



СПЕКТРЫ ЗАТУХАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН В ПЕСЧАНИКЕ И МОНОКРИСТАЛЛАХ ПРИРОДНОГО КВАРЦА

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 результаты экспериментального изучения амплитудно-частотной зависимости затухания P - и S -волн в песчанике и монокристаллах природного кварца при гидростатическом давлении 10 МПа. Измерения проводились на образцах методом отраженных волн на частоте импульса 1 МГц в амплитудном диапазоне $\varepsilon \sim (0.3-2.0) \times 10^{-6}$. Спектры затухания P - и S -волн Q_P^{-1} , Q_S^{-1} в песчанике имеют вид релаксационного пика, который зависит от величины амплитуды импульса. Затухание с увеличением амплитуды уменьшается. Спектры затухания в целом (ненарушенном) кварце имеют вид зависимости Q_P^{-1} и $Q_S^{-1} \sim 1/f$, в нарушенном кварце для продольной волны имеется такая же зависимость, но для поперечной волны имеет место пик Q_S^{-1} . Обсуждается механизм нестандартной неупругости, который вносит искажения в форму импульса и влияет на спектры затухания. Установлено влияние характера специфических осложнений формы импульса на спектры затухания волн.

Неупругость, нелинейное соотношение напряжение/деформация, неупругие сейсмические параметры, релаксационные спектры, амплитудная зависимость скорости и затухания волн, локальная неупругость

ATTENUATION SPECTRA OF COMPRESSIONAL AND SHEAR WAVES IN SANDSTONE AND MONOCRYSTALS OF NATURAL QUARTZ

E.I. Mashinskii

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
Acad. Koptuyga prosp., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: mashinskiiEI@ipgg.sbras.ru*

The paper shows an experimental study of the amplitude-frequency dependence of P - and S -wave attenuation in sandstones and in natural quartz monocrystals under a hydrostatic pressure of 10 MPa. Measurements were conducted on samples with use of the reflected waves method at a pulse frequency of 1 MHz in the amplitude range $\varepsilon \sim (0.3-2.0) \times 10^{-6}$. The P -, S -waves attenuation spectrum, Q_P^{-1} , Q_S^{-1} , in sandstone presents the amplitude-dependent relaxation peak. The bigger the signal amplitudes – the lower attenuation is observed. The wave attenuation spectra (Q_P^{-1} , Q_S^{-1}) in intact quartz is close to $1/f$ dependence, in the fractured quartz for a Q_P^{-1} is close to the same dependence, but $Q_S^{-1}(f)$ has a peak. The mechanism of non-standard inelasticity that distorts a waveform and influences attenuation spectrum is discussed. The reflected signal with smaller disturbance results in the simpler spectrum, the peak spectrum form is observed when a specifically complicated pulse is the case.

Inelasticity, nonlinear stress/strain ratio, inelastic seismic parameters, relaxation spectra, amplitude dependence of wave velocity and attenuation, local inelasticity

ВВЕДЕНИЕ

Поиск эффективных индикаторов углеводородов, позволяющих дистанционными методами диагностировать коллекторы нефти и газа, является актуальной задачей. Современные подходы опираются на использование неупругих свойств горных пород, которые имеют разнообразные физические проявления. Это не только известные эффекты вязкоупругой природы [Mavko et al., 1998; Dvorkin et al., 2003], но и явления так называемой локальной или прерывистой неупругости [Песчанская и др., 2008; Mashinskii, 2012, 2014; Derlet, Maaf, 2013]. Такие индикаторы как, например, релаксационные спектры затухания (частотная зависимость затухания) продольных и поперечных волн сейчас находятся в стадии исследования [Машинский, 2009; Mavko, Dvorkin, 2005; 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) [Dvorkin, Nur, 1993; Dvorkin et al., 1999]. При распространении волны в упруго-вязкой среде возникает глобальный эффект Био, локальное течение или их комбинация. Эти процессы ответственны за волновое затухание и изменение величины упругого модуля в зависимости от частоты колебания в волне (частотная дисперсия) [Mavko, Dvorkin, 2005].

Частотная дисперсия упругого модуля (скорости волны) и декремента затухания (инверсной добротности) может указывать на величину и степень насыщения породы флюидом и вообще на ее дефектность.

