



## СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-36>

УДК 550.834

**Влияние амплитуды деформации и всестороннего давления на скорость и затухание *P*- и *S*-волн в сухом и водонасыщенном песчанике: экспериментальное исследование**Э. И. Машинский   *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация* *MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru***Аннотация**

В физике горных пород большое внимание уделяется изучению процессов деформирования природных материалов на малых деформациях. Эксперименты проводятся с помощью высокоточных измерений, которые позволяют получить новые знания на микро/нано уровне. Микропластичность твердых тел изучают в материаловедении, но имеются также данные, полученные для некоторых горных пород. Свойство микро-пластичности природных материалов пока мало изучено. Исследование проводилось на образцах пород. Изучено влияние амплитуды деформации и всестороннего давления на скорость и затухание *P*- и *S*-волн в сухом и водонасыщенном песчанике. Использовался метод отраженных волн в диапазоне частот (0,5–1,4) МГц при четырех амплитудах деформации  $(0,5–1,67) \cdot 10^{-6}$ . Циклическое изменение амплитуды вызывает эффект открытого и закрытого гистерезиса для скорости волны и затухания. Это наблюдается как для сухого, так и водонасыщенного состояния песчаника. В обоих состояниях имеет место перехлест петель гистерезиса. Амплитудное изменение скорости *P*-волны в сухом песчанике составляет 1,12 %, а для затухания *P*-волны в сухом песчанике – 5,43 %. На *S*-волне максимальное затухание в сухом песчанике достигает 8,81 %. Поведение скорости и затухания волны можно объяснить совместным действием процессов вязко-упругости и микро-пластичности. Упругопластический переход сильно зависит от деталей микроструктуры, ее дефектности и других параметров. Характеристики осложнений параметров волн могут являться признаками внутреннего строения исследуемого объекта.

**Ключевые слова**

физика горных пород, амплитудно-зависимые скорость волны и затухание, открытый гистерезис скорости и затухания волны, влияние водонасыщения на скорость волны и затухание, микропластическая деформация, скачкообразная неупругость, упругий модуль

**Благодарности**

Работа выполнялась в рамках проекта НИР «Механизмы воздействия природных и техногенных факторов на процессы в геосферах по результатам мониторинга естественных геофизических полей». Номер проекта в ИСГЗ Минобрнауки FWZZ-2022-0019.

**Для цитирования**

Mashinskii E. I. Effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation of *P* and *S* waves in dry and water-saturated sandstone: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):22–29. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-36>

## MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

**Effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation of *P* and *S* waves in dry and water-saturated sandstone: an experimental study**E. I. Mashinskii   *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation* *MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru***Abstract**

In rock physics, much attention has been paid to the study of the processes of strain of natural materials at small strains. Experiments using high-precision measurements have allowed new knowledge at micro/nano level to be acquired. The microplasticity of solids is studied in materials science, but there is



also data regarding some rocks. The property of microplasticity of natural materials is still little studied. The study was carried out on rock samples. The effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation of  $P$  and  $S$  waves in dry and water-saturated sandstone has been studied. The method of reflected waves was used in the frequency range of 0.5–1.4 MHz at four strain amplitudes  $(0.5–1.67) \cdot 10^{-6}$ . Amplitude cycling causes an open and closed hysteresis effect for wave velocity and attenuation. This has been observed for both dry and water-saturated sandstone. The hysteresis loop overlaps in both states. The amplitude changes in the velocity of  $P$ -wave in dry sandstone is 1.12 %, and the attenuation of  $P$ -wave in dry sandstone is 5.43 %. As for  $S$ -wave, its maximum attenuation in dry sandstone reaches 8.81 %. The behavior of a wave velocity and attenuation can be explained by the combined effect of viscoelasticity and microplasticity. Elastoplastic transition strongly depends on the details of the microstructure, its defectiveness, and other parameters. The characteristics of the complications of wave parameters can be the signs of the internal structure of the subject.

#### Keywords

rock physics, amplitude-dependent wave velocity and attenuation, open hysteresis of wave velocity and attenuation, effect of water saturation on wave velocity and attenuation, microplastic strain, stepwise inelasticity, elastic modulus

#### Acknowledgments

The study was carried out within the framework of the research project “Mechanisms of the impact of natural and man-made factors on processes in the geospheres based on the results of monitoring natural geophysical fields”. Project number FWZZ-2022-0019 in the ISGZ of Ministry of Education and Science.

