



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-30-36>**Амплитудно-иницируемая открытая петля гистерезиса затухания Р-волны в песчанике: экспериментальное исследование**

Э. И. Машинский

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука,
Сибирское отделение Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация*✉ MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru**Аннотация**

В физике твердого тела и материаловедении с использованием высокоточных измерений на малых напряжениях и деформациях были получены новые знания о микро-нанопластичности. В настоящее время свойство микропластичности горных пород мало изучено, но в перспективе оно может быть полезно для решения задач фундаментального и прикладного характера. В этом исследовании изучено влияние циклически изменяемой амплитуды импульса и скорости волны на параметры затухания продольной волны в песчанике. Лабораторные измерения выполнены на образцах породы методом отраженных волн в диапазоне частот 0,5–1,4 МГц на пяти значениях амплитуды деформации $\sim (0,5-2,0)10^{-6}$. Проведено пробное моделирование, которое дает возможность установить влияние амплитудно-зависимой скорости волны на параметры затухания волны в песчанике. Поведение затухания волны при совместном действии амплитудного фактора и девиации скорости волны имеет сложный характер. Изменение амплитуды деформации сдвигает пик затухания $1/Q_p(f)$ в координатах «затухание–частота». Максимальное изменение величины затухания в пике за счет амплитудного фактора и девиации скорости волны достигает 3–4 %. Открытая (незамкнутая) петля гистерезиса затухания волны обнаружена после действия замкнутого амплитудного цикла $A1(+)$ --- $A5(+)$ --- $A1(-)$, где $A1(+)$ = $A1(-)$. Открытый гистерезис затухания имеет место как в случае постоянной, так и переменной скорости волны. Протяженность открытой части петли гистерезиса затухания по отношению к максимальной величине затухания составляет: для постоянной скорости волны 62,63 %, в режиме увеличения скорости волны – 91,58 % и в режиме уменьшения скорости волны – 47,01 %. Эффект незамкнутого гистерезиса затухания волны в песчанике может быть объяснен действием обнаруженной в ходе эксперимента микропластической деформации.

Ключевые слова

физика горных пород, амплитудно-зависимая скорость волны, открытый гистерезис затухания волны, микропластическая деформация, скачкообразная неупругость, упругий модуль, нанодеформация

Благодарности

Я выражаю благодарность Б.В. Пашкову и Г.В. Егорову за проведение экспериментов и дальнейшее обсуждение полученных результатов.

Для цитирования

Mashinsky E.I. Amplitude-initiated open hysteresis loop of P-wave attenuation in sandstone: experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):30–36. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-30-36>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

Amplitude-initiated open hysteresis loop of P-wave attenuation in sandstone: experimental study

E. I. Mashinsky

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*✉ MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru**Abstract**

In the area of solid state physics and materials science, new knowledge has been attained in recent years about micro-nano-plasticity using high-precision measurements at low stresses and strain. Rock microplasticity is currently poorly understood, but in the future it may prove useful in resolving problems of a fundamental



and applied nature. This study examines the effect of cyclically varying pulse amplitude and wave velocity on the attenuation parameters of longitudinal wave (*P*-wave) in sandstone. Laboratory measurements were performed on rock specimens using the reflected wave method in the frequency range of 0.5–1.4 MHz at five values of strain amplitude $\sim (0.5\text{--}2.0)10^{-6}$. Trial simulations were performed, in order to establish the effect of amplitude-dependent wave velocity on the parameters of wave attenuation in the sandstone. Wave attenuation behavior under combined action of the amplitude-dependent factor and wave velocity deviation is complex. The change in strain amplitude shifts the attenuation peak $1/Q_p(f)$ in the attenuation-frequency coordinates. The maximum change in peak attenuation value due to the amplitude factor and wave velocity deviation reaches 3–4 %. An open wave attenuation hysteresis loop was identified as a consequence of the closed amplitude cycle $A1(+) \rightarrow A1(+) \rightarrow A1(-)$, where $A1(+) = A1(-)$. Open attenuation hysteresis occurs both in the cases of constant and variable wave velocities. The length of the open part of the attenuation hysteresis loop relative to the peak value of the attenuation is as follows: for constant wave speed, 62.63 %, in the mode of increasing wave speed, 91.58 %; and, in the mode of decreasing wave speed, 47.01 %. The effect of open hysteresis of wave attenuation in sandstone can be explained by the action of microplastic deformation detected in the experiments.