В такой модели релаксированный и нерелаксированный модули связаны с дисперсией затухания. Характер релаксационного спектра затухания (РСЗ) и дисперсия упругого модуля определены моделью стандартного линейного тела и следующим выражением [Dvorkin et al., 2003]:

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

где ω – круговая частота, $\tau_r = 1 / 2\pi f_{\text{нук}}$ – релаксационное время ($f_{\text{нук}}$ – частота релаксационного максимума или критическая частота), Δ – релаксационная сила, зависящая от величины упругих модулей в низкочастотном и высокочастотном приближениях. Релаксационная сила определяет дефект упругого модуля:

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

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. В том случае, когда частоты распространяющегося сигнала и релаксационного пика совпадают, мы получаем максимальное затухание в пике:

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

Лабораторное изучение РСЗ в переменном амплитудно-частотном пространстве в условиях пластового давления показало новые возможности использования этого параметра для диагностики сухих и флюидонасыщенных пород. Обнаружены ранее не известные эффекты, связанные с влиянием амплитудного фактора на некоторые параметры РСЗ. Это сдвиг РСЗ продольных и поперечных волн по осям частот и инверсной добротности, изменение ширины релаксационного пика при изменении интенсивности излучаемого сигнала, остаточный гистерезис параметра затухания [Машинский, 2009; Машинский, Голиков, 2012; Mashinskii, 2006, 2008]. Наиболее перспективным параметром РСЗ для дифференциации породы по флюидонасыщению оказалось отношение ширины релаксационного пика к его частоте $\Delta f_{0,7} / f_{\text{нук}}$. Это отношение является амплитудно-зависимым в водонасыщенном песчанике и амплитудно-независимым в сухом песчанике. Относительное изменение ширины пика водонасыщенного и сухого песчаника $(\Delta f_{0,7} / f_{\text{нук}})_{\text{нас}} / (\Delta f_{0,7} / f_{\text{нук}})_{\text{сух}}$ при шестикратном изменении амплитуды импульса является весьма значительным (около 40 %). Параметр ширины пика РСЗ может быть дополнительным критерием для дифференциации песчаников по водонасыщению. При дальнейшем изучении этих и других эффектов могут быть получены новые диагностические признаки для решения прикладных задач акустического каротажа, сейсмической разведки.

Недавние исследования показали, что вязкоупругая модель может быть дополнена неупругим элементом прерывистого характера, который ответственен за амплитудную зависимость скоростей волн и затухания [Машинский, 2014; Mashinskii, 2012, 2014]. В статье представлены результаты экспериментального изучения релаксационных спектров затухания импульсного сигнала в образцах песчаника и монокристаллах ненарушенного и нарушенного природного кварца. Это

исследование представляет большой интерес для понимания микродеформационных механизмов в горных породах при распространении акустических и сейсмических волн.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образец мелкозернистого песчаника получен из керна, взятого с глубины 2560 м, образцы монокристаллов природного кварца вырезаны из друзы. Эксперимент проводился при гидростатическом давлении 10 МПа и комнатной температуре. Размеры всех образцов одинаковые и они имеют цилиндрическую форму диаметром 4 см и 1.6 см в длину. Кварц был взят как наиболее “простой” природный материал, и потому что он является главным компонентом в составе пород нефтегазового резервуара. Знание его неупругих характеристик дает лучшее понимание поведения более сложных материалов. Ненарушенный образец монокристалла не содержит зерен, в нем имеются свободные дислокации и неоднородности в виде пор и включений. Нарушенный кварц содержит неоднородности в виде мелких трещин, относительно равномерно расположенных по всему объему.

Экспериментальная установка является стандартной для такого рода исследований и применяется во многих работах [Winkler, 1983; Jones, 1995; Mashinskii, 2006]. Это трехслойная 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 комбинацией парой источник–приемник.

Декремент затухания вычислялся, используя соотношение [Winkler, 1983]

$$Q^{-1} = \alpha V / 8.686\pi f = \alpha\lambda / 8.686\pi,$$

где α – коэффициент поглощения, дБ/м; V – фазовая скорость, м/с; и f – частота, Гц. Величина α вычисляется, используя соотношение [Winkler, Plona, 1982]

$$\alpha(\omega) = \frac{8.686}{L} \ln \left[\frac{|R_{23}| A_{\text{top}}(f)}{|R_{12}| A_{\text{bot}}(f)} (1 - R_{12}^2(f)) \right],$$

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

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

где ρ_r и ρ_b – плотность породы и бериллиевой бронзы, кг/м³, соответственно; $V_r(f)$ и $V_b(f)$ – скорости волны, м/с.

Измерение декремента затухания проводилось на различных амплитудах, величины которых изменялись по замкнутому циклу. Амплитуда импульса дискретно увеличивалась от минимальной величины до макси-

мальной, а затем обратно уменьшалась до исходной величины: $A_{\min} = A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_{\max} = A_6 \rightarrow A_1$ (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.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ акустических записей проводился как в обычном аналоговом виде, так и с использованием цифрового высокоразрешающего отображения сигнала в увеличенном масштабе. Отображение получено соединением всех точек квантования ($t_{\text{квант}}$) цифровых амплитудных значений на трассе прямолинейными отрезками (без сглаживания). Представление сигналов в таком виде позволяет детально рассмотреть динамический процесс в породе с разрешением во времени в один квант, $t_{\text{квант}} = 32.5$ нс. Таким образом, можно обнаружить различные искажения формы волны в течение времени, которые, как ожидается, могут быть связаны с проявлениями локальной (прерывистой) неупругости. Иллюстрации приведены как в аналоговом, так и цифровом отображении.