#### For citation

Mashinskii E. I. Effect of strain amplitude and confining pressure on the velocity and attenuation of  $P$  and  $S$  waves in dry and water-saturated sandstone: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):22–29. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-12-36>

### Введение и постановка проблемы

В современном развитии наук о Земле повышение геологической эффективности сейсмических и акустических методов опирается на новые фундаментальные знания в физике деформирования горных пород. О механизме деформации природных материалов при различных нагрузках получены новые знания. Это неупругие скачкообразные, прерывистые деформации, регистрируемые на микро/нано уровне. Малоизвестное в геофизике свойство микропластичности горных пород может проявляться при малых и даже очень малых деформациях. Учет этого фактора важен для практики, так как сейсмические и акустические методы используют диапазон малых деформаций. Интерес к этому эффекту проявился в результате предыдущих исследований. Изучение нелинейности в сейсмике привело к необходимости глубокого понимания физики деформирования пород [1–3]. Была подтверждена возможность нелинейности при очень малых деформациях, что расширило границы действия неупругих процессов [4, 5]. Теоретические исследования в сейсмике совершенствуют классическую вязкоупругую модель стандартного тела. Модель хорошо описывает дисперсию, релаксацию и связанные с нею неупругие процессы.

Теоретические и эксперименты исследования подтверждают наличие эффекта микропластичности [6, 7]. Влияние амплитуды деформации на скорость волны и затухание неоднозначно, так как приводит в одном случае к увеличению параметров, в другом – к уменьшению. Таким же образом изменяется модуль упругости, что влияет на кривизну соотношения «напряжение–деформация» [8, 9]. Такое нестандартное поведение пород обусловлено совместным действием упругой и микропластической деформации [10, 11].

На диаграмме «напряжение–деформация» и на записи акустического сигнала этот эффект представлен в виде «стресс-плато» и «стресс-падение» [12, 13]. Свойство микропластичности пород допускает нерегулярное кратковременное «включение» процесса пластичности с одновременным действием упругой деформации. Имеются также теоретические подтверждения [14–16]. Механические свойства горных пород в большей степени различаются по их неупругим характеристикам. Они больше связаны с динамическими параметрами волн, чем с упругими характеристиками. Современный подход предполагает использование новых данных, которые могут быть использованы для решения геологических задач. Это подтверждают высокоточные экспериментальные и теоретические исследования [17, 18].

Исследования в физике твердого тела показали, что вязкоупругая модель может быть дополнена неупругим элементом прерывистого характера, участвующим в процессе деформирования. Упруго-вязкопластическая модель с участием пластической составляющей способна представлять амплитудно-частотно-зависимый динамический модуль. В этой модели общий тензор напряжения определен суммой трех компонент – упругого, упругопластического и вязкоупругого модулей материала [19–21]. В физике твердого тела и материаловедении большое внимание уделяется исследованию скачкообразной деформации [22–24]. Имеет место резкий переход от упругого деформирования к пластическому течению. Такой скачок деформации сопровождается падением напряжения и сложным образом зависит от свойств материала и условий его нагружения [25, 26]. Развитие механической модели геологической среды базируется на учете данных, полученных о прерывистой неупругости. Некоторые



данные для горных пород (песчаник, суглинки, кварц, кремний, мусковит, стишовит, слюда, сапфир, диорит, графит) описаны в работах [27, 28].

В этой статье описывается лабораторное исследование влияния амплитуды деформации и давления на поведение скорости и затухания продольной и поперечной волны в сухом и водонасыщенном песчанике при комнатной температуре. Это исследование представляет большой интерес для понимания микро-деформационных механизмов в горных породах. Механизм микропластичности горных пород пока мало изучен, но есть основания утверждать, что он близок к механизму, известному в физике твердого тела. Микропластическое поведение происходит при активизации подвижных дислокаций в виде лавинного явления. Первым признаком этого процесса является появление эффекта «стресс-плато» и «стресс-падение». Результаты, полученные в этом эксперименте, могут быть полезны не только как фундаментальные знания, но также для их применения в решении практических задач. Новые знания о свойстве микро-пластичности горных пород позволяют усовершенствовать стандартную вязкоупругую модель, используемую в сейсмических исследованиях. Это может быть достигнуто включением в стандартную модель компоненту микропластической деформации. Комплексная вязко-упруго-пластическая модель может более реалистично описывать процессы деформации в горных породах. При практическом применении полученных знаний, например, в сейсмике и акустике необходимо учитывать амплитудно-зависимый эффект, который влияет на скорость и затухание продольных и поперечных волн в горных породах. Учет этого эффекта повышает точность измерения и интерпретацию полученных данных.

