



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-23-30>**Амплитудно-зависимый гистерезис скорости волны в горных породах в широком диапазоне частот: экспериментальное исследование**

Е. И. Машинский

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

Это исследование относится к области физики горных пород (Rock Physics). За последние годы в физике твердого тела и материаловедении появились новые знания о микропластической деформации различных материалов, в том числе горных пород. Эти данные получены с помощью высокоточных измерений деформации на микро- и наноуровне. Сам факт существования мало изученного в науках о Земле свойства горных пород требует изучения возможного влияния микропластичности пород на распространение сейсмических и акустических волн. Исследования проведены по трем альтернативным методикам и при различных условиях наблюдения. Полевые измерения проведены в зоне малых скоростей в межскважинном пространстве на проходящих волнах частотой (240–850) Гц. Лабораторные измерения выполнены на образцах песчаника на проходящих (6,8 кГц) и отраженных волнах (1 МГц) при деформации (10^{-8} – 10^{-6}). Проявления микропластичности зарегистрированы с использованием высокоразрешающей записи сигналов с временем квантования $t_{\text{квант}} = 1 \text{ мкс} - 40 \text{ мкс}$ и 32,5 нс. Вариация амплитуды волны осуществлялась по замкнутому циклу: дискретное увеличение амплитуды от минимума до максимума и возврат к исходной величине ($A_{1+} \rightarrow A_{2+} \rightarrow \dots A_{\text{макс}} \dots \rightarrow A_{2-} \rightarrow A_{1-}$). В этом амплитудном диапазоне имеет место амплитудный гистерезис, признаком которого является неравенство скоростей волн на восходящем и нисходящем амплитудном курсе. Этот эффект зарегистрирован для всех трех методов измерения на разных частотах. Однако амплитудный гистерезис скорости волны отсутствует только в случае измерений при полном водонасыщении суглинков. Наибольшее амплитудно-зависимое изменение скорости волны достигает 2 % (с точностью 0,02 %), а изменение величины затухания составляет 5 %. Причиной такого эффекта может быть микропластическая неупругость, признаками которой являются амплитудные плато, располагающиеся внутри формы волны. Амплитудный микрогистерезис формирует общую картину амплитудной зависимости скорости волны в широком амплитудном диапазоне. Представлены предложения возможного применения полученных данных для решения некоторых прикладных задач.

Ключевые слова

физика горных пород, волновые процессы, затухание волн, гистерезис скорости волны, микропластическая деформация, скачкообразная неупругость, амплитудная зависимость скорости волны

Благодарности

Выражаю благодарность Г. В. Егорову за проведение экспериментов и дальнейшее обсуждение полученных результатов.

Для цитированияMashinskii E. I. Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):23–30. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-23-30>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range: an experimental study

E. I. Mashinskii

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

This research belongs to the field of rock physics. In recent years, in solid state physics and materials science, new knowledge has emerged about microplastic strain of various materials, including rocks. These data were obtained using high-precision micro- and nanoscale strain measurements. The very fact of the existence of



the poorly studied rock property in the earth sciences requires the study of the possible influence of the rock microplasticity on the propagation of seismic and acoustic waves. The studies were carried out using three alternative methods and under different observation conditions. The field measurements were carried out in the zone of low velocities in crosshole space with transmitted waves of frequency of 240–850 Hz. The laboratory measurements were carried out on sandstone samples with transmitted (6.8 kHz) and reflected (1 MHz) waves at the strain of 10^{-8} – 10^{-6} . The manifestations of microplasticity were recorded using high-resolution recording of signals with discretization time $t_{\text{discret}} = 1 \mu\text{s} - 40 \mu\text{s}$ and 32.5 ns. The wave amplitude variation was provided in a closed cycle: discrete increasing the amplitude from minimum to maximum and return to the initial value ($A_{1+} \rightarrow A_{2+} \rightarrow \dots A_{\text{max}} \dots \rightarrow A_{2-} \rightarrow A_{1-}$). In this amplitude range, an amplitude hysteresis was observed, a sign of which was the inequality of wave velocities on the upward and downward amplitude courses. This effect was recorded for all three measurement methods at different frequencies. However, the amplitude hysteresis of the wave velocity was not observed only in the measurements at full water saturation of loam. The largest amplitude-dependent change in the wave velocity reached 2% (at the accuracy of 0.02%), and the change in the attenuation value amounted to 5%. The reason for this effect could be microplastic inelasticity, which manifested itself by amplitude plateaus located within the waveform. The amplitude microhysteresis forms overall picture of the amplitude dependence of the wave velocity in wide amplitude range. Proposals for the potential use of the obtained data for solving some applied problems have been presented.

Key words

rock physics, wave processes, elastic modulus, wave attenuation, wave velocity hysteresis, microplastic strain, discontinuous inelasticity, amplitude dependence of wave velocity

Acknowledgements

The author thanks G. V. Egorov for conducting experiments and useful discussion when considering the study findings.