Keywords

rock physics, amplitude-dependent wave velocity, open hysteresis of wave attenuation, microplastic strain, jump inelasticity, elastic modulus, nano-strain

Acknowledgments

I express my gratitude to B.V. Pashkov and G.V. Egorov for performing the experiments and further discussion of the results obtained

For citation

Mashinsky E.I. Amplitude-initiated open hysteresis loop of *P*-wave attenuation in sandstone: experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):30–36. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-30-36>

Введение и постановка проблемы

Новые фундаментальные знания в физике деформирования горных пород могут быть использованы для повышения геологической эффективности сейсмических и акустических методов исследования. Для этого требуется глубокое изучение механизма деформации при распространении и затухании упругих волн, который действует на микро/нано-уровне. Малоизвестное в геофизике свойство микропластичности горных пород может проявляться даже при малых деформациях. Сейсмические и акустические методы используют диапазон динамических малых и очень малых деформаций. Динамические процессы на больших и умеренных деформациях хорошо изучены. С появлением новых знаний о нелинейности интерес к области малых деформаций в сейсмике увеличился [1–6].

Следует отметить, что была предложена модель мезоскопической упругости (mesoscopic elasticity), которая объясняет механизм нелинейности горных пород. Новые инструменты, такие как нелинейная резонансная ультразвуковая спектроскопия, используются для выявления сложного поведения горных пород и других материалов. Имеются экспериментальные данные, что вязко-упруго-пластические модели наиболее реалистично отражают сложные деформации в горных породах по сравнению с традиционными моделями. Это существенное продвижение в расширении границ действия неупругих процессов и перспектива практического применения новых знаний [7, 8].

Теоретико-экспериментальные исследования в сейсмике и других областях физики твердого тела и материаловедения совершенствуют классическую вязкоупругую модель стандартного линейного тела, которая хорошо описывает дисперсию, релаксацию и

связанные с нею неупругие процессы [9–12]. Экспериментальные результаты сравнивались с предсказаниями скорости волны и затухания, полученными с использованием модели Био (струйного течения) и других моделей. Однако эти модели не учитывают эффекта амплитудной зависимости скоростей волн и затухания, который обнаружен современными исследованиями [13, 14]. Лабораторные эксперименты на образцах твердых осадочных пород, извлеченных с больших глубин, подтверждают наличие амплитудного эффекта. Поведение динамических параметров сейсмических и акустических волн при распространении в различных средах является сложным и пока мало изучено.

С изменением величины амплитуды сигнала наблюдается как увеличение, так уменьшение скорости волны и затухания. Уменьшение или увеличение модуля упругости происходит в соответствии с кривизной соотношения напряжение–деформация. Такое нестандартное поведение различных твердых тел, в том числе и горного материала, обусловлено совместным действием упругой и микропластической деформации [15–19]. В статическом режиме напряжения на диаграмме «напряжение–деформация» эффект амплитуды деформации представлен в виде «стресс–плато» и «стресс–падение». В динамическом режиме (распространение волн) влияние амплитудного эффекта можно видеть на форме волны в виде кратковременных стресс–плато и падения. Микропластичность пород допускает такое нерегулярное кратковременное «включение» процесса пластичности с одновременным действием упругой деформации, чему имеются теоретические подтверждения [20, 21]. В этой статье представлены результаты исследования амплитудно-зависимого гистерезиса затухания продольной волны в песчанике.