### Методики исследования и фактический материал

В эксперименте были использованы образцы мелкозернистого песчаника из керна, взятого с глубины 2545 м. Плотность песчаника  $2,45 \text{ г/см}^3$ , содержание мелкозернистой песчаной фракции 82 % и алевролита 18 %, общая пористость 12 %. Измерение скорости и затухания  $P$ -,  $S$ -волны в зависимости от величины амплитуды деформации проводилось при постоянном гидростатическом давлении 20 МПа. Кроме того, на постоянной амплитуде было изучено поведение скорости  $P$ -,  $S$ -волны в зависимости от величины гидростатического давления в диапазоне от 10 до 50 МПа. Образцы цилиндрической формы имеют размеры: 40 мм в диаметре и 16 мм в длину. Использовалась стандартная установка в виде трехслойной модели [29, 30]. Первый и третий слои (бериллиевая бронза) обеспечивают идентичное отражение волны на границах раздела. Первый слой – линия задержки, а третий слой – акустическая нагрузка. Образец породы располагается между этими слоями. Возбуждение и прием акустических сигналов обеспечивают пьезокерамические датчики на частоте 1 МГц, которые поляризованы на продольную и поперечную волны. Декремент затухания вычислялся как [11, 31, 32]:

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

где  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $\text{дБ} \cdot \text{м}^{-1}$ ,

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

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;  $R_{23}(f)$  – коэффициент отражения от нижней границы. В нашем случае границы являются идентичными и поэтому  $R_{12}(f) = -R_{23}(f)$ . Коэффициент отражения

$$R(f) = \frac{\rho_r V_r(f) - \rho_b V_b(f)}{\rho_r V_r(f) + \rho_b V_b(f)}, \quad (3)$$

где  $\rho_r$  и  $\rho_b$  – плотность породы и бериллиевой бронзы,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ , соответственно;  $V_r(f)$  и  $V_b(f)$  – скорости волны,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $V$  – фазовая скорость,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $f$  – частота, Гц.

При измерении скорости волны и затухания изменение величины амплитуды деформации происходило по замкнутому циклу. Сначала амплитуда возрастала от минимальной до максимальной величины (восходящий курс), затем по тем же величинам уменьшалась (нисходящий курс). Полный курс:  $\varepsilon_1 \approx 0,5 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_2 \approx 1,0 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_3 \approx 1,3 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_4 \approx 1,67 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_3 \approx 1,3 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_2 \approx 1,0 \times 10^{-6} \rightarrow \varepsilon_1 \approx 0,5 \times 10^{-6}$ . Увеличение и последующее уменьшение амплитуды на всех рисунках помечено стрелками. Регистрация импульсов проводилась с накоплением сигналов. Это обеспечивает повышенную помехоустойчивость.

### Результаты исследований

На рис. 1 и 2 представлена зависимость скорости  $P$ - и  $S$ -волны от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном (50 %) песчанике на постоянном давлении 20 МПа. На рис. 1 в сухом песчанике на восходящем и нисходящем курсе амплитуды деформации скорость  $P$ -волны возрастает на 1,12 %. В водонасыщенном песчанике изменение скорости волны при тех же условиях составляет 0,28 %. Диаграммы скоростей представляют незамкнутые петли гистерезиса (помечены скобками). Открытый гистерезис сухого и насыщенного песчаника составляет соответственно 1,41 и 0,28 %. Изменение скорости  $S$ -волны при тех же условиях измерения не превышало 0,35 %. Незамкнутая часть петли гистерезиса для сухого и смоченного песчаника составляет 0,54 и 0,35 % соответственно.

На рис. 3 представлено затухание  $P$ -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике при постоянном давлении. В сухом песчанике при изменении амплитуды от минимальной до максимальной величины затухание волны нелинейно возрастает на 5,43 %. При возвращении амплитуды к минимальной величине затухание уменьшается до начальной величины. В результате петля гистерезиса затухания является замкнутой. В смоченном песчанике увеличение амплитуды слабо

влияет на затухание. На обратном курсе амплитуды затухание уменьшается на 4,93 %, что приводит к появлению незамкнутой петли гистерезиса. График смоченного песчаника располагается выше графика сухого песчаника.

На рис. 4 показано затухание  $S$ -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике при постоянном давлении. Графики сухого и смоченного песчаника существенно удалены друг от друга. Величина затухания волны в сухом песчанике значительно меньше, чем в смоченном. В обоих случаях с увеличением амплитуды затухание уменьшается. В сухом и смоченном песчанике уменьшение затухания составляет 8,81 и 2,71 % соответственно. Обе петли гистерезиса незамкнутые. Величина открытой петли гистерезиса в обоих случаях не превышает 0,8 %.