For citation

Mashinskii E. I. Amplitude-dependent hysteresis of wave velocity in rocks in wide frequency range: an experimental study. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):23–30. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-23-30>

Введение и постановка проблемы

Перспективный подход к повышению геологической эффективности сейсмических и акустических методов исследования опирается на новые знания в физике деформирования горных пород. Под этим подразумевается глубокое изучение механизмов распространения и затухания упругих волн на микро- и наномасштабах. К списку малоизвестных знаний можно отнести свойство микропластичности горных пород, которое проявляется при малых деформациях. Интересы в науках о Земле охватывают большой частотный диапазон квазистатических и динамических напряжений и деформаций.

Динамические характеристики пород при сейсмических воздействиях были изучены на больших и умеренных деформациях [1]. С изучением нелинейных эффектов в сейсмике [2–7] вопрос о границе «упругость–неупругость» стал более актуальным. С учетом (исходя из) экспериментальных данных уровень деформации этой границы был постепенно сдвинут от $\sim 10^{-2}$ – 10^{-3} в сторону меньших деформаций до $\sim 10^{-6}$. Таким образом, было показано, что нелинейные эффекты в горных породах возможны даже при малых деформациях. Это расширяет действие неупругих процессов на область практического применения, где используют волны малой интенсивности.

В настоящее время теоретические исследования в сейсмике опираются на классическую вязкоупругую модель стандартного линейного тела, которая хорошо описывает дисперсию, релаксацию и связанные с нею неупругие процессы [8, 9]. Однако эта модель не учитывает такой нестандартный эффект, как амплитудная зависимость скоростей волн и затухания, который

обнаружен во многих экспериментах при распространении сейсмических и акустических волн в горных породах [10–13]. В основном это лабораторные эксперименты на образцах твердых пород, извлеченных с больших глубин. Экспериментальные данные показывают, что с увеличением амплитуды излучаемого сигнала наблюдается уменьшение скорости волны и увеличение затухания [9, 14, 15]. Другие эксперименты также подтверждают представленные выше данные, но одновременно имеют и противоположный результат. С увеличением амплитуды сигнала может происходить как увеличение, так и уменьшение скорости волны, и затухания [6, 11]. Необычное поведение скоростей волн распространяется на поведение модуля упругости. Уменьшение или увеличение модуля упругости происходит в соответствии с кривизной соотношения напряжение–деформация [16–20].

Микропластическая неупругость горных пород была обнаружена в квазистатических экспериментах на различных образцах [19]. Микропластичность металлов, сплавов и других материалов была известна. Ее проявления на диаграмме «напряжение–деформация» представлены в виде «стресс-плато» и «стресс-падение» (the stress-plateau and the stress-drop) [21–24]. Это свойство можно охарактеризовать как некоторое нерегулярное кратковременное «включение» пластичности внутри упругой области деформирования [16, 25–27]. Это положение имеет также теоретическое подтверждение [28, 29]. Ниже представлены результаты исследования амплитудной зависимости скорости продольной волны в породах, полученные с использованием различной аппаратуры в различных условиях проведения эксперимента.



Методики исследования и фактический материал

Полевые исследования

Полевые измерения проведены в зоне малых скоростей в суглинках. В верхней части до глубины 8,5 м породы частично водонасыщенны. Скорость продольных волн составляет около 340 м/с. Ниже располагается водоносный горизонт, скорость волны в котором ~1500 м/с. Измерения проведены методом межскважинного просвечивания, расстояние между скважинами составляет 7 м. В первой расстановке излучатель установлен на глубине 2 м, а приемник сигналов на глубине 10 м (2 м – 10 м). Волна проходит преимущественно через частично водонасыщенную породу. На второй расстановке излучатель и приемник находятся на глубине (10 м – 10 м), волна распространяется в полностью насыщенной водой породе.

Излучатель сейсмического сигнала состоит из набора пьезоэлектрических шайб, размещенных в корпусе с предварительным усилителем [4, 30]. Излучение сигнала происходит через жидкостную прокладку и герметичную эластичную оболочку, которая контактирует со стенкой скважины. Амплитуда импульса на пьезоэлектрическом преобразователе излучателя изменялась от 350 до 950 В. Использовался датчик ПДС-21, который имеет коэффициент преобразования 100 мкВ/Па. Приемник сигналов контактировал со стенками скважины через эластичную прокладку с жидкостью. Регистрация осуществлялась с накоплением сигнала до 128. Цифровая запись сигналов осуществлялась на компьютере. Точность измерения времени распространения импульса составляла ~0,02 %. Время квантования записи $t_{\text{квант}} = 8$ мкс и 40 мкс. Диапазон амплитуды деформации $(3,8 - 9,8) \times 10^{-8}$.

Лабораторные измерения

в низком килогерцовом диапазоне частот

Эксперименты выполнены на образце песчаника цилиндрической формы диаметром 76 мм и длиной 1 м. Плотность породы – 2,0 г/см³, пористость около 3 %. Скорость распространения продольной волны (2910–3000) м/с. Эксперимент проводился при комнатной температуре на пяти величинах амплитуды деформации $(0,3 - 1,67) \times 10^{-6}$.