Методики исследования и фактический материал

Образец мелкозернистого песчаника изготовлен из керна, взятого с глубины 2532 м, плотность песчаника – 2,42 г/см³, содержание мелкозернистой песчаной фракции составляет 85 %, фракции алевролита – 15 %, общая пористость – 13 %. Эксперимент проводился при гидростатическом давлении 20 МПа при комнатной температуре. Образцы цилиндрической формы имеют следующие размеры: 40 мм в диаметре и 16 мм в длину. В эксперименте использовалась стандартная установка в виде трехслойной модели [22, 23]. Первый и третий слои обеспечивают идентичное отражение волны на границах раздела. Первый слой играет роль линии задержки, а третий слой – акустической нагрузки. Образец породы находится между этими слоями. Возбуждение и прием акустических сигналов обеспечивают пьезокерамические датчики на частоте ~ 1 МГц, которые поляризованы на продольную волну. Декремент затухания $1/Q_p$ вычисляется с использованием стандартных соотношений [24, 25]. Измерение декремента затухания волны проводилось в замкнутом амплитудном цикле на восходящем и нисходящем курсе, где $A_{\min} = A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_5 = A_{\max} \rightarrow \dots \rightarrow A_1 = A_{\min}$. На рисунках увеличение амплитуды помечено знаком (+), а ее уменьшение – (–). Величины относительной деформации амплитуд импульса следующие: $\varepsilon_1 \approx 0,5 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_2 \approx 1,0 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_3 \approx 1,3 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_4 \approx 1,7 \times 10^{-6}$ и $\varepsilon_5 \approx 2,0 \times 10^{-6}$. Скорость продольной волны в твердом песчанике составляет 4330 м/с. Повышение помехоустойчивости обеспечивает регистрация с накоплением сигнала.

Результаты исследований

Частотная зависимость затухания P -волны для восходящей и нисходящей амплитуд представлена соответственно на рис. 1 и 2. Затухание волны на всех амплитудах имеет вид релаксационного пика. С увеличением амплитуды сигнала величина затухания уменьшается, пик сдвигается в сторону низких частот, см. рис. 1. Нелинейный сдвиг пика затухания показан красными стрелками. На нисходящем амплитудном курсе величина затухания в пике слабо повышается, но не возвращается к исходному значению (красные стрелки на рис. 2). Амплитудная зависимость затухания продольной волны в песчанике на восходящих и нисходящих амплитудах деформации представлена на рис. 3. Здесь показана сравнительная картина поведения затухания волны для трех вариантов скорости волны. Во всех случаях затухание волны в зависимости от амплитуды деформации имеет форму петли гистерезиса открытого типа. Первый вариант имеет место в нашем эксперименте, где скорость волны для всех амплитуд постоянная – 4330 м/с. Остальные варианты – продукт простого моделирования. Второй вариант: линейное увеличение скорости волны на каждой амплитуде: $A1(+)$ = 4350, 4360, 4370, 4380, $A5(+)$ = 4390 м/с и затем обратное уменьшение по тем же величинам скорости, где $A1(-)$ = $A1(+)$). Третий вариант: линейное уменьшение скорости волны от $A1(-)$ до $A5(-)$ (4300, 4290, 4280, 4270, 4260 м/с) и обратное

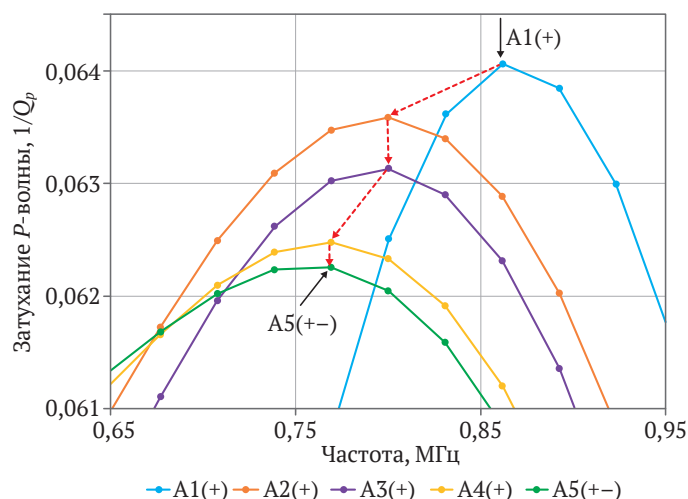


Рис. 1. Частотная зависимость затухания P -волны в песчанике на пяти восходящих значениях амплитуды деформации