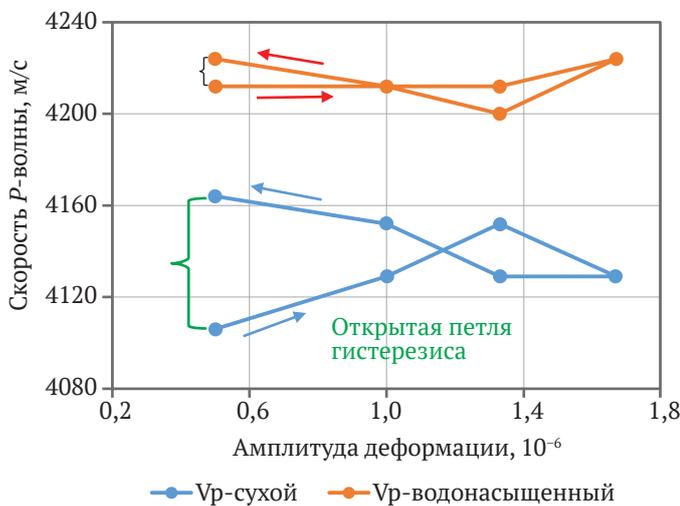


Рис. 1. Скорость  $P$ -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике

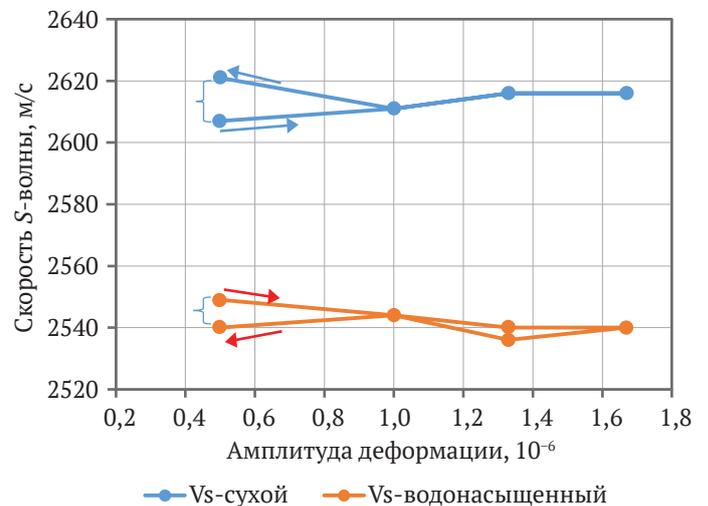


Рис. 2. Скорость  $S$ -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике

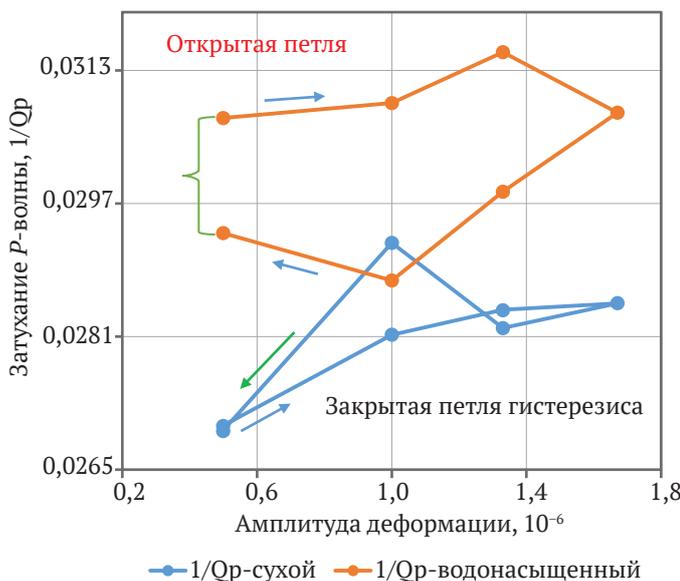


Рис. 3. Затухание  $P$ -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике

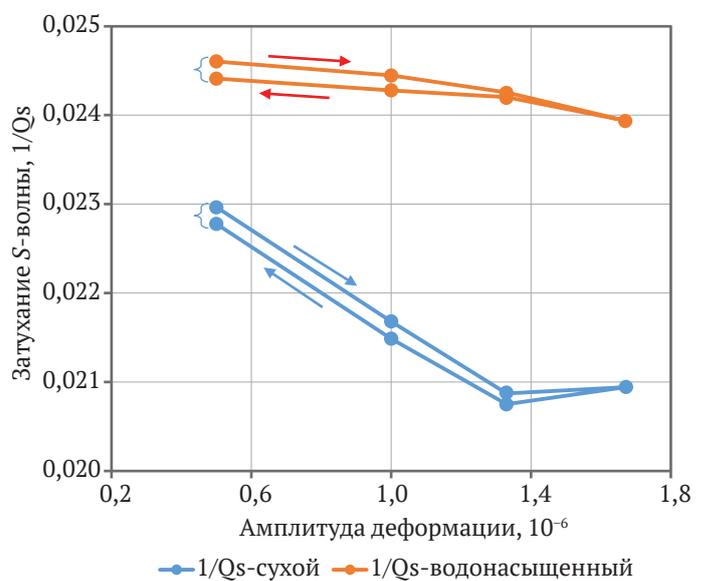


Рис. 4. Затухание  $S$ -волны в зависимости от амплитуды деформации в сухом и водонасыщенном песчанике