Результаты

Релаксационные спектры затухания продольной и поперечной волны в песчанике представлены на рис. 1. В исследуемом диапазоне частот при излучении сигнала с амплитудами A1–A6 спектры затухания P-волны имеют вид пика на частоте около 1.015 МГц с последующим минимумом. Увеличение амплитуды до максимальной величины A6 вызывает сдвиг пика в высокочастотную область до $f = 1.046$ МГц. При этом в

диапазоне амплитуд величина затухания в пике уменьшается на $\sim 9\%$. Спектр затухания S-волны имеет также пик на $f = 0.954-0.987$ МГц и минимум в низкочастотной области спектра. Уменьшение затухания на пике S-волны с увеличением амплитуды в том же самом диапазоне составляет 4% .

Для установления проявлений нестандартной неупругости записи импульсов были изучены в крупномасштабном цифровом отображении. На рис. 2 показаны входной сигнал (см. рис. 2, а) и отраженный сигнал (см. рис. 2, б) P-волны в песчанике. Входной сигнал имеет гладкий характер, т. е. он свободен от каких-либо искажений. Это подтверждается повторными записями, полученными на одних и тех же величинах амплитуды в ходе восходящего и нисходящего измерения. В отличие от первичного импульса отраженный сигнал отягощен различными осложнениями на всем своем протяжении. Неоднородные осложнения присутствуют на всех записях, полученных с разными амплитудами. Повторные записи на одинаковых амплитудах (см. амплитуды $A1\uparrow = A1\downarrow, \dots, A5\uparrow = A5\downarrow$ на рис. 2) показывают аналогичную картину осложнений.

Детальное поведение обнаруженных осложнений хорошо видно на цифровой записи в увеличенном масштабе. Для примера на рис. 3 представлен фрагмент импульса S-волны в песчанике, где имеются все признаки проявления локальной неупругости. Здесь представлены три типа таких проявлений. Это амплитудные плато (ступеньки), которые означают кратковременную остановку амплитудного курса. Следующее проявление – это резкое изменение “нормального” курса амплитуды на противоположный. При этом на возрастающем фронте импульса происходит кратковременный спад (уменьшение) амплитуды или на его падающем фронте возникает кратковременное возрастание амплитуды. Некоторые вышеуказанные проявления помечены стрелками на рис. 3. К третьему типу проявлений относится часто встречающееся резкое изменение крутизны фронта (его наклона) на коротком проме-

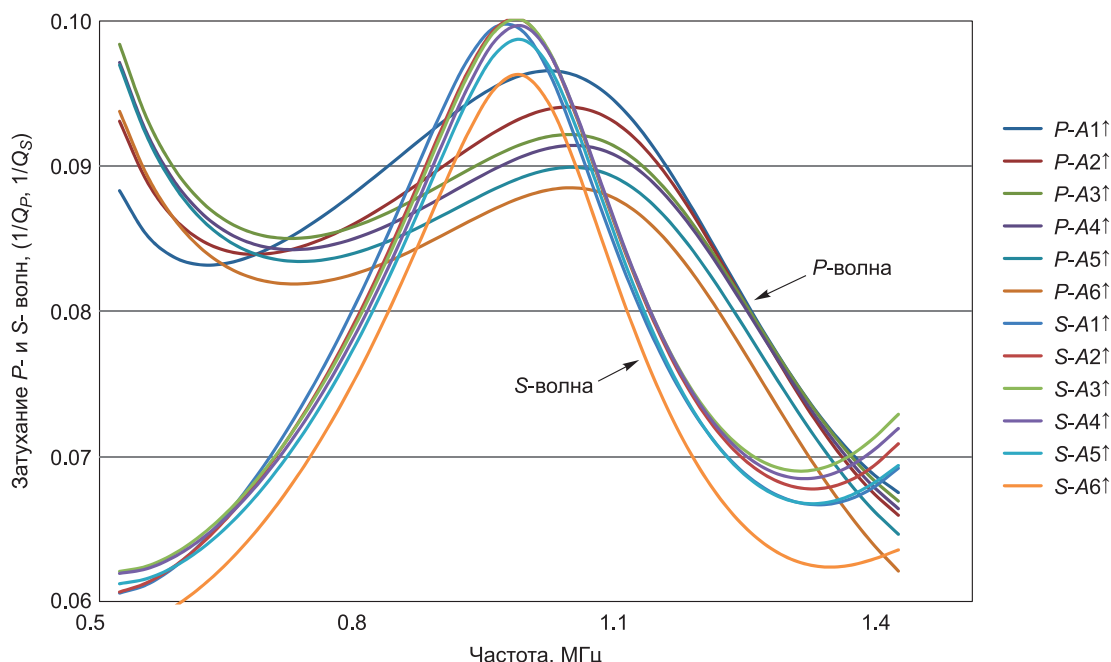


Рис. 1. Релаксационные спектры затухания P- и S-волн в песчанике. Здесь и на рис. 2–7 восходящий и нисходящий ход амплитуды показан в легенде стрелками “вверх” и “вниз” соответственно.