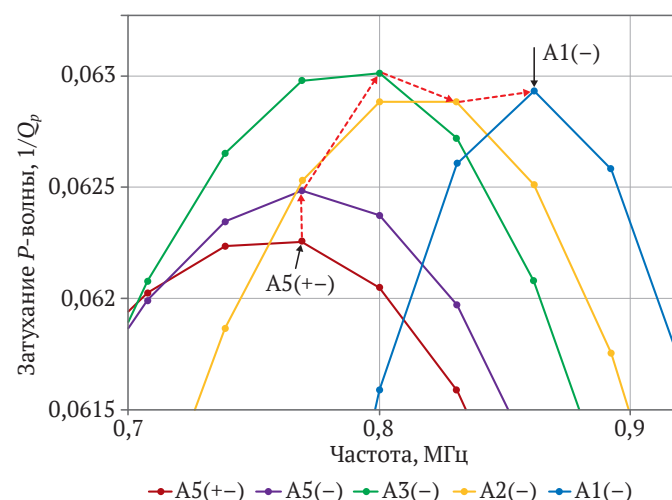


Рис. 2. Частотная зависимость затухания P -волны в песчанике на пяти нисходящих значениях амплитуды деформации

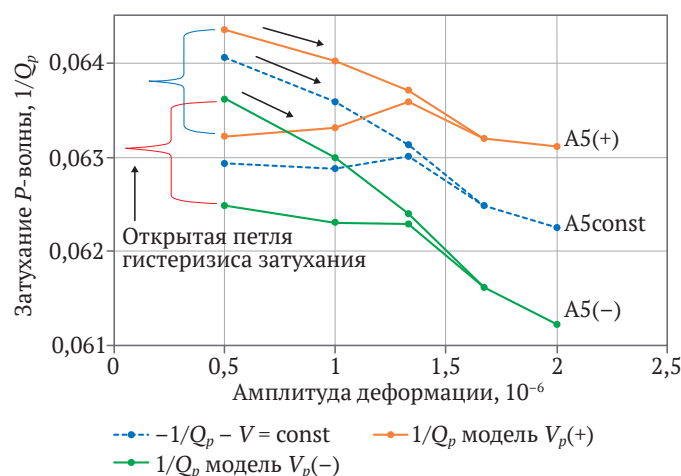


Рис. 3. Зависимость затухания P -волны в песчанике от амплитуды деформации на восходящем и нисходящем курсе

адекватное возвращение. Изменение величины скорости волны происходит в линейном режиме, которое не превышает величины 0,92 %. На максимальной амплитуде сигнала уменьшение затухания волны составляет: для постоянной скорости волны – 2,83 %, для возрастающей скорости – 1,93 % и на уменьшающейся скорости – 3,77 %. При постоянной скорости волны относительная величина незамкнутой части петли гистерезиса затухания составляет 62,63 %, при увеличении скорости волны – 91,58 % и при ее уменьшении – 47,01 %.

Фрагменты формы волны на амплитудах A1(+), A1(–) и A2(+), A2(–) в крупномасштабном отображении представлены на рис. 4. Это участок фронта волны, на котором можно видеть проявления нестандартного характера в виде микропластичности. Это – амплитудные плато, протяженность которых

составляет от одного до нескольких квантов времени $t_{\text{квант}}$, локальное падение амплитуды и эффект амплитудного микрогистерезиса. Максимум фронта волны на амплитудах A1(+), A1(–) и A2(+), A2(–) точно совпадают по времени 31,3425 мкс (красные стрелки на рис. 4). Минимум провала на фронте волны для тех же самых двух пар амплитуд располагается на одинаковом времени 31,765 мкс (красная штриховая линия на рис. 4). На фронте импульса присутствуют локальные петли амплитудного гистерезиса протяженностью в несколько квантов времени. Фрагменты формы волны на амплитудах A3(+), A3(–) и A4(+), A4(–) показаны на рис. 5. Здесь также присутствуют вышеописанные признаки микропластичности. Максимум и минимум в последней фазе импульса (31,3425 и 31,765 мкс) расположены на том же самом времени, что и в предыдущем случае.