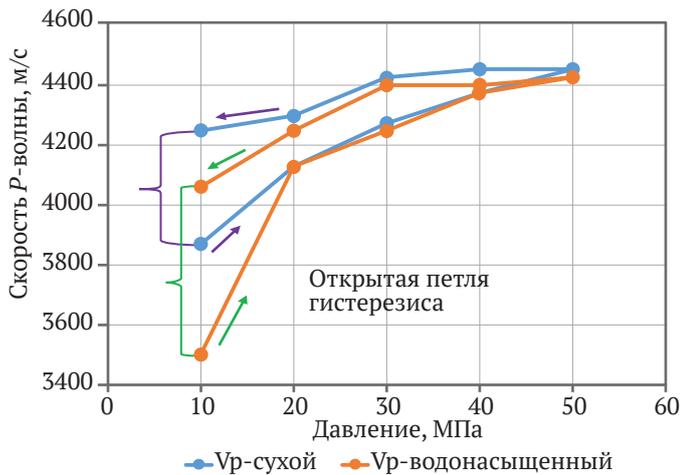


Рис. 5. Скорость  $P$ -волны в зависимости от всестороннего давления в сухом и водонасыщенном песчанике

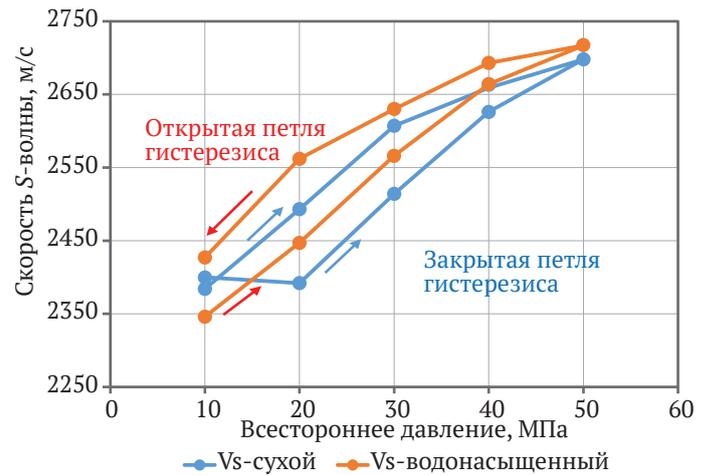


Рис. 6. Скорость  $S$ -волны в зависимости от всестороннего давления в сухом и водонасыщенном песчанике

### Обсуждение результатов

Проведенное исследование показывает сложное влияние амплитуды деформации, давления и состояния песчаника на поведение скорости и затухания  $P$ - и  $S$ -волн. Затухание волны по сравнению со скоростью волны более чувствительно к девиации амплитуды и смоченного состояния песчаника. Поведение скорости продольной волны существенно отличается от поперечной. Измерение скорости  $P$ -волны показывает, что смена состояния песчаника влияет на форму гистерезиса и величину его открытия. Открытая часть гистерезиса для продольной волны в сухом песчанике составляет 1,41 %, а в смоченном 0,28 %, т.е. имеется большое различие между ними. Скорость  $S$ -волны как в сухом, так и смоченном песчанике, слабо реагирует на девиацию амплитуды.

Наибольшее изменение величины затухания продольной волны за счет амплитуды деформации получено в сухом песчанике (5,43 %) и том же состоянии на поперечной волне (8,81 %). Изменение величины затухания поперечной волны в смоченном песчанике за счет амплитуды достигает 2,71 %. На продольной волне открытый гистерезис зарегистрирован в смоченном песчанике (4,5 %), в сухом он отсутствует. На поперечной волне как в сухом, так и смоченном песчанике проявление открытого гистерезиса незначительно. Изменение всестороннего давления в замкнутом режиме как для продольной, так и поперечной волны приводит к нелинейному возрастанию скорости и появлению незамкнутой петли гистерезиса. Стоит отметить, что скорость продольной и поперечной волн при обоих состояниях песчаника реагирует на изменение величины всестороннего давления.