Излучатель и приемник акустических сигналов, состоящий(е) из пьезокерамических шайб (ЦТБС-3), жестко закреплены на одном конце стержня. На другом конце образца таким же образом жестко закреплена латунная шайба толщиной 3 мм. Вся конструкция через домкрат вставлена в проем стены. Акустический импульс частотой 6835 Гц, пройдя вдоль стержня, отражается от противоположного торца и поступает на приемник и через усилитель на цифровое регистрирующее устройство. Время квантования АЦП регистратора составляет 1 мкс. Точность измерения скорости волны – 0,05 %. Относительная точность измерения, определяемая при вариации амплитуды и постоянстве остальных условий, намного выше.

Лабораторные измерения на частоте около 1 МГц

Исследования проводились на образцах сухого песчаника цилиндрической формы длиной 2,4 см

и 4,0 см в диаметре. Мелкозернистый песчаник с присутствием алеволита отобран из скважины с глубины 2920 м. Плотность породы 2,36 г/см³, общая пористость – 13 %. Измерительная установка представляет из себя трехслойную модель. Первый и третий слои (бериллиевая бронза) 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 сигналов обеспечивают пьезокерамические датчики на частоте ~1 МГц, которые поляризованы на продольную волну. Контролируемое статическое давление (20 МПа) обеспечивает постоянство контакта на границах слоев.

Результаты исследований

Полевой эксперимент

Поведение скорости продольной волны в зависимости от амплитуды деформации в суглинках представлено для двух позиций расположения источника и приемника: расстановки (2 м – 10 м) и (10 м – 10 м). На рис. 1, а показана зависимость скорости продольной волны от амплитуды при расположении источника на глубине 2 м, а приемника на 10 м. Величина амплитуды излучаемого сигнала изменялась дискретно по замкнутому циклу. Увеличение амплитуды идет от А1, А2, А3 до А4 (восходящий полуцикл), а затем ее уменьшение по тем же значениям до А1 (нисходящий полуцикл) – и получаем комплект цифровых записей в полном цикле.

Поведение скорости продольной волны в суглинках в зависимости от амплитуды деформации является сложным. В первом полуцикле курса амплитуды скорость волны сначала уменьшается, а затем нелинейно увеличивается. Во втором полуцикле идет немонокотное возрастание скорости волны. Наибольшее изменение скорости волны в цикле составляет 1,7 %. Имеется явное расхождение «путей» скорости волны между восходящим и нисходящим полуциклами. В диапазоне А2 – А4 скорость волны вместо понижения возрастает. По завершении полного цикла имеется незамкнутая петля гистерезиса, которая составляет 0,7 %. Это эффект амплитудно-зависимого гистерезиса скорости продольной волны.

Рассмотрение сейсмической записи показывает наличие нестандартных осложнений на форме волны, которые были опознаны как признаки микропластической деформации. Отдельные фрагменты импульсов, записанных на трех величинах амплитуды, представлены на рис. 1, б. Это встроенные кратковременные амплитудные плато, протяженность которых составляет от одного до нескольких $t_{\text{квант}} = 40$ мкс. Мгновенное значение амплитуды импульса на длине плато не изменяется. Эти плато прерывают «нормальный» курс амплитуды, т.е. процесс упругого деформирования и переход к микропластическому течению. Протяженность плато достигает двенадцати квантов, что составляет 480 мкс. Увеличение количества плато приводит к уменьшению крутизны фронта импульса и его затягиванию. Зависимость скорости продоль-

ной волны от амплитуды деформации в суглинках на расстановке (10 м – 10 м) представлена на рис. 2, а. С увеличением амплитуды от A1 до A4 скорость продольной волны нелинейно возрастает на 0,34 %. Здесь, в отличие от предыдущей расстановки, амплитудный гистерезис отсутствует. Это интересный показатель распространения волны в полностью водо-насыщенных суглинках. Цифровые записи также показывают отсутствие плато на форме волны (рис. 2, б).

Лабораторный эксперимент на низких килогерцовых частотах

Скорость продольной волны в песчанике в зависимости от восходящей и нисходящей амплитуды деформации представлена на рис. 3, а. При увеличении амплитуды от A1+ до A5+ наблюдается увеличение, а затем уменьшение скорости волны. При уменьшении амплитуды от A5+ до A1– скорость волны с большим с провалом возрастает и наблюдается незамкнутый

