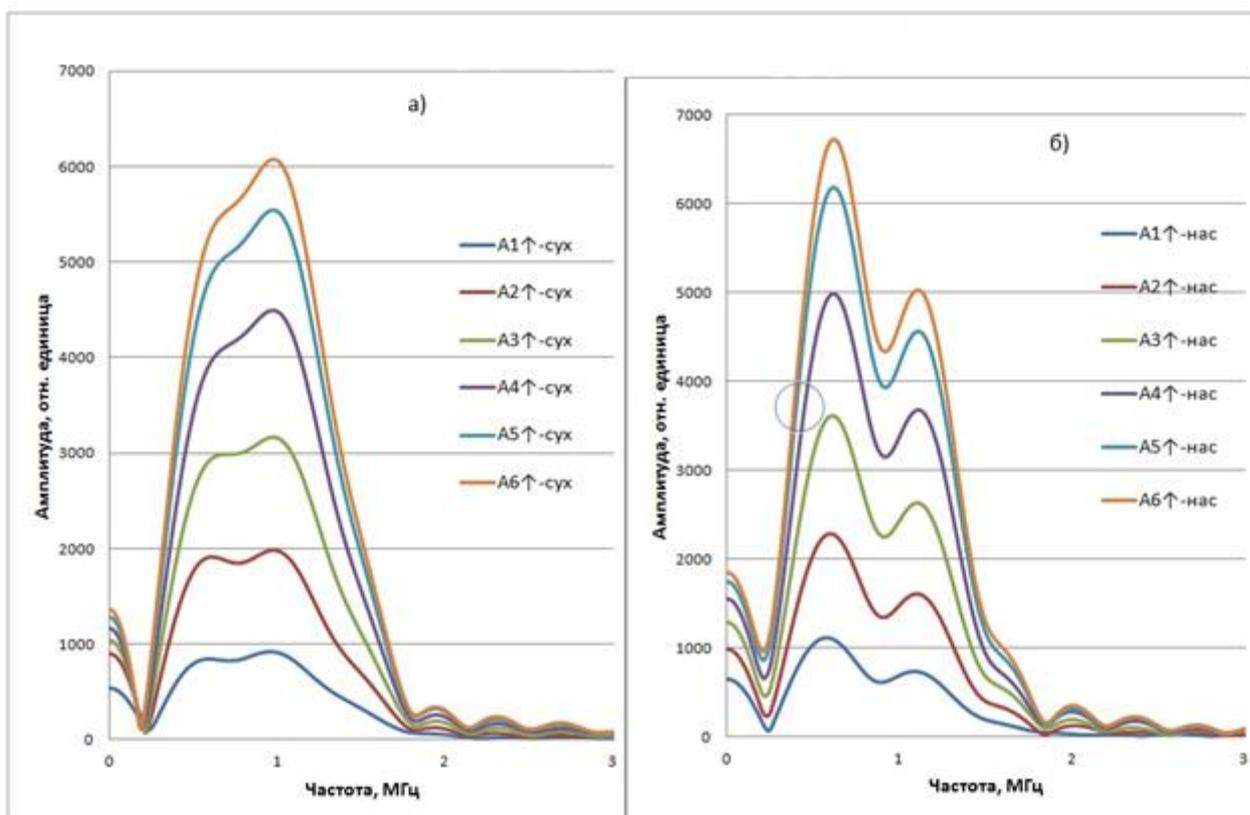


Рис. 2. Спектры Фурье отраженной волны в сухом (а) и насыщенном (б) песчанике

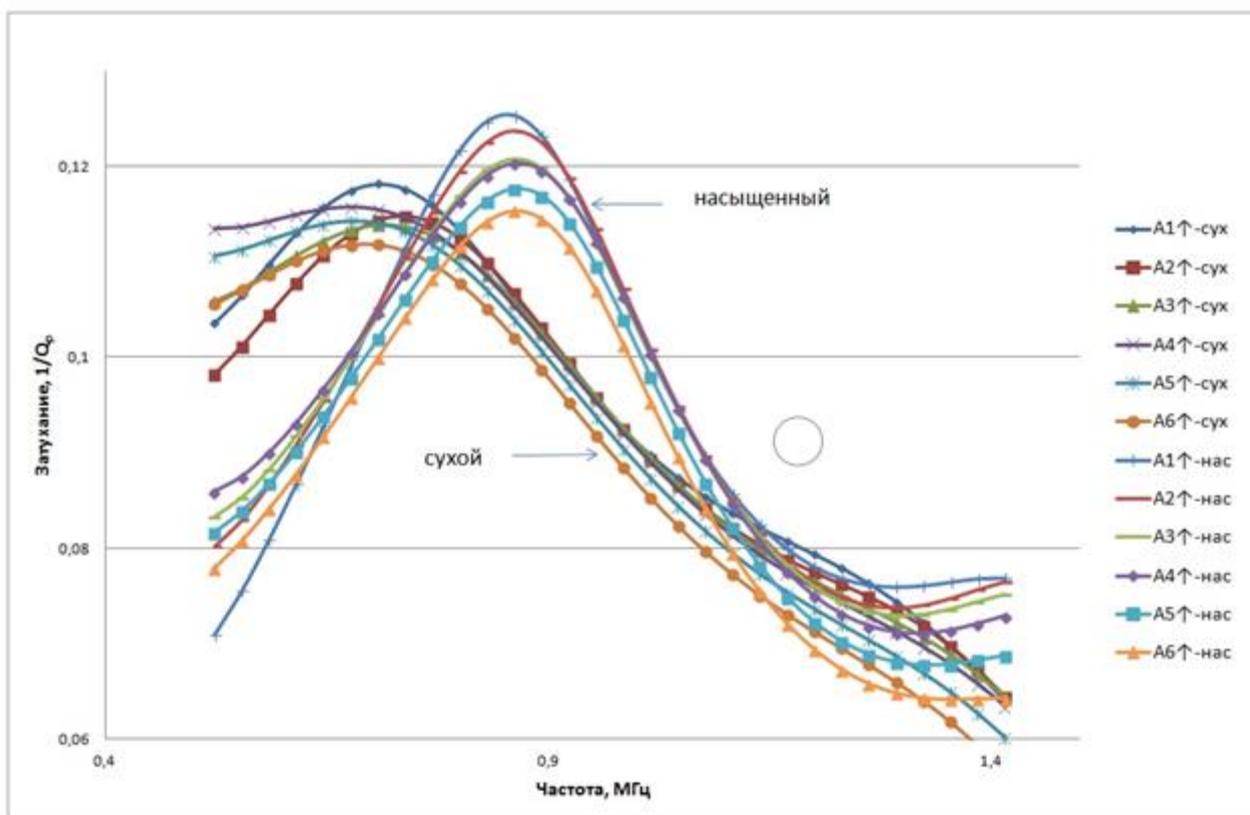


Рис. 3. Спектры затухания продольной волны в сухом и водонасыщенном песчанике

Спектры затухания продольной волны в сухом и насыщенном песчанике представлены на рис. 3. Здесь показаны спектры затухания только для восходящих амплитудных значений ($A_n \uparrow$), спектры затухания для нисходящих значений ($A_n \downarrow$) не показаны, чтобы не перегружать графики. Восходящие и нисходящие спектры затухания являются идентичными. В диапазоне частот 0,52 – 1,42 МГц на всех амплитудах A1 – A6 ($\varepsilon \sim (0,3 - 2,0) \times 10^{-6}$) спектры затухания Р-волны имеют пик. Для песчаника в сухом состоянии пик расположен на частоте 0,707 МГц, в насыщенном состоянии песчаника пик сдвигается в сторону высоких частот и находится на частоте 0,862 МГц. На всех амплитудных значениях величина затухания в пике для насыщенного песчаника по сравнению с сухим песчаником возрастает.

Зависимость затухания продольной волны от величины амплитуды в сухом и насыщенном песчанике на трех частотных компонентах, расположенных вблизи доминантной частоты излучаемого импульса, показана на рис. 4. В сухом и насыщенном состоянии песчаника с увеличением амплитуды сигнала величина затухания нелинейно уменьшается. Уменьшение величины затухания для сухого песчаника составляет 4,5 %, а для насыщенного песчаника – около 9 %, т. е. в два раза больше. В обоих случаях после проведения полного амплитудного цикла ($A_{\min} = A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_{\max} = A_6 \rightarrow \dots \rightarrow A_1$) имеет место незамкнутый амплитудный гистерезис затухания. Это означает, что восходящая и нисходящая амплитудная ветви гистерезисной кривой не совпадают, а идут разными путями (показано стрелками на рис. 4). На кривой $Q_p^{-1}(\varepsilon)$ насыщенного песчаника в диапазоне деформаций $\varepsilon_3 - \varepsilon_4 = (1,0 - 1,3) \times 10^{-6}$ имеется участок значительного понижения крутизны кривой по сравнению с соседними участками (помечен на рис. 4 пунктирными линиями). Затухание продольной волны на этом участке деформаций можно считать амплитудно-независимым.