### Заключение

Анализ полученных в эксперименте новых данных показывает сложный характер поведения скорости и затухания продольной и поперечной волн в зависимости от величины амплитуды деформации

и сухо-водного состояния песчаника. Изменение амплитуды деформации и всестороннего давления по замкнутому циклу (то есть ее увеличение и адекватное уменьшение) приводит к существенному изменению динамических характеристик регистрируемого сигнала. Это преобразование имеет место для скорости волны и затухания. Влияние амплитуды деформации на гистерезис открытого и закрытого типа происходит как для скорости волны, так и для затухания. Как в сухом, так и смоченном песчанике в большинстве случаев наблюдается открытая петля гистерезиса. Имеются случаи проявления закрытой петли гистерезиса и также эффект перехлеста петель гистерезиса. Наибольшее изменение скорости волны за счет амплитуды деформации получено для продольной волны в сухом песчанике. Однако параметр затухания превышает достижения скорости волны. Наибольший результат для амплитудно-зависимого затухания получен для сухого песчаника при распространении продольной волны – 5,43 % и при распространении поперечной волны – 8,81 %.

В нашем исследовании к признакам проявления микропластичности можно отнести следующее. Гистерезис открытого и закрытого типа, обнаруженный в амплитудно-зависимой скорости и затухании в сухом и смоченном песчанике. Нелинейный характер и перехлест восходящего и нисходящего курсов амплитуды. Их расхождение может быть вызвано эффектом микропластичности. Сложное и своеобразное поведение обеих петель гистерезиса предполагает возможность участия в процессе деформирования песчаника нестандартного механизма. Многообразное поведение скорости волны и затухания при деформировании горной породы может быть вызвано совместным действием процессов вязко-упругости и микропластичности. Качественные и количественные характеристики осложнений динамических параметров могут являться признаками внутреннего строения исследуемого объекта.



### Список литературы

1. Гушин В.В., Павленко О.В. Изучение нелинейно-упругих свойств земных пород по сейсмическим данным. В: *Современная сейсмология. Достижения и проблемы*. Т. 13. М.; 1998.
2. Егоров Г.В. Вариация нелинейных параметров консолидированного пористого водонасыщенного образца в зависимости от степени газонасыщения. *Физическая мезомеханика*. 2007;10(1):107–110.
3. Кондратьев О.К. *Сейсмические волны в поглощающих средах*. М.: Недра; 1986. 176 с.
4. Николаев А.В. *Проблемы нелинейной сейсмологии*. М.: Наука; 1987. 288 с.
5. 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;37(1):1–16. [https://doi.org/10.1016/S0165-2125\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0165-2125(02)00018-5)
6. Duret T., Souche A., Borst R., Le Pourhiet L. The benefits of using a consistent tangent operator for viscoelastoplastic computations in geodynamics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018;19(12):4904–4924. <https://doi.org/10.1029/2018GC007877>
7. Golovin I.S., Pavlova T.S., Golovina S.B. et al. Effect of severe plastic deformation on internal friction of an Fe–26at.% Al alloy and titanium. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;442(1–2):165–169.
8. Guyer R.A., Johnson P.A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Physics Today*. 1999;52(4):30–36. <https://doi.org/10.1063/1.882648>
9. Mashinskii E.I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959.
10. Derlet P.M., Maaß R. *Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model*. arXiv:1205.1486v2. Condensed Matter – Materials Science. 8 February 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.1486>
11. Mashinskii E.I. Amplitude-frequency dependencies of wave attenuation in single-crystal quartz: experimental study. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2008;113(B11). <https://doi.org/10.1029/2008JB005719>
12. Mashinskii E.I. Seismo-micro-plasticity phenomenon in the rocks. *Natural Science*. 2010;2(3):155–159. <https://doi.org/10.4236/ns.2010.23025>
13. Mashinskii E.I. Jump-like inelasticity in sandstone and its effect on the amplitude dependence of P-wave attenuation: An experimental study. *Wave Motion*. 2020;97:102585. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2020.102585>
14. Huang J., Zhao M., Du X. et al. An elasto-plastic damage model for rocks based on a new nonlinear strength criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018;51:1413–1429. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1417-1>
15. Vodenitcharova T., Zhang L.C. A new constitutive model for the phase transformations in mono-crystalline silicon. *International Journal of Solids and Structures*. 2004;41(18–19):5411–5424. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1417-1>
16. Liu Y., Dai F., Feng P., Xu N.-W. Mechanical behavior of intermittent jointed rocks under random cyclic compression with different loading parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;113:12–24. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.030>
17. Nourifard N., Lebedev M. Research note: the effect of strain amplitude produced by Ultrasonic waves on its velocity. *Geophysical Prospecting*. 2019;67(4):715–722. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12674>
18. Nourifard N., Mashinskii E., Lebedev M. The effect of wave amplitude on S-wave velocity in porous media: an experimental study by Laser Doppler Interferometry. *Exploration Geophysics*. 2019;50(6):683–691. <https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1667228>
19. Baud P., Vajdova V., Wong T. Shear-enhanced compaction and strain localization: Inelastic deformation and constitutive modeling of four porous sandstones. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2006;111(B12). <https://doi.org/10.1029/2005JB004101>
20. 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. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2011;116(B12). <https://doi.org/10.1029/2011JB008519>
21. Olsson A.K., Austrell P.-E. A fitting procedure for viscoelastic-elastoplastic material models. In: *Proceedings of the Second European Conference on Constitutive Models for Rubber*. Hannover, Germany, 10–12 September 2001.
22. Головин Ю.И., Дуб С.Н., Иволгин В.И. и др. Кинетические особенности деформации твердых тел в нано-микрообъемах. *Физика твердого тела*. 2005;47(6):961–973.
23. Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В. Скачкообразная микро-деформация в нано-структурных материалах. *Физика твердого тела*. 2008;50(5):815–819.
24. Zhou C., Biner S.B., LeSar R. Discrete dislocation dynamics simulations of plasticity at small scales. *Acta Materialia*. 2010;58:1565–1577.