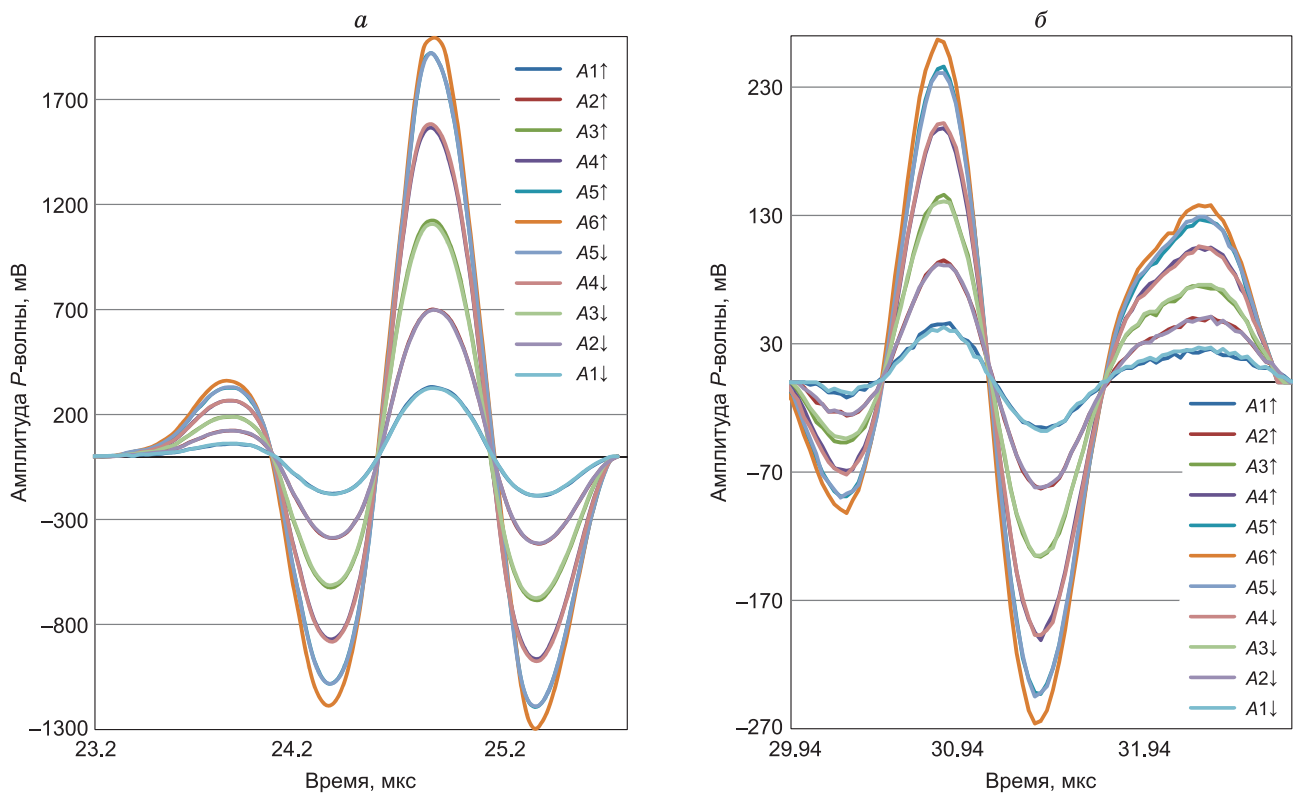


Рис. 2. Входной падающий (а) и отраженный (б) сигналы P -волны в песчанике на шести восходящих и нисходящих величинах амплитуд.