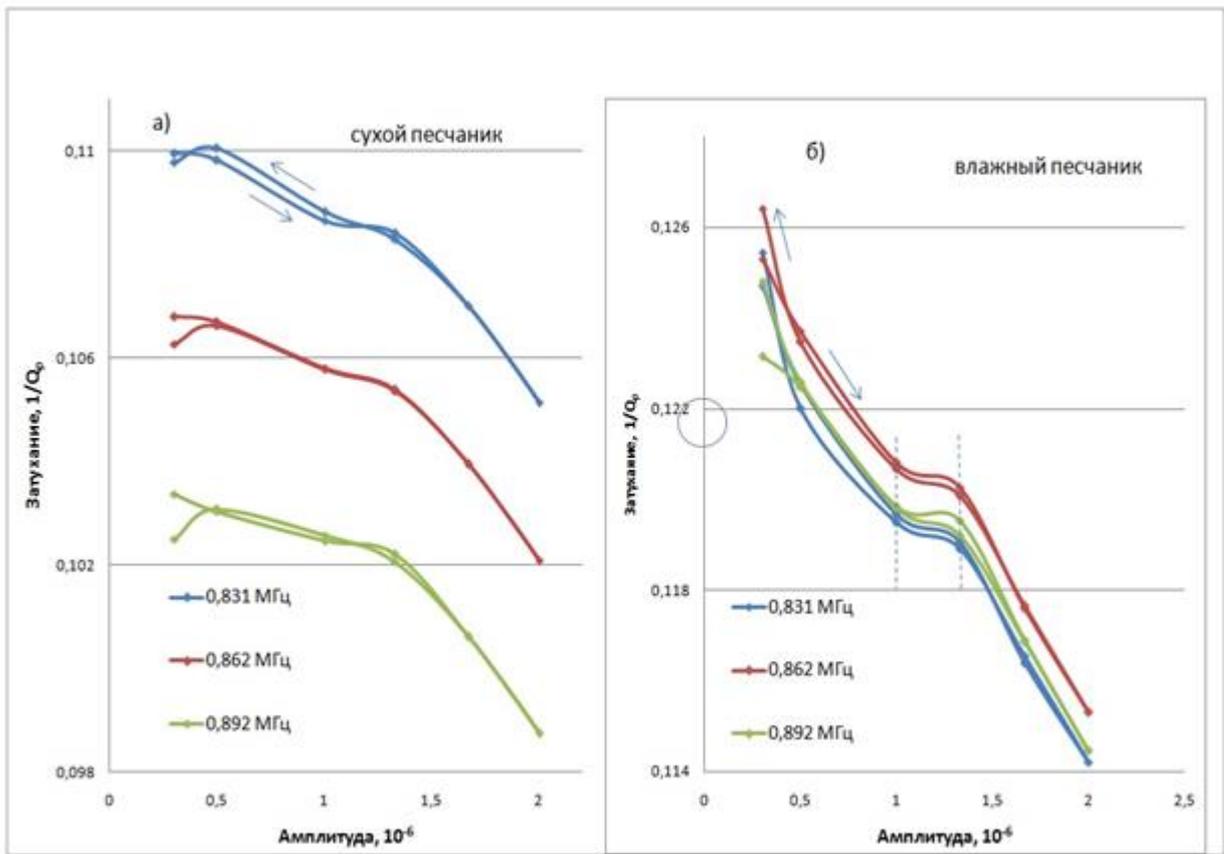


Рис. 4. Зависимость затухания Р-волны от величины амплитуды для трех частотных компонент, расположенных около доминантой частоты излучаемого импульса