25. Luo Sh.-N., Swadener J.G., Ma Ch., Tschauer O. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite. *Physica B: Condensed Matter*. 2007;399(2):138–142. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.06.011>
26. Yin H., Zhang G. Nanoindentation behavior of muscovite subjected to repeated loading. *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*. 2011;1(2):72–83. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nm.2153-5477.0000033](https://doi.org/10.1061/(asce)nm.2153-5477.0000033)
27. Mashinskii E.I., Dynamic micro-plasticity manifestation in consolidated sandstone in the acoustical frequency range. *Geophysical Prospecting*. 2016;64:1588–1601. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12368>
28. Nishino Y., Kawaguchia R., Tamaokaa S., Idea N. Amplitude-dependent internal friction study of fatigue deterioration in carbon fiber reinforced plastic laminates. *Materials Research*. 2018;21(2):e20170858. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0858>
29. Johnston D.H., Toksoz M.N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1980;85(B2):937–942. <https://doi.org/10.1029/JB085iB02p00937>
30. Jones S.M. Velocity and quality factors of sedimentary rocks at low and high effective pressures. *Geophysical Journal International*. 1995;123(3):774–780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06889.x>
31. Mavko G.M. Frictional attenuation: an inherent amplitude dependence. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1979;84(B9):4769–4775. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04769>
32. Winkler K.W. Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1983;88(B11):9493–9499. <https://doi.org/10.1029/JB088iB11p09493>

## References

1. Gushchin V.V., Pavlenko O.V. Study of nonlinear elastic properties of rocks based on seismic data. In: *Modern seismology. Achievements and Challenges. Vol. 13*. Moscow; 1998. (In Russ.)
2. Egorov G.V. Variation of nonlinear parameters of a consolidated water-saturated porous specimen depending on the degree of gas saturation. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2007;10(1):107–110. (In Russ.)
3. Kondratyev O.K. *Seismic waves in absorbing media*. Moscow: Nedra Publ.; 1986, 176 p. (In Russ.)
4. Nikolaev A.V. *Problems of nonlinear seismic*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. 288 p. (In Russ.)
5. 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;37(1):1–16. [https://doi.org/10.1016/S0165-2125\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0165-2125(02)00018-5)
6. Duretz T., Souche A., Borst R., Le Pourhiet L. The benefits of using a consistent tangent operator for viscoelastoplastic computations in geodynamics. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2018;19(12):4904–4924. <https://doi.org/10.1029/2018GC007877>
7. Golovin I.S., Pavlova T.S., Golovina S.B. et al. Effect of severe plastic deformation on internal friction of an Fe–26at.% Al alloy and titanium. *Materials Science and Engineering: A*. 2006;442(1–2):165–169.
8. Guyer R.A., Johnson P.A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Physics Today*. 1999;52(4):30–36. <https://doi.org/10.1063/1.882648>
9. Mashinskii E.I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959.
10. Derlet P.M., Maaß R. *Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model*. arXiv:1205.1486v2. Condensed Matter – Materials Science. 8 February 2013. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.1486>
11. Mashinskii E.I. Amplitude-frequency dependencies of wave attenuation in single-crystal quartz: experimental study. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2008;113(B11). <https://doi.org/10.1029/2008JB005719>
12. Mashinskii E.I. Seismo-micro-plasticity phenomenon in the rocks. *Natural Science*. 2010;2(3):155–159. <https://doi.org/10.4236/ns.2010.23025>
13. Mashinskii E.I. Jump-like inelasticity in sandstone and its effect on the amplitude dependence of P-wave attenuation: An experimental study. *Wave Motion*. 2020;97:102585. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2020.102585>
14. Huang J., Zhao M., Du X. et al. An elasto-plastic damage model for rocks based on a new nonlinear strength criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018;51:1413–1429. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1417-1>
15. Vodenitcharova T., Zhang L.C. A new constitutive model for the phase transformations in mono-crystalline silicon. *International Journal of Solids and Structures*. 2004;41(18–19):5411–5424. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1417-1>
16. Liu Y., Dai F., Feng P., Xu N.-W. Mechanical behavior of intermittent jointed rocks under random cyclic compression with different loading parameters. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;113:12–24. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.030>
17. Nourifard N., Lebedev M. Research note: the effect of strain amplitude produced by Ultrasonic waves on its velocity. *Geophysical Prospecting*. 2019;67(4):715–722. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12674>