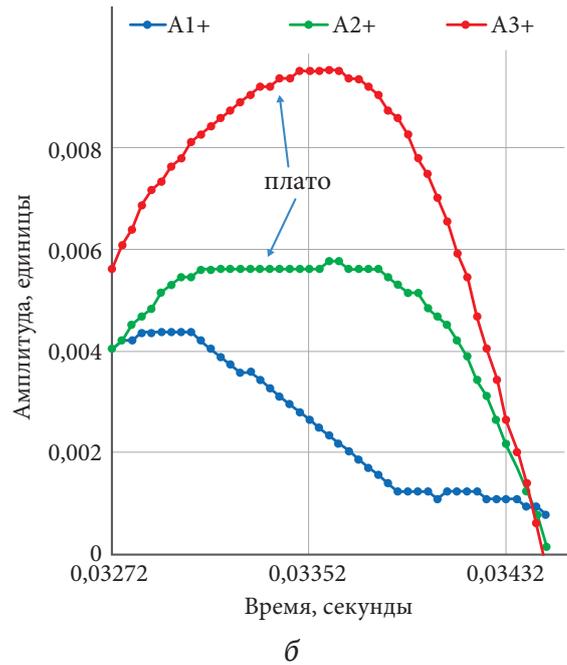
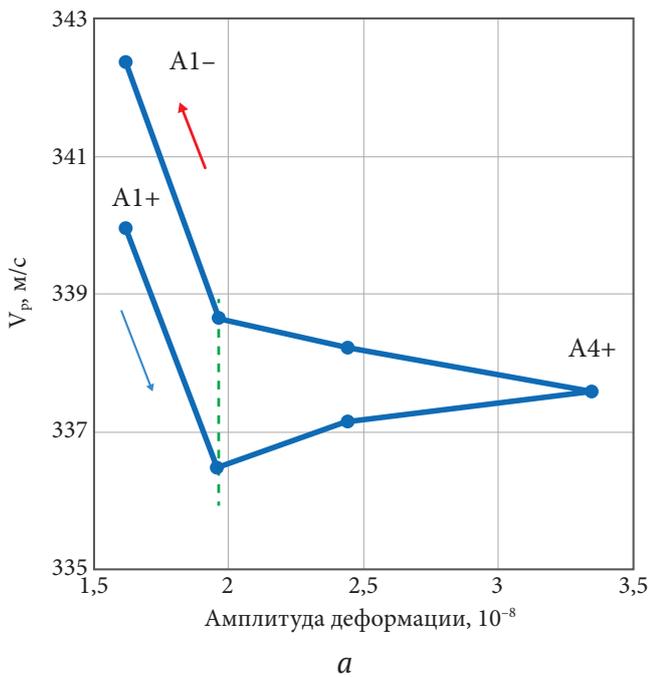


Рис. 1. Скорость продольной волны в суглинках в зависимости от амплитуды деформации: источник на глубине 2 м, приемник – на глубине 10 м (а); фрагменты импульсов с осложнениями в виде плато (б)

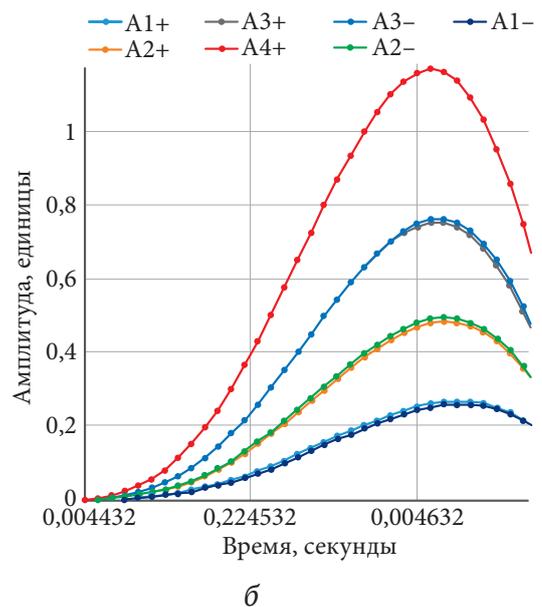
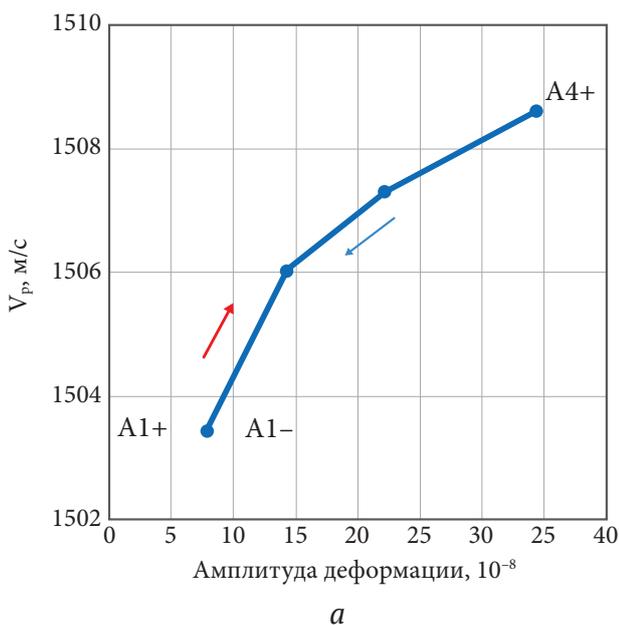