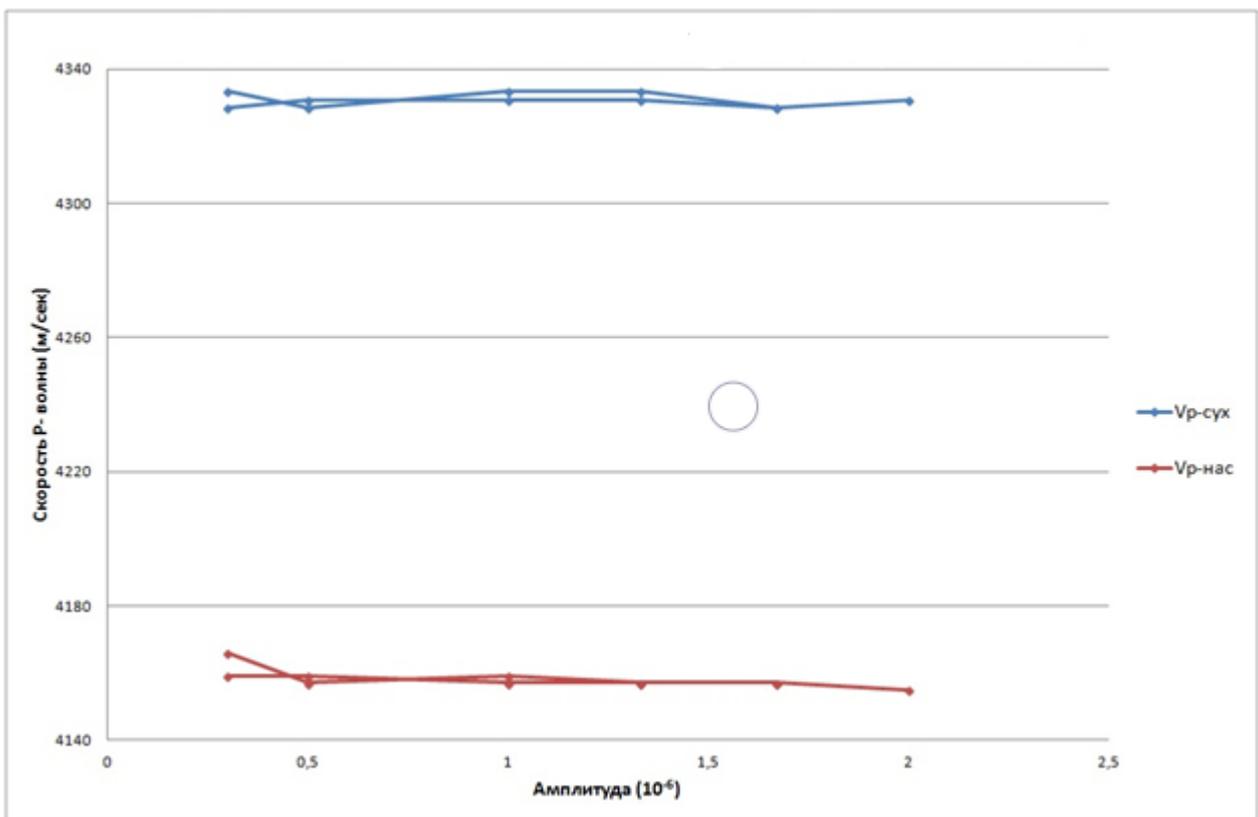


Рис. 5. Зависимость скорости Р-волны от величины амплитуды в сухом и насыщенном песчанике

Влияние амплитуды деформации на скорость продольной волны в сухом и насыщенном песчанике показано на рис. 5. Скорость продольной волны в сухом и насыщенном песчанике практически не зависит от амплитуды деформации, изменение скорости составляет около 0,1 % – 0,25 %, что находится в пределах точности измерения. Так как наши измерения являются относительными, то полученные данные имеют сравнительный характер. В изучаемом амплитудном диапазоне уменьшение скорости в насыщенном песчанике относительно скорости в сухом песчанике составляет 4 %. Можно также сказать, что затухание продольной волны в обоих песчаниках является более чувствительным к вариации амплитуды по сравнению со скоростью продольной волны.

Как известно, в процессе распространения упругих волн даже в однородной среде происходит искажение формы импульса за счет неидеальной упругости, например, микро-неоднородности и дефектности породы. Искажения могут быть макромасштабного характера, т. е. явно видимыми на сейсмической/акустической записи (см. рис. 1, б) и имеющие проявления на спектрах Фурье (рис. 2). Такие искажения на форме импульса входного сигнала отсутствуют (см. рис 1, а). Помимо обычно встречающихся искажений формы проходящего и отраженного импульса имеют место необычные искажения микромасштабного характера, которые предположительно обусловлены процессами дискретной неупругости [Mashinskii, 2012, 2014, 2016; Машинский, 2016].