18. Nourifard N., Mashinskii E., Lebedev M. The effect of wave amplitude on S-wave velocity in porous media: an experimental study by Laser Doppler Interferometry. *Exploration Geophysics*. 2019;50(6):683–691. <https://doi.org/10.1080/08123985.2019.1667228>
19. Baud P., Vajdova V., Wong T. Shear-enhanced compaction and strain localization: Inelastic deformation and constitutive modeling of four porous sandstones. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2006;111(B12). <https://doi.org/10.1029/2005JB004101>
20. 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. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 2011;116(B12). <https://doi.org/10.1029/2011JB008519>
21. Olsson A.K., Austrell P.-E. A fitting procedure for viscoelastic-elastoplastic material models. In: *Proceedings of the Second European Conference on Constitutive Models for Rubber*. Hannover, Germany, 10–12 September 2001.
22. Golovin Yu.I., Dub S.N., Ivolgin V.I. et al. Kinetic features of strain of solids in nano-microvolumes. *Physics of the Solid State*. 2005;47(6):961–973. (In Russ.)
23. Peschanskaya N.N., Smirnov B.I., Shpeizman V.V. Steplike micro-strain in nano-structural materials. *Physics of the Solid State*. 2008;50(5):815–819.
24. Zhou C., Biner S.B., LeSar R. Discrete dislocation dynamics simulations of plasticity at small scales. *Acta Materialia*. 2010;58:1565–1577.
25. Luo Sh.-N., Swadener J.G., Ma Ch., Tschauner O. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite. *Physica B: Condensed Matter*. 2007;399(2):138–142. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.06.011>
26. Yin H., Zhang G. Nanoindentation behavior of muscovite subjected to repeated loading. *Journal of Nanomechanics and Micromechanics*. 2011;1(2):72–83. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nm.2153-5477.0000033](https://doi.org/10.1061/(asce)nm.2153-5477.0000033)
27. Mashinskii E.I., Dynamic micro-plasticity manifestation in consolidated sandstone in the acoustical frequency range. *Geophysical Prospecting*. 2016;64:1588–1601. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12368>
28. Nishino Y., Kawaguchia R., Tamaoka S., Idea N. Amplitude-dependent internal friction study of fatigue deterioration in carbon fiber reinforced plastic laminates. *Materials Research*. 2018;21(2):e20170858. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0858>
29. Johnston D.H., Toksoz M.N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1980;85(B2):937–942. <https://doi.org/10.1029/JB085iB02p00937>
30. Jones S.M. Velocity and quality factors of sedimentary rocks at low and high effective pressures. *Geophysical Journal International*. 1995;123(3):774–780. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06889.x>
31. Mavko G.M. Frictional attenuation: an inherent amplitude dependence. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1979;84(B9):4769–4775. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04769>
32. Winkler K.W. Frequency dependent ultrasonic properties of high-porosity sandstones. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1983;88(B11):9493–9499. <https://doi.org/10.1029/JB088iB11p09493>

### Информация об авторе

**Эдуард Иннокентьевич Машинский** – доктор геолого-минералогических наук, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-8621-0719, Scopus ID 8886240600; e-mail MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

### Information about the author

**Eduard I. Mashinskii** – Dr. Sci. (Geol. and Min.), Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation; ORCID 0000-0001-8621-0719, Scopus ID 8886240600; e-mail MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию	01.12.2022	Received	01.12.2022
Поступила после рецензирования	07.02.2023	Revised	07.02.2023
Принята к публикации	08.02.2023	Accepted	08.02.2023