Рис. 2. Скорость продольной волны в зависимости от амплитуды деформации на расстановке источник-приемник 10 м – 10 м (а). Фрагменты фронта импульсов на амплитудах A1–A4 при расстановке h = 10 м – 10 м (б)

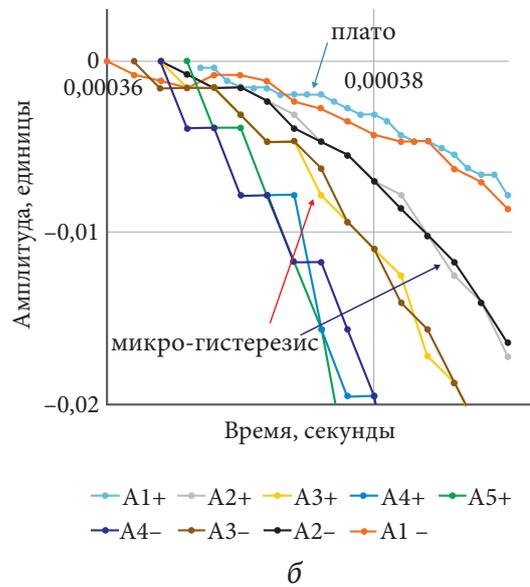
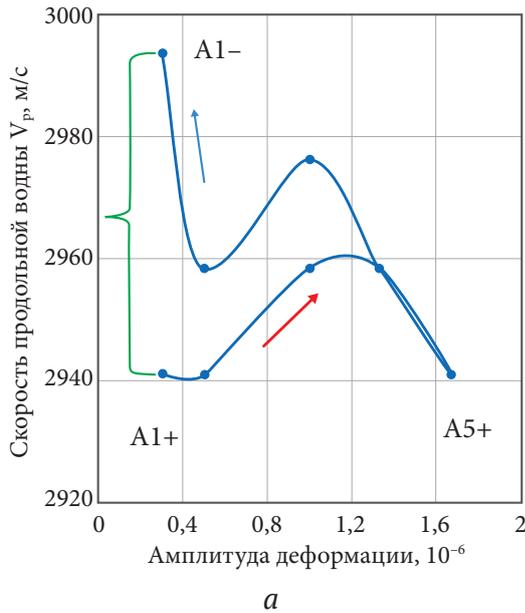


Рис. 3. Фрагменты фронта импульсов на амплитудах A1–A4 при расстановке $h = 10 \text{ м} - 10 \text{ м}$. Демонстрация плато (а). Фрагменты импульсов, зарегистрированных на пяти амплитудах, в области первых вступлений (б)

тый гистерезис, который составляет 1,8 %. На рис. 3, б показаны фрагменты фронта импульсов вблизи первого вступления для пяти значений восходящей и нисходящей амплитуды деформации. На акустических трассах присутствуют плато протяженностью более $t_{\text{квант}} = 2 \text{ мкс}$. Эти встроенные плато изменяют общий наклон фронта импульса.

На профиле волны обнаружен микрогистерезис. Это кратковременное отклонение двух идентичных трасс (например, A1+ и A1-, A2+ и A2-, и т.д.) от общего амплитудного курса, рис. 3, б. При этом происходит изменение наклона фронта на небольшом участке, т.е. скорости деформирования. Такие участки микрогистерезиса чередуются с участками полного совпадения восходящего и нисходящего курса.

Лабораторный эксперимент на частоте около 1 МГц

Зависимость скорости волны от амплитуды деформации представлена на рис. 4. При повышении амплитуды величина скорости продольной волны изменяется волнообразно. При уменьшении амплитуды скорость волны нелинейно возрастает на 0,36 %. Амплитудный гистерезис составляет 0,48 %. Форма отраженных импульсов, зарегистрированных на шести величинах амплитуд при замкнутом цикле измерения, имеет сложную картину деформации. На рис. 5 представлен фрагмент фронта волны, где можно видеть нестандартные неупругие проявления в виде плато, локального падения амплитуды и микрогистерезиса. Протяженность этих осложнений составляет величину в несколько $t_{\text{квант}} = 32,5 \text{ нс}$. Следует отметить, что записи (трассы) с восходящей (A+) и нисходящей (A-) амплитудой, несмотря на некоторые отклонения, в целом совпадают.