Проявление нестандартной неупругости на сейсмической и акустической записи может быть обнаружено при использовании высокоразрешающей цифровой регистрации с микросекундным разрешением во времени. Рассмотрение несглаженных цифровых записей показывает, что отраженный сигнал имеет существенные осложнения прерывистого характера, в то время как входной сигнал является гладким, т. е. он свободен от каких-либо искажений. Это подтверждается повторными записями (\uparrow и \downarrow), полученными на одних и тех же величинах амплитуд. Осложнения имеют вид амплитудного плато, локального падения амплитуды и резкого уменьшения крутизны фронта импульса [Машинский, 2016]. Такие осложнения на отраженном сигнале могут быть на отдельных (непродолжительных) участках формы импульса или на значительном его протяжении. В нашем случае, неоднородные осложнения присутствуют на всех записях, полученных с различными по величине амплитудами. Повторные записи на одинаковых амплитудах ($A1\uparrow = A1\downarrow, \dots A6\uparrow = A6\downarrow$) показывают аналогичную картину осложнений.

Проявление прерывистой неупругости и ее влияние на изменение формы импульса в сухом и насыщенном песчанике можно видеть на рис. 6. Здесь представлены участки фронтов импульса шести восходящих амплитуд. Сравнение фронтов импульса, полученных для сухого и насыщенного состояния песчаника, показывает существенное различие в их поведении. Фронт импульса в сухом песчанике в этом интервале времени почти не имеет специфических осложнений, исключая некоторые изломы крутизны фронта на малой амплитуде. На записи, полученной в насыщенном песчанике, присутствуют все типы осложнений, указанных выше, на всех величинах амплитуд. На записи в сухом песчанике на всех величинах амплитуд крутизна фронта импульса больше крутизны фронта насыщенного песчаника. Уменьшение крутизны фронта насыщенного песчаника обусловлено эффектом прерывистой неупругости, т. е. наличием на фронте плато, участков спада амплитуды и локального уменьшения крутизны фронта. Особенно это касается участка фронта, помеченного пунктирным овалом, и фронта волны, зарегистрированного на малых амплитудах.