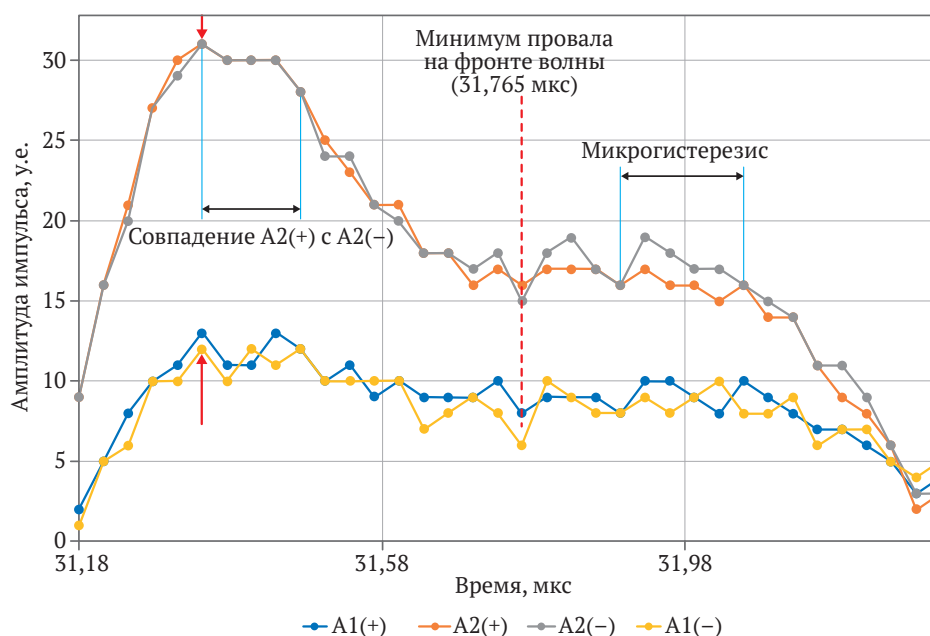


Рис. 4. Фрагменты формы волны на амплитудах A1(+) и A2(+) в крупномасштабном отображении

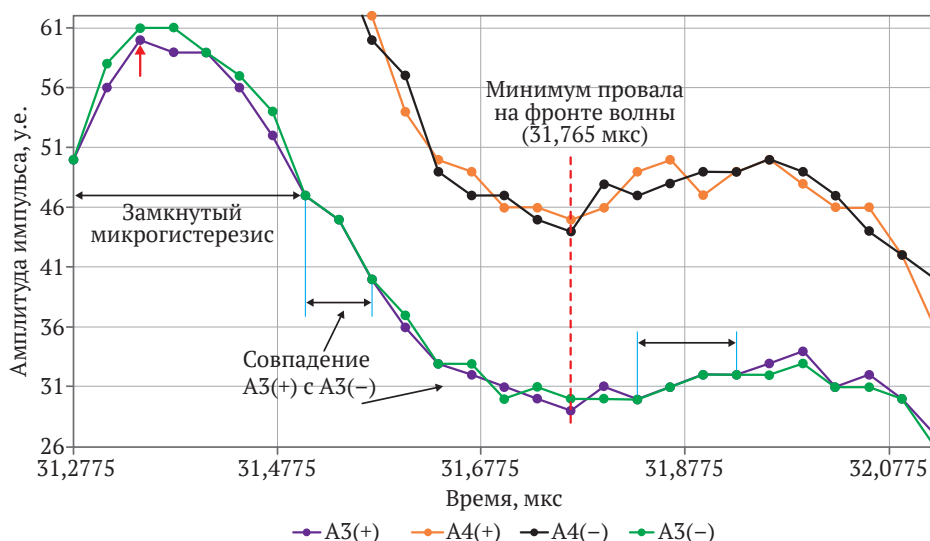


Рис. 5. Фрагменты формы волны на амплитудах A3(+) и A4(+) в крупномасштабном отображении