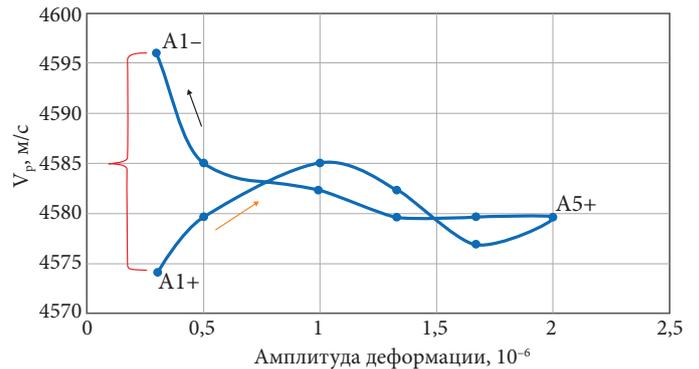


Рис. 4. Скорость продольной волны в песчанике в зависимости от амплитуды деформации

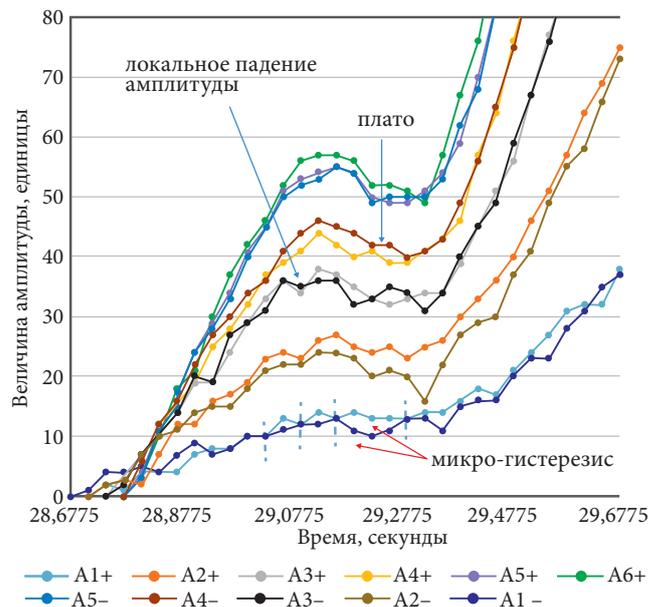


Рис. 5. Фрагменты фронта импульса в песчанике на шести величинах амплитуды



Обсуждение результатов

Эффект микропластичности сложным образом зависит от уровня деформации (величины прикладываемого механического воздействия). Эксперименты, проведенные в различных условиях, показывают принципиально одинаковые результаты. Это подтверждает факт влияния амплитуды деформации на скорость продольной волны. Изменение скорости продольной волны за счет амплитуды достигает 2 %. Новейшие исследования, проведенные на образцах горных пород с использованием высокоточной лазерной доплеровской интерферометрии, показывают, что изменение скорости волны за счет амплитуды достигает 5 % [12, 14, 27].

Действие амплитудного эффекта обнаружено на высоких сейсмических и килогерцовых частотах при динамических деформациях примерно 10^{-8} – 10^{-6} , которые относятся к области высоких скоростей деформации. Однако ранее полученные результаты квазистатических экспериментов [16, 20, 26, 28] указывают на возможность проявления такого эффекта на более низких частотах. Низкие скорости деформирования твердого тела создают еще более благоприятные условия для срабатывания механизма микропластичности [17, 22]. Замечено, что на низких амплитудах деформации величина амплитудного гистерезиса больше, чем на более высоких амплитудах.

Эксперименты показали «перехлест» петель гистерезиса, а значит и наблюдаемое увеличение или уменьшение скорости волны (модуля упругости). Небольшое изменение величины амплитуды сигнала (один дискретный шаг ΔA) может приводить к заметному изменению скорости волны. Стандартная (общепринятая) вязкоупругая модель для горных пород такого поведения модуля упругости не допускает. Эффект микрогистерезиса требует тщательного изучения, так как его влияние на динамические параметры волн может оказаться существенным.

Эффект микрогистерезиса требует тщательного изучения, так как его влияние на динамические параметры волн может оказаться существенным.

Заключение

Эффект амплитудного гистерезиса может быть полезен для практического применения. Отсутствие гистерезиса в полностью водонасыщенной породе побуждает к проведению повторных экспериментов с учетом этого результата. Полученный эффект локального изменения скорости волны в небольшом диапазоне амплитуд деформации имеет как фундаментальное, так и практическое значение. В настоящее время в сейсмических методах чувствительность скорости волны к величине излучаемого сигнала не учитывается, что понижает точность исследования.

В заключение можно сказать, что заинтересованные в этом вопросе организации при желании могут проверить возможность применения амплитудно-зависимого эффекта на практике и определить его полезность для дальнейшего использования. Такая проверка не требует наличия специального оборудования. Используется то же самое оборудование, которое применяется при полевых работах, с некоторыми дополнениями. По крайней мере, высокоточные цифровые регистраторы являются доступными для эксперимента. Изменение величины амплитуды волны методически достигается, например, последовательным изменением мощности источника излучения волны. Учет амплитудного фактора может быть полезен, например, для уменьшения ошибок при построении сейсмического разреза и в других областях геофизических исследований. Возможные области проверки эффекта и его применения: сейсморазведка, ВСП, акустический каротаж и другие.