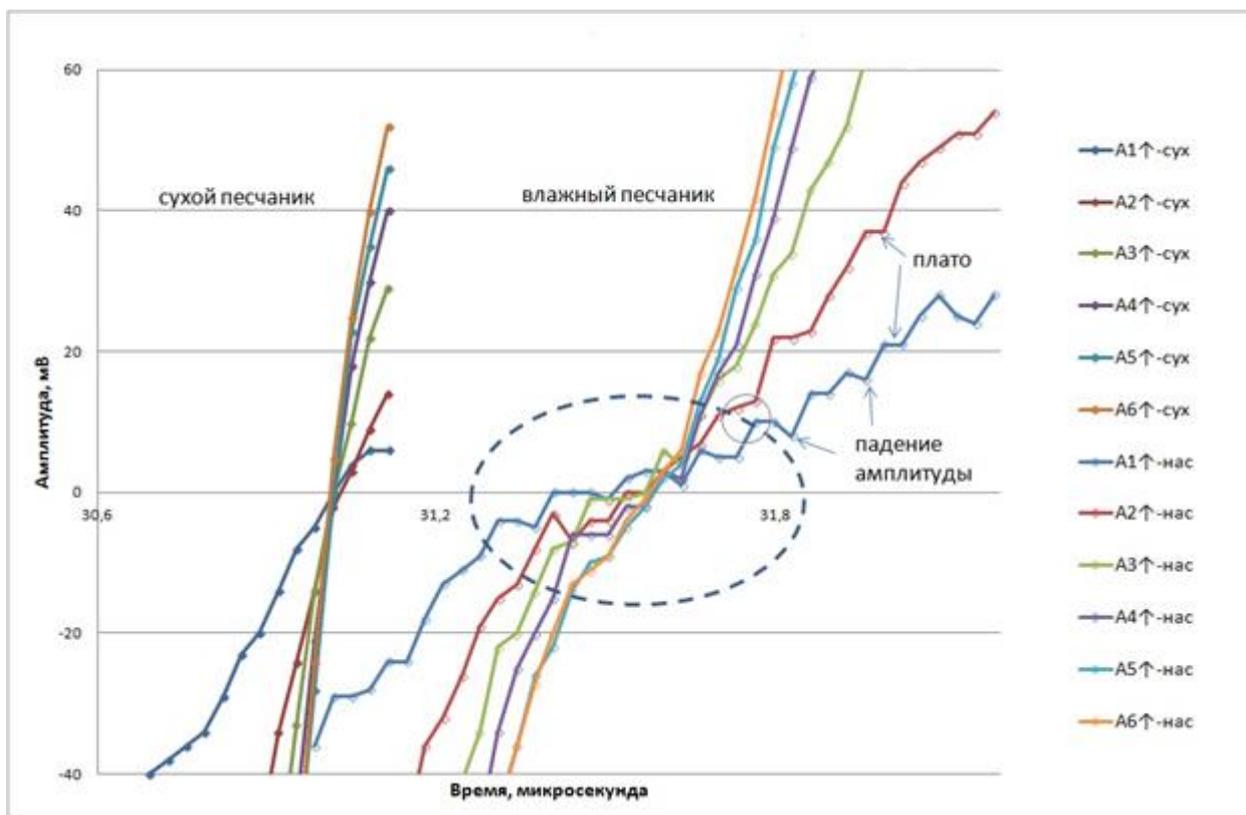


Рис. 6. Фронт отраженного импульса сухого и насыщенного песчаника на шести величинах амплитуды

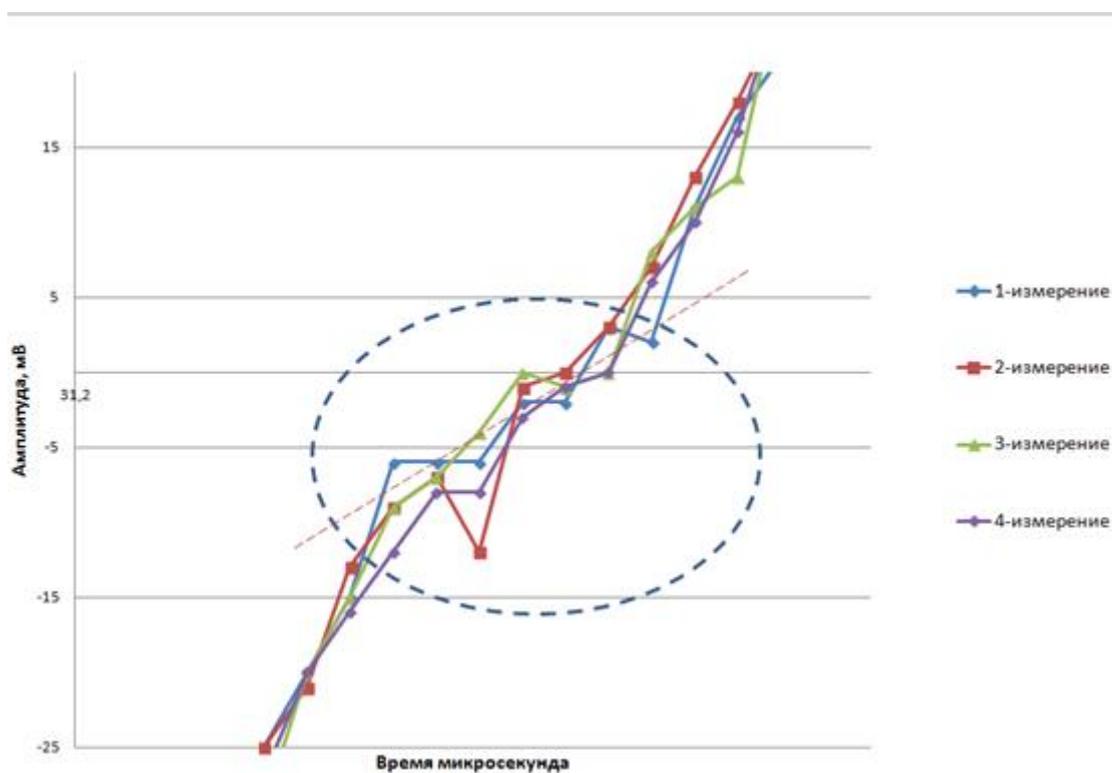


Рис. 7. Фронт импульса отраженной волны насыщенного песчаника на постоянной амплитуде, четыре последовательных измерения

Более подробно действие этого эффекта можно видеть на рис. 7, где представлен участок фронта отраженной волны насыщенного песчаника, зарегистрированного на постоянной амплитуде (A_4) в течение четырех последовательных измерений при тех же самых условиях. Сосредоточение на фронте импульса (участок, помеченный пунктирным овалом) отдельных плато, локального падения амплитуды и уменьшения крутизны в течение одного или нескольких $t_{\text{квант}} = 32,5$ нс приводит к затягиванию фронта импульса на этом участке и уменьшению его эффективной крутизны (красная пунктирная линия). Поведение фронта на временах выше и ниже пунктирного овала вполне можно считать «нормальным», по крайней мере, для используемого нами времени квантования $t_{\text{квант}}$.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В результате экспериментов изучены спектры затухания продольной отраженной волны в образцах сухого и водонасыщенного песчаника, находящегося под гидростатическим давлением 10 МПа. С целью обнаружения признаков прерывистой неупругости проведен анализ высокоразрешающей записи импульсов, используемых для построения спектров затухания. Сопоставляя разно-амплитудные спектры затухания сухого и влажного песчаника и принимая во внимание детальную картину волнового процесса в наносекундном масштабе, сделаны следующие выводы.