Обсуждение результатов

Проведенное исследование показывает, что влияние амплитуды деформации и девиации скорости волны на параметры затухания волны в песчанике имеет необычный характер. При изменении величины амплитуды по замкнутому циклу кривая затухания волны $1/Q_{peak}(A_{n-i})$ имеет форму незамкнутого амплитудно-зависимого гистерезиса. Это требует пояснения механизма деформации в рамках физики деформирования горных пород и физики твердого тела. Незамкнутый гистерезис при распространении акустической Р-волны указывает на возможность действия механизма нестандартной неупругости в песчанике. Наиболее вероятное объяснение этого эффекта дает механизм микропластичности горных пород. Микропластическая деформация сложным образом зависит от уровня деформации (величины прикладываемого механического воздействия). Затухание и скорость волны сложным образом зависят от уровня динамической деформации в песчанике. Малозначимое изменение (от 0,23 до 0,9 %) скорости продольной волны в амплитудном цикле вызывает более значительное изменение величины затухания – на 3 %. Новейшие исследования, проведенные на образцах горных пород с использованием высокоточной лазерной доплеровской интерферометрии, показывают, что изменение скорости волны за счет амплитуды достигает 5 % [26, 27].

Заключение

Анализ экспериментальных данных и пробное моделирование показывают сложный характер поведения затухания волны в зависимости от величины амплитуды и девиации скорости волны. В диапазоне частот 0,5–1,4 МГц затухание волны имеет форму релаксационного пика. Изменение величины амплитуды в замкнутом цикле (увеличение = уменьшение) приводит к сдвигу пика затухания в координатах «затухание – частота». Максимальное изменение величины затухания в пике за счет амплитудного фактора (в диапазоне деформации $(0,5-2,0)10^{-6}$) достигает 3 %. Совместное действие амплитудного фактора и небольшого отклонения скорости волны (в диапазоне от 0,23 до 0,93 %) приводит к увеличению затухания в пике до ~ 4 %. Обнаруженная в эксперименте открытая петля гистерезиса затухания волны имеет место как при постоянной скорости волны, так и при переменной (амплитудно-зависимой) скорости. Относительная величина открытого гистерезиса существенно зависит от величины амплитуды деформации и девиации скорости волны. Проявления микропластичности, зарегистрированные в эксперименте, могут быть расценены как причина эффекта незамкнутого гистерезиса затухания волны в песчанике.

Список литературы

1. Гушин В.В., Павленко О.В. Изучение нелинейно-упругих свойств земных пород по сейсмическим данным. В: *Современная сейсмология. Достижения и проблемы*. М.; 1998. Т. 13.
2. Егоров Г.В. Вариация нелинейных параметров консолидированного пористого водо-насыщенного образца в зависимости от степени газо-насыщения. *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. McCall K.R., Guyer R.A. Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1994;99(B12):23887–23897.
6. Ostrovsky L.A., Johnson P.A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *La Rivista del Nuovo Cimento*. 2001;24(4):1–46. <https://doi.org/10.1007/BF03548898>
7. 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>
8. Zhou Ch., Shen Zh.-J., Yin J.-H. Biot dynamic consolidation finite element analysis using a hypo-plasticity model. In: *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C.* August 1–6 2004. Canada; 2004. Paper No. 351. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_351.pdf
9. 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)
10. Golovin I.S., Pavlova T.S., Golovina S.B. et al. Effect of severe plastic deformation of Fe–26 at. Al and titanium on internal friction. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2006;442(1–2):165–169. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.12.081>
11. Sajeва A., Filograsso R., Capaccioli S. Including plastic behaviour in the Preisach-Mayergoyz space to find static and dynamic bulk moduli in granular media. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2018. Pp. 3517–3521. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2994837.1>
12. Luo Sh.-N., Swadener J.G., Ma Ch., Tschauner O. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite. *Physica B: Condensed Matter*. 2007;399:138–142. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.06.011>
13. Mashinskiy 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. Nishino Y., Kawaguchi R., Tamaoka S., Ide 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>
15. Derlet P.M., Maaß R. Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2013;21(3):035007. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/21/3/035007>
16. 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>
17. Huang J., Zhao M., Du X., Dai F., Ma Ch., Liu J. 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>
18. Mashinskii E.I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959. URL: https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/32706/Mash_03.pdf?sequence=1&isAllowed=y
19. 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>
20. 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/10.1016/j.ijsolstr.2004.04.025>
21. Liu Y., Dai F., Feng P., Xu N. 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>
22. Johnston D.H., Toksoz M.N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research*. 1980;85(B2):937–942. <https://doi.org/10.1029/JB085iB02p00937>
23. 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>
24. 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>
25. Mavko G.M. Friction attenuation: an inherent amplitude dependence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1979;84(B9):4769–4775. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04769>
26. 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>
27. 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>