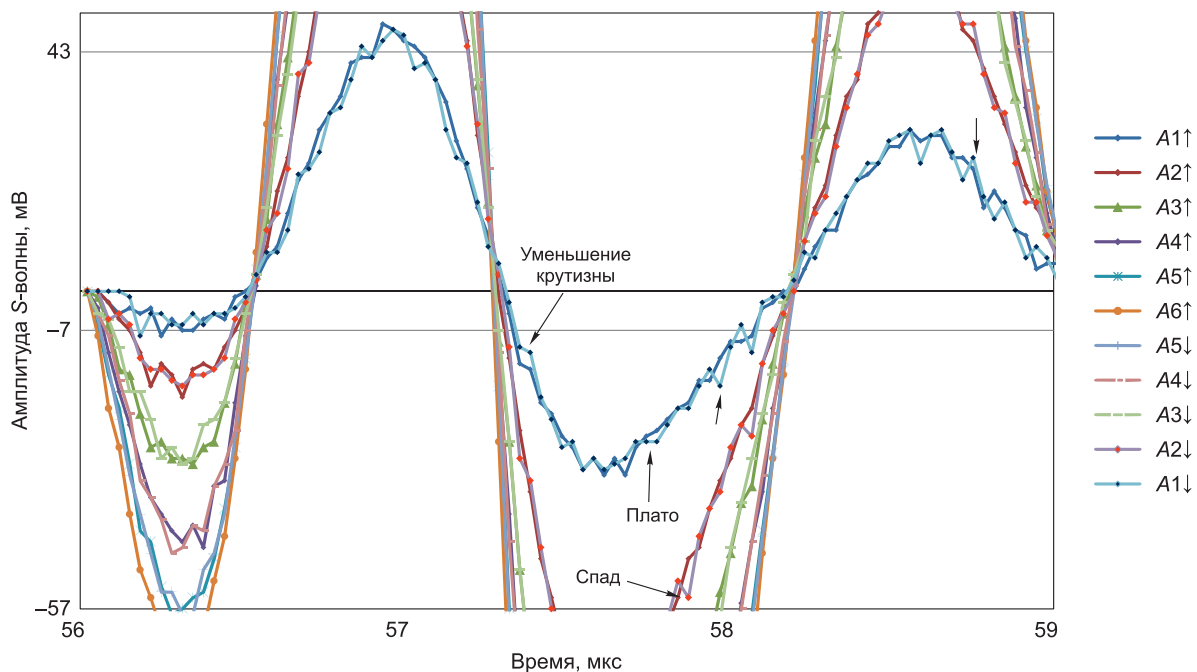


Рис. 3. Фрагмент импульса S -волны в песчанике на восходящих и нисходящих амплитудах с признаками проявления локальной неупругости.

жутке времени. Величина такой локальной “микрорезонанса” по сравнению с предыдущей и/или последующей величиной может отличаться на порядок и более.

Изучение поведения монокристалла кварца, используя выше описанный подход, может дать полезную

информацию о механизме распространения акустических волн в реальных средах, учитывая факт глобального распространения кварца в горных породах. Спектры затухания P - и S -волн ненарушенного, целого (intact) кварца, полученные на различных величинах амплитуд, показаны на рис. 4. Спектры имеют вид простых моно-

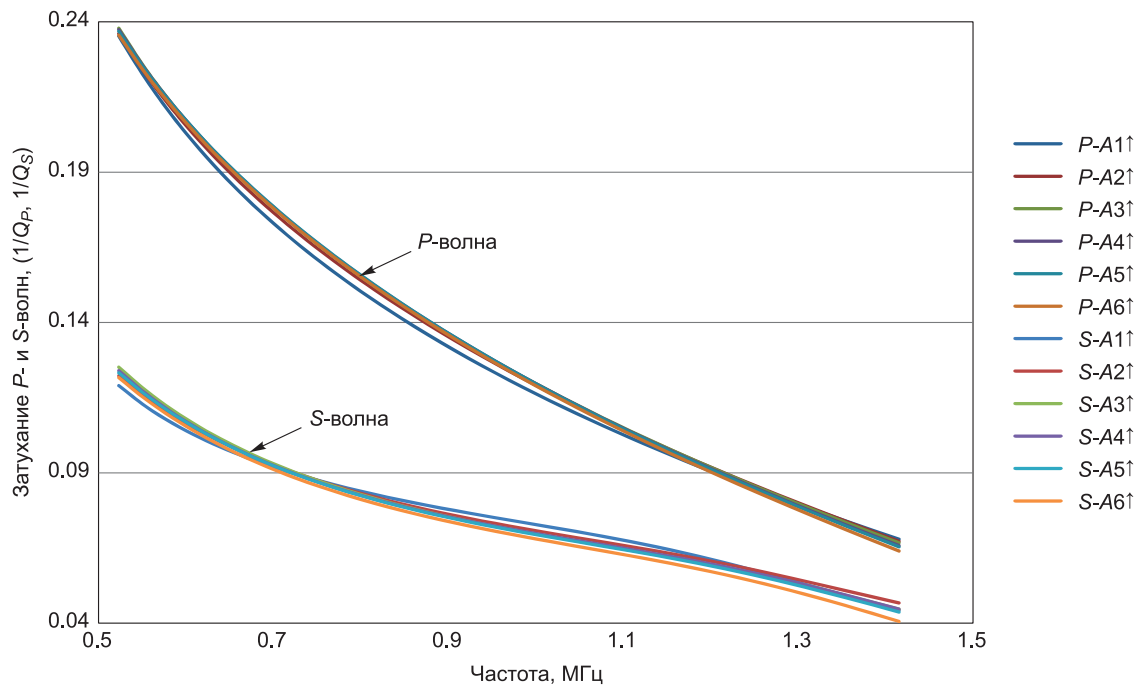


Рис. 4. Спектры затухания P - и S -волн целого (intact) кварца на шести восходящих величинах амплитуд.