В исследуемом частотном диапазоне, как в сухом, так и насыщенном песчанике наблюдается пик затухания, но эти пики разнесены в области координат $Q_p^{-1} - f$. При насыщении образца пик затухания сужается, происходит его сдвиг в сторону высоких частот и увеличение дефекта модуля Δ_p (2). Влияние амплитуды состоит в изменении формы спектра затухания и величины дефекта модуля. Однако степень этого изменения зависит от состояния песчаника. Водонасыщение песчаника увеличивает воздействие амплитуды на параметр затухания. Установлено также, что параметр затухания продольной волны более чувствителен к вариации амплитуды, чем скорость продольной волны.

Наличие специфических осложнений на отраженном импульсе (и их отсутствие на первичном сигнале) предположительно отнесено к проявлениям дискретной неупругости. Экспериментальное и теоретическое подтверждение возможности таких проявлений как плато, спад амплитуды и локальное изменение крутизны фронта получено во многих работах [Баранникова и др., 2010; Головин и др., 2005; Песчанская и др., 2008; Baud et al., 2006; Машинский, 2016; Derlet, Maaf, 2013; Gurmani et al., 2011; Mashinskii, 2012, 2014, 2016].

Предполагается, что плато (ступеньки) и кратковременный спад амплитуды на акустической записи, определяют «излом» нормального курса амплитуды, который вызывает затягивание фронта волны и уменьшение его крутизны, что видно на рис. 6 и 7. Внезапное изменение величины амплитуды на отдельном участке фронта волны при неизменной частоте сигнала можно трактовать как локальное изменение скорости деформирования, при которой могут включаться различные источники микропластичности. В результате этого изменяется вклад микропластической неупругой компоненты в общую деформацию, что приводит к амплитудной зависимости затухания и других измеряемых параметров. Наличие специфических микроосложнений на импульсе, регистрируемых на акустической записи, могут отражать микроструктурные особенности и дефектность горной породы. Полученные данные могут быть полезными как в теории, так и для совершенствования методов сейсмических и акустических исследований в сейсмике.

ЛИТЕРАТУРА

- Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б.** О локализации пластической деформации при сжатии кристаллов LiF // *Физика твердого тела*. – 2010. – Т. 52, вып. 7. – С. 1291–1294.
- Воробьев Е.В., Анпилогова Т.В.** Моделирование процесса низкотемпературной деформации металлов // *Проблемы прочности*. – 2011. – № 1. – С. 109–121.
- Головин Ю.И., Дуб С.Н., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И.** Кинетические особенности деформации твердых тел в нано-микрообъемах // *Физика твердого тела*. – 2005. – Т. 47, вып. 6. – С. 961–973.
- Машинский Э.И., Кокшаров В.З., Нефедкин Ю.А.** Амплитуднозависимые эффекты в диапазоне малых сейсмических деформаций // *Геология и геофизика*. – 1999. – Т. 40, № 4. – С. 611–618.
- Машинский Э.И.** Амплитудно-зависимые эффекты при распространении продольной сейсмической волны в межскважинном пространстве // *Физика Земли*. – 2007. – Т. 43, № 8. – С. 683–690.
- Машинский Э.И.** Амплитудно-зависимое затухание продольных и поперечных волн в сухом и насыщенном песчанике под давлением // *Геология и геофизика*. – 2009. – Т. 50. – С. 950–956.
- Машинский Э.И., Голиков Н.А.** Затухание продольных и поперечных УЗ-волн в частично и полнонасыщенных песчаниках-коллекторах под давлением // *Технологии сейсморазведки*. – 2012. – № 4. – С. 22–28.
- Машинский Э.И.** Спектры затухания продольных и поперечных волн в песчанике и монокристаллах природного кварца // *Технологии сейсморазведки*. – 2016. – № 2. – С. 69–75.
- Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В.** Скачкообразная микродеформация наноструктурных металлов // *Физика твердого тела*. – 2008. – Т. 50, № 5. – С. 815–819.
- Экономов А.Н.** Влияние изменения микроструктуры поликристаллических металлов на их акустические свойства: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2002. – 143 с.
- Baud P., Vajdova V., Wong T.** Shear-enhanced compaction and strain localization: Inelastic deformation and constitutive modeling of four porous sandstones // *J. Geophys. Res.* – 2006. – Vol. 111 – P. B12401.
- Derlet P.M., Maaf R.** Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro-structural model // *Modelling and simulation in materials Science and engineering*. – 2013. – Vol. 21, No. 3. – P. 035007.
- Diallo M.S., Prasad M., Appel E.** Comparison between experimental results and theoretical predictions for P-wave velocity and attenuation at ultrasonic frequency // *Wave Motion*. – 2003. – Vol. 37. – P. 1–16.
- Dvorkin J., Nur A.** Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms // *Geophysics*. – 1993. – Vol. 58. – P. 524–533.
- Dvorkin J., Prasad M., Sakai A., Lavoie D.** Elasticity of marine sediments // *GRL*. – 1999. – Vol. 26. – P. 1781–1784.
- Dvorkin J., Walls J., Taner T., Derzhi N., Mavko G.** Attenuation at Patchy Saturation – A Model // *EAGE 65th Conference & Exhibition*. – 2003.
- Gurmani S.F., Jahn S., Brasse H., Schilling F.R.** Atomic scale view on partially molten rocks: Molecular dynamics simulations of melt-wetted olivine grain boundaries // *J. Geophys. Res.* – 2011. – Vol. 116, No. 12. – P. B12209.
- Jones S.M.** Velocity and quality factors of sedimentary rocks at low and high effective pressures // *Geophys. J. Int.* – 1995. – Vol. 123. – P. 774–780.
- Liu Chu-ming, Liu Zi-juan, Zhu Xiu-rong, Hu Bi-wen, Wang Rong, Wang Meng-jun.** Influence of isochronal heat treatment on damping behavior of AZ61 alloy // *J. Cent. South Univ. Technol.* – 2007. – Vol. 14, No. 3. – P. 315–318.