Список литературы

1. Вознесенский Е. А. *Поведение грунтов при динамических нагрузках*. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1998. 320 с.
2. Гушин В. В., Шалашов Г. М. О возможности использования нелинейных сейсмических эффектов в задачах вибрационного просвечивания Земли. В: Николаев А. В., Галкин И. Н. *Исследование Земли невязрывными сейсмическими источниками*. М.: Наука; 1981. С. 144–155.
3. Гушин В. В., Павленко О. В. Изучение нелинейно-упругих свойств земных пород по сейсмическим данным. *Современная сейсмология. Достижения и проблемы*. 1998;13.
4. Егоров Г. В. Вариация нелинейных параметров консолидированного пористого водо-насыщенного образца в зависимости от степени газо-насыщения. *Физическая мезомеханика*. 2007;10(1):107–110.
5. Николаев А. В. *Проблемы нелинейной сейсмологии*. М.: Наука; 1987. 288 с.
6. Johnston D. H., Toksoz M. N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research*. 1980;85:937–942.
7. Ostrovsky L. A., Johnson P. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *La Rivista del Nuovo Cimento*. 2001;24:1–46. <https://doi.org/10.1007/BF03548898>
8. Кондратьев О. К. *Сейсмические волны в поглощающих средах*. М.: Недра; 1986. 176 с.
9. Mavko G. M. Friction Attenuation: An Inherent Amplitude Dependence. *Journal of Geophysical Research*. 1979;84(9):4769–4775.
10. Nishino Y., Asano S., Amplitude-dependent internal friction and microplasticity in thin-film materials. *Journal de Physique*. 1996;(06):C8-783–C8-786. <https://doi.org/10.1051/jp4:19968167>
11. 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>
12. 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>



13. Zaitsev V. Yu., Nazarov V. E., Talanov V. I. Experimental Study of the self-action of seismoacoustic waves. *Acoustic Physics*. 1999;45(6):720–726.
14. Tutuncu A. N., Podio A. L., Sharma M. An experimental investigation of factors influencing compressional- and shear-wave velocities and attenuations in tight gas sandstones. *Geophysics*. 1994;59(1):77–86. <https://doi.org/10.1190/1.1443536>
15. Winkler K. W., Nur A., Gladwin M. Friction and seismic attenuation in rocks. *Nature*. 1979;277:528–531. <https://doi.org/10.1038/277528a0>
16. 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;21(3):035007. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/21/3/035007>
17. Guyer R. A., McCall K. R., Boitnott G. N. Hysteresis, Discrete Memory and Nonlinear Wave Propagation in Rock: a New Paradigm. *Physical Review Letters*. 1995;74(17):3491–3494. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3491>
18. Guyer R. A., Johnson P. A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Physics Today*. 1999;52(4):30–36.
19. Mashinskii E. I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959.
20. McCall K. R., Guyer R. A. Equation of State and Wave Propagation in Hysteretic Nonlinear Elastic Materials. *Journal of Geophysical Research*. *Solid Earth*. 1994;99:23887–23897. <https://doi.org/10.1029/94JB01941>
21. 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>
22. Golovin I. S., Sinning H.-R., Goken J., Riehemann W. Fatigue-related damping in some cellular metallic materials. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;370(1-2):537–541. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.090>
23. 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*. 2006;442(1–2):165–169. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.12.081>
24. Sajeva A., Filograsso R., Capaccioli S. Including plastic behaviour in the Preisach-Mayergoyz space to find static and dynamic bulk moduli in granular media. In: *Conference: SEG Technical Program Expanded Abstracts*; 2018. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2994837.1>
25. Kim J.-Y., Qu J., Jacobs L. J., Littles J. W., Savage M. F. Acoustic Nonlinearity Parameter Due to Micro-plasticity. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2006;25(1):28–36. <https://doi.org/10.1007/s10921-006-0004-7>
26. 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>
27. Wang J., Li Q., Yang Ch., Zhou C. Repeated loading model for elastic–plastic contact of geomaterial. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(7):1–15. <https://doi.org/10.1177/1687814018788778>
28. Yarushina V. M., Podladchikov Y. Y. Microscale yielding as mechanism for low-frequency intrinsic seismic wave attenuation. In: *70th EAGE Conference & Exhibition*, June 2008. Rome, Italy; 2008. P. 9–12. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147947>
29. Zhou C., Bulent Biner, Richard LeSar. Discrete dislocation dynamics simulations of plasticity at small scales. *Acta Materialia*. 2010;58:1565–1577. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.11.001>
30. Egorov Г. В., Носов В. М., Маньковский В. В. Экспериментальная оценка нелинейных упругих параметров сухой и флюидо-насыщенной пористой среды. *Геология и геофизика*. 1999;40(3):457–464.