тонных кривых, $Q_P^{-1}, Q_S^{-1} \sim 1/f$. Затухание поперечной волны меньше, чем продольной волны в этом диапазоне частот. Изменение величины затухания с амплитудой не превышает 3 %.

Спектры затухания P - и S -волн нарушенного кварца, полученные на шести величинах амплитуд, представлены на рис. 5. Эти спектры затухания в отличие от ненарушенного кварца имеют более сложный характер. Форма спектра затухания P -волны близка к форме спектра ненарушенного кварца, однако при вариации величины амплитуды наблюдается “веерное” расхождение кривых в низкочастотной области. Спект-

ры затухания S -волны нарушенного кварца имеют релаксационный пик на всех амплитудах, т. е. близки по форме к спектрам затухания песчаника. Максимум спектра затухания нарушенного кварца расположен на частоте около 0.8 МГц. Можно заметить второй слабый максимум, расположенный в районе частоты $f = 1.23$ МГц. При изменении величины амплитуды от $A1$ до $A6$ уменьшение затухания на пике составляет 6 %. Цифровое отображение S -волны представлено на рис. 6. Форма волны в значительной степени искажена необычными осложнениями, характер которых аналогичен описанным выше проявлениям в песчанике.

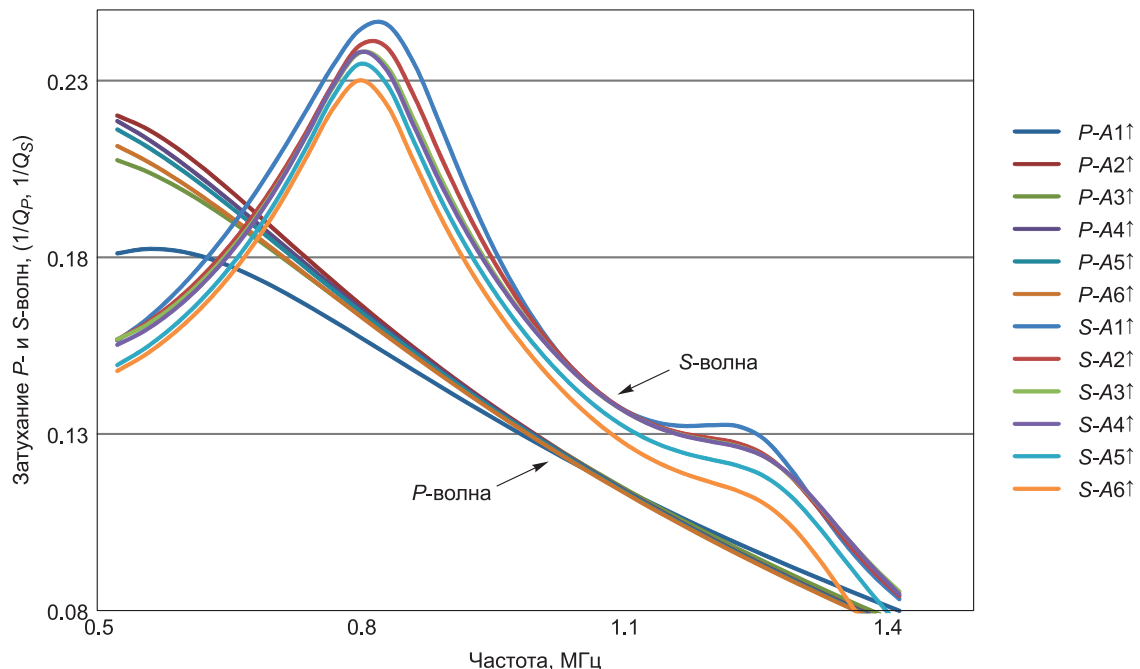


Рис. 5. Спектры затухания P - и S -волн нарушенного кварца на шести восходящих величинах амплитуд.