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*. Moscow; 1998. Vol. 13. (In Russ.)
2. Egorov G.V. Variations of nonlinear parameters of a consolidated porous water-saturated sample depending on the degree of gas saturation. *Fizicheskaya mekhanika*. 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. McCall K.R., Guyer R.A. Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1994;99(B12):23887–23897.
6. Ostrovsky L.A., Johnson P.A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *La Rivista del Nuovo Cimento*. 2001;24(4):1–46. <https://doi.org/10.1007/BF03548898>
7. 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>
8. Zhou Ch., Shen Zh.-J., Yin J.-H. Biot dynamic consolidation finite element analysis using a hypo-plasticity model. In: *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C.* August 1–6 2004. Canada; 2004. Paper No. 351. URL: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_351.pdf
9. 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)
10. Golovin I.S., Pavlova T.S., Golovina S.B. et al. Effect of severe plastic deformation of Fe–26 at. Al and titanium on internal friction. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*. 2006;442(1–2):165–169. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.12.081>



11. Sajeve A., Filograsso R., Capaccioli S. Including plastic behaviour in the Preisach-Mayergoyz space to find static and dynamic bulk moduli in granular media. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2018. Pp. 3517–3521. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2994837.1>
12. Luo Sh.-N., Swadener J.G., Ma Ch., Tschauner O. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite. *Physica B: Condensed Matter*. 2007;399:138–142. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2007.06.011>
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. Nishino Y., Kawaguchi R., Tamaoka S., Ide 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>
15. Derlet P.M., Maaß R. Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2013;21(3):035007. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/21/3/035007>
16. 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>
17. Huang J., Zhao M., Du X., Dai F., Ma Ch., Liu J. 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>
18. Mashinskii E.I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959. URL: https://repository.geologyscience.ru/bitstream/handle/123456789/32706/Mash_03.pdf?sequence=1&isAllowed=y
19. 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>
20. 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/10.1016/j.ijsolstr.2004.04.025>
21. Liu Y., Dai F., Feng P., Xu N. 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>
22. Johnston D.H., Toksoz M.N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research*. 1980;85(B2):937–942. <https://doi.org/10.1029/JB085iB02p00937>
23. 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>
24. 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>
25. Mavko G.M. Friction attenuation: an inherent amplitude dependence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1979;84(B9):4769–4775. <https://doi.org/10.1029/JB084iB09p04769>
26. 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>
27. 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>

Информация об авторе

Эдуард Иннокентьевич Машинский – доктор геолого-минералогических наук, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Новосибирск, Российская Федерация; Scopus ID [8886240600](https://orcid.org/0000-0002-8886-2406); 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; Scopus ID [8886240600](https://orcid.org/0000-0002-8886-2406); e-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию	03.12.2021	Received	03.12.2021
Поступила после рецензирования	20.12.2021	Revised	20.12.2021
Принята к публикации	01.02.2022	Accepted	01.02.2022