References

1. Voznesensky E. A. *Soil behavior under dynamic loads*. Moscow: Moscow University Publ.; 1998. 320 p. (In Russ.).
2. Gushchin V. V., Shalashov G. M. On the feasibility of using nonlinear seismic effects in the problems of vibrational transmission (seismic survey) of the Earth. In: Nikolaev A. V., Galkin I. N. *The Earth exploration by non-explosive seismic sources*. Moscow: Nauka, 1981, pp. 144–155. (In Russ.).
3. Gushchin V.V., Pavlenko O.V. Study of nonlinear elastic properties of rocks based on seismic data. *Sovremennaiia seismologiia. Dostizheniia i problemy*. 1998;13. (In Russ.).
4. Egorov G. V. Variations of nonlinear parameters of a consolidated porous water-saturated sample depending on the degree of gas saturation. *Fizicheskaiia mezomekhanika*. 2007;10(1):107–110. (In Russ.).
5. Nikolaev A. V. *Problems of nonlinear seismic*. Moscow: Nauka; 1987. 288 p. (In Russ.).
6. Johnston D. H., Toksoz M. N. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research*. 1980;85:937–942.
7. Ostrovsky L. A., Johnson P. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *La Rivista del Nuovo Cimento*. 2001;24:1–46. <https://doi.org/10.1007/BF03548898>
8. Kondratyev O. K. *Seismic waves in Absorbing Media*. Moscow: Nedra; 1986. 176 p. (In Russ.).
9. Mavko G. M. Friction Attenuation: An Inherent Amplitude–Dependence. *Journal of Geophysical Research*. 1979;84(9):4769–4775.
10. Nishino Y., Asano S., Amplitude-dependent internal friction and microplasticity in thin-film materials. *Journal de Physique*. 1996;(06):C8-783–C8-786. <https://doi.org/10.1051/jp4:19968167>



11. 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>
12. 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>
13. Zaitsev V. Yu., Nazarov V. E., Talanov V. I. Experimental Study of the self-action of seismoacoustic waves. *Acoustic Physics*. 1999;45(6):720–726.
14. Tutuncu A. N., Podio A. L., Sharma M. An experimental investigation of factors influencing compressional- and shear-wave velocities and attenuations in tight gas sandstones. *Geophysics*. 1994;59(1):77–86. <https://doi.org/10.1190/1.1443536>
15. Winkler K. W., Nur A., Gladwin M. Friction and seismic attenuation in rocks. *Nature*. 1979;277:528–531. <https://doi.org/10.1038/277528a0>
16. 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;21(3):035007. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/21/3/035007>
17. Guyer R. A., McCall K. R., Boitnott G. N. Hysteresis, Discrete Memory and Nonlinear Wave Propagation in Rock: a New Paradigm. *Physical Review Letters*. 1995;74(17):3491–3494. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.74.3491>
18. Guyer R. A., Johnson P. A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Physics Today*. 1999;52(4):30–36.
19. Mashinskii E. I. Difference between static and dynamic elastic moduli of rocks: Physical causes. *Russian Geology and Geophysics*. 2003;44(9):953–959.
20. McCall K. R., Guyer R. A. Equation of State and Wave Propagation in Hysteretic Nonlinear Elastic Materials. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. 1994;99:23887–23897. <https://doi.org/10.1029/94JB01941>
21. 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>
22. Golovin I. S., Sinning H.-R., Goken J. Riehemann W. Fatigue-related damping in some cellular metallic materials. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;370(1-2):537–541. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.090>
23. 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*. 2006;442(1–2):165–169. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.12.081>
24. Sajeva A., Filograsso R., Capaccioli S. Including plastic behaviour in the Preisach-Mayergoyz space to find static and dynamic bulk moduli in granular media. In: *Conference: SEG Technical Program Expanded Abstracts*; 2018. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2994837.1>
25. Kim J.-Y., Qu J., Jacobs L. J., Littles J. W., Savage M. F. Acoustic Nonlinearity Parameter Due to Microplasticity. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2006;25(1):28–36. <https://doi.org/10.1007/s10921-006-0004-7>
26. 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>
27. Wang J., Li Q., Yang Ch., Zhou C. Repeated loading model for elastic–plastic contact of geomaterial. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(7):1–15. <https://doi.org/10.1177/1687814018788778>
28. Yarushina V. M., Podladchikov Y. Y. Microscale yielding as mechanism for low-frequency intrinsic seismic wave attenuation. In: *70th EAGE Conference & Exhibition*, June 2008. Rome, Italy; 2008, pp. 9–12. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20147947>
29. Zhou C., Bulent Biner, Richard LeSar. Discrete dislocation dynamics simulations of plasticity at small scales. *Acta Materialia*. 2010;58:1565–1577. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.11.001>
30. Egorov G. V., Nosov V. M., Man'kovskiy V. V. Experimental estimation of nonlinear elastic parameters of dry and fluid-saturated porous medium. *Geologiya i geofizika*. 1999;40(3):457–464. (In Russ.)

Информация об авторе

Эдуард Иннокентьевич Машинский – д.г.-м.н., Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, SCOPUS ID: [8886240600](https://orcid.org/0000-0001-9148-1000); г. Новосибирск, Россия; 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, SCOPUS ID: [8886240600](https://orcid.org/0000-0001-9148-1000); Novosibirsk, Russia; e-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

Поступила в редакцию 07.01.2021

Received 07.01.2021

Поступила после рецензирования 07.02.2021

Revised 07.02.2021

Принята к публикации 08.02.2021

Accepted 08.02.2021