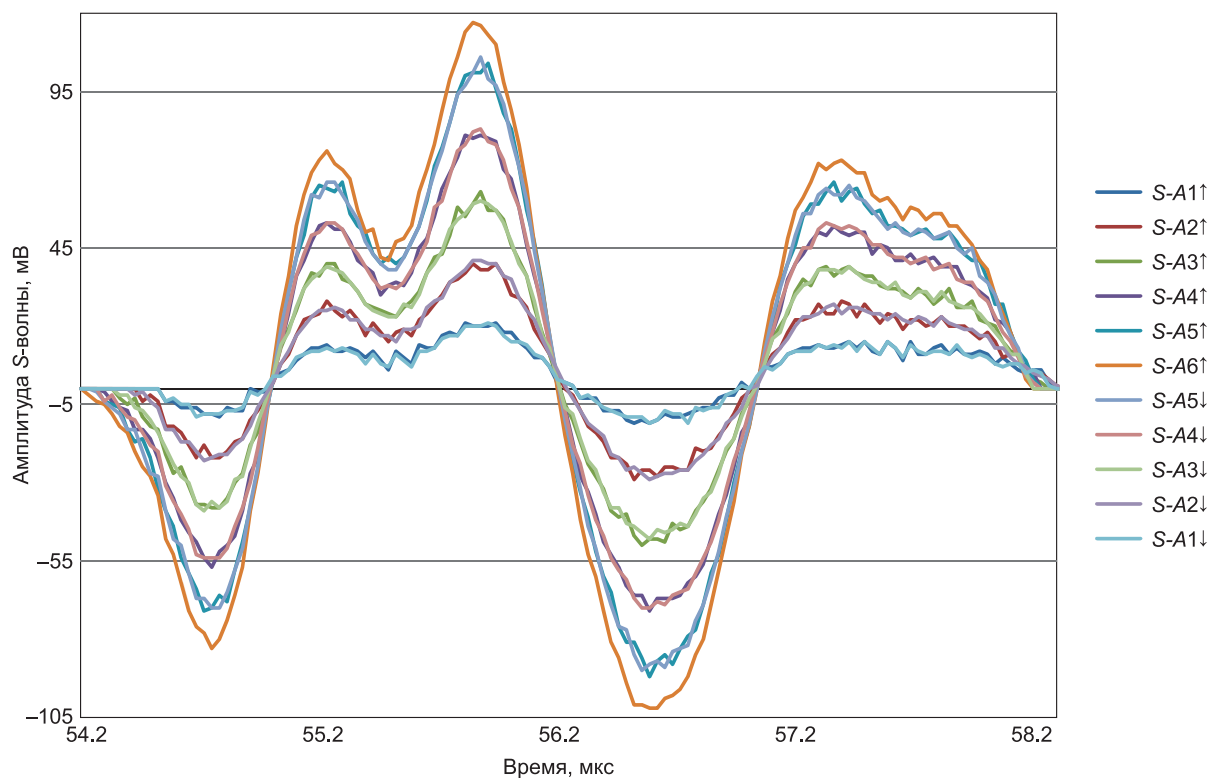


Рис. 6. Цифровое отображение S -волны нарушенного кварца на шести восходящих и нисходящих величинах амплитуд.

Обсуждение и выводы

В результате экспериментов получены релаксационные спектры затухания P - и S -волн для образцов песчаника и монокристаллов природного кварца. Анализ высокоразрешающей записи отраженных импульсов, используемых для построения спектров затухания, проведен с целью обнаружения признаков локальной неупругости. Сопоставление формы спектров затуха-

ния P - и S -волн в песчанике и кварце с развернутой картиной волнового процесса в наносекундном масштабе позволяет сделать следующие выводы.

Входной (первичный) сигнал во всех случаях “чистый”, форма импульса не искажена и совершенно отсутствуют какие-либо осложнения. Отраженные сигналы во всех образцах в той или иной степени подвержены осложнениям определенного характера. Они

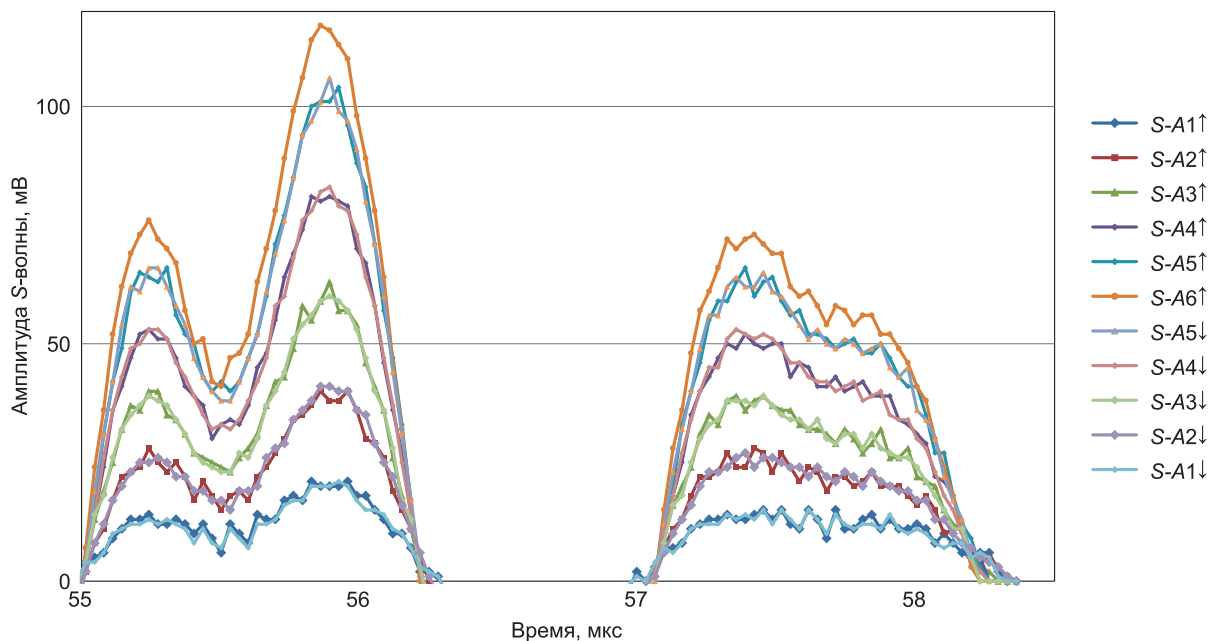


Рис. 7. Фрагмент отраженного импульса S -волны нарушенного кварца на шести восходящих и нисходящих величинах амплитуд в увеличенном масштабе.