- Luo S.-N., Swadener J.G., Ma C., Tschauner O.** Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite // *Physica*. – 2007. – Vol. 399, No. 2. – P. 138–142.
- Mashinskii E.I.** Nonlinear amplitude-frequency characteristics of attenuation in rock under pressure // *J. Geophys. Eng.* – 2006. – No. 3. – P. 291–306.
- Mashinskii E.I.** Amplitude-frequency dependencies of wave attenuation in single-crystal quartz: experimental study // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. – P. B11304.
- Mashinskii E.I.** Microplasticity effect in low-velocity zone induced by seismic wave // *Journal of Applied Geophysics*. – 2012 – Vol. 83. – P. 90–95.
- Mashinskii E.I.** Elastic-microplastic nature of wave propagation in the weakly consolidated rock // *Journal of Applied Geophysics*. – 2014. – Vol. 101. – P. 11–19.
- Mashinskii E.I.** Dynamic microplasticity manifestation in consolidated sandstone in the acoustical frequency range // *Geophysical Prospecting*. – 2016. – Vol. 64. – P. 1588–1601.
- Mavko G.M., Mukerji T., Dvorkin J.** *Rock Physics Handbook*. – Cambridge University press, 1998. – 329 p.
- Mavko G., Dvorkin J.** P-wave attenuation in reservoir and non-reservoir rock // *EAGE 67th Conference & Exhibition* – Madrid, 2005.
- Olsson A.K., Austrell P-E.** A fitting procedure for viscoelastic-elastoplastic material models // *Proceedings of the Second European Conference on Constitutive Models for Rubber, Germany*. – 2001.
- Winkler K.W., Plona T.J.** Technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks under pressure // *J. Geophys. Res.* – 1982. – Vol. 87, B 13. – P. 10776–10780.
- Winkler K.W.** Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones // *J. Geophys. Res.* – 1983. – Vol. 88, B 11 – P. 9493–9499.
- Yin H., G. Zhang,** Nanoindentation behavior of muscovite subjected to repeated loading // *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*. – 2011. – Vol. 1 (2). – P. 72–83.
- Zaitsev V.Yu., Nazarov V.E., Talanov V.I.** Experimental Study of the self-action of seismoacoustic waves // *Acoustic Physics*. – 1999. – Vol. 45 (6). – P. 720–726.
- Zhou C., Biner S.B., LeSar R.** Discrete dislocation dynamics simulations of plasticity at small scales // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58. – P. 1565–1577.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

МАШИНСКИЙ Эдуард Иннокентьевич – доктор геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.