предположительно отнесены к проявлению локальной неупругости. Имеются работы, в которых экспериментально и теоретически обнаружены такие проявления как плато, спад амплитуды и локальное изменение крутизны фронта [Песчанская и др., 2008; Баранникова и др., 2010; Машинский, 2014; Derlet, Maaf, 2013; Mashinskii, 2012, 2014]. Более подробную картину этого эффекта можно видеть на рис. 7, где представлен фрагмент отраженного импульса S -волны нарушенного кварца. Наши результаты полностью соответствуют данным, описанным в вышеприведенных работах.

Различие в поведении целого и нарушенного кварца можно установить по спектрам затухания S -волны. В нарушенном кварце в отличие от целого имеется релаксационный пик. Наличие последнего указывает на сложность или разнообразие дефектов. Величина затухания на пиковой частоте в нарушенном кварце превышает аналогичную величину в целом кварце в три раза. В низкочастотной области спектра соотношение между величинами затухания в этих образцах изменяется на обратное. Качественное сравнение формы волны целого и нарушенного кварца показывает, что импульс последнего осложнен в большей степени. Это косвенно указывает на связь дефектности материала с формой спектра затухания. Просматривается также влияние амплитудного фактора на динамику осложнений и, соответственно, на характеристики спектра затухания, что требует дальнейшего изучения. Отмечена большая чувствительность S -волны по сравнению с P -волной к дефектам микроструктуры.

Выдвинуто важное предположение о том, что поглощение волн в горных породах с мономинеральными кварцевыми зёрнами определяется не только межзёрнными дефектами, но также обусловлено в немалой степени процессами, происходящими непосредственно в монокристаллических зёрнах.

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.
- 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. Проявления динамической микропластичности при распространении продольной волны в горной породе // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 2. С. 31–40.
- Машинский Э.И., Голиков Н.А. Затухание продольных и поперечных U_3 волн в полно и частично газо- и водонасыщенных песчаниках-коллекторах под давлением // Технологии сейсморазведки. 2012. № 4. С. 22–28.
- Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В. Скачкообразная микродеформация в наноструктурных материалах // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, № 5. С. 815–819.
- Derlet P.M., Maaf R. Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 2013. DOI: 10.1088/0965-0393/21/3/035007.
- Dvorkin J., Nur A. Dynamic poroelasticity: A unified model with the squirt and the Biot mechanisms // Geophysics. 1993. V 58. P. 524–533.
- Dvorkin J., Prasad M., Sakai A., Lavoie D. Elasticity of marine sediments // Geophys. Res. Lett. 1999. N 26. P. 1781–1784.
- Dvorkin J., Walls J., Taner T., Derzhi N., Mavko G. Attenuation at Patchy Saturation – A Model // 65th EAGE Conference & Exhibition (2–5 June 2003). Stavanger, Norway, 2003.
- Jones S.M. Velocity and quality factors of sedimentary rocks at low and high effective pressures // Geophys. J. Int. 1995. N 123. P. 774–780.
- Mashinskii E.I. Nonlinear amplitude-frequency characteristics of attenuation in rock under pressure // J. Geophys. Eng. 2006. N 3. P. 291–306.
- Mashinskii E.I. Amplitude-frequency dependencies of wave attenuation in single-crystal quartz: experimental study // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. P. B11304.
- Mashinskii E.I. Microplasticity effect in low-velocity zone induced by seismic wave // J. App. Geophys. 2012. V. 83. P. 90–95.
- Mashinskii E.I. Elastic–microplastic nature of wave propagation in the weakly consolidated rock // J. App. Geophys. 2014. V. 101. P. 11–19.
- 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 // 67th EAGE Conference & Exhibition. (13–16 June 2005). Madrid, Spain, 2005.
- Winkler K.W., Plona T.J. Technique for measuring ultrasonic velocity and attenuation spectra in rocks under pressure // J. Geophys. Res. 1982. V. 87, N B 3. P. 10776–10780.
- Winkler K.W. Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones // J. Geophys. Res. 1983. V. 88, N B11. P. 9493–9499.

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2016 г.,
в окончательном варианте – 12 мая 2016 г.

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

МАШИНСКИЙ Эдуард Иннокентьевич – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

E-mail: mashinskiiei@ipgg.sbras.ru, тел.: 8(383) 330-53-75