

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-31-41

**Эффекты прерывистой неупругости  
при распространении сейсмической волны в зоне малых скоростей**

**Машинский Э. И.**

Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А. А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, Россия; ✉MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

**Аннотация:** Изучение нетипичных проявлений неупругости горных пород расширяет понимание физических механизмов распространения и затухания сейсмических волн в реальных средах. Полевые эксперименты выполнены при распространении продольной волны частотой 240–1000 Гц в пространстве между двумя неглубокими скважинами в зоне малых скоростей (ЗМС). Измерения проводились с помощью пьезоэлектрического импульсного излучателя и аналоговых приемников, размещенных в скважинах. Цифровые записи сигналов в виде «напряжение-время»  $\sigma(t)$  регистрировались открытым каналом с микросекундным разрешением во времени. На профиле волны обнаружены необычные короткопериодные вариации амплитуды в виде резкого уменьшения крутизны фронта, падения напряжения или плато различной длительности (десятки микросекунд). Эти малоамплитудные вариации на форме волны были расценены как проявления скачкообразной прерывистой неупругости. Сделано предположение, что этот неупругий процесс оказывает влияние на трансформацию формы волны. Вклад скачкообразной неупругости зависит от величины прикладываемого напряжения, т.е. в нашем случае от величины амплитуды сейсмического сигнала. Возможный механизм скачкообразной неупругости на малых деформациях может быть объяснен микропластичностью горных пород. Полученные результаты представляют новый шаг в понимании физики распространения сейсмических и акустических волн в горных породах и могут быть полезными для решения прикладных задач в геофизике и горном деле.

**Ключевые слова:** скачкообразная деформация, микропластичность горных пород, неупругие сейсмические параметры, амплитудная зависимость скоростей волн и затухания.

**Благодарности:** Автор благодарит Егорова Г. В. за проведение экспериментов и полезную дискуссию при обсуждении работы.

**Для цитирования:** Машинский Э. И. Эффекты прерывистой неупругости при распространении сейсмической волны в зоне малых скоростей. *Горные науки и технологии*. 2019;4(1):31-41. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-31-41.

**Effects of Intermittent Inelasticity when Propagating Seismic Wave  
in Low Velocity Zone**

**E. I. Mashinskii**

The Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy  
of Sciences (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia, ✉MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru

**Abstract:** The study of atypical manifestations of rock inelasticity improves understanding of the physical mechanisms of seismic wave propagation and attenuation in real environments. In the field experiments, the propagation of longitudinal wave at frequency of 240–1000 Hz between two shallow boreholes in low speed zone was investigated. The measurements were performed using a piezoelectric pulse emitter and similar receiver tools positioned in the boreholes. "Stress-time"  $\sigma(t)$  digital responses were recorded by the open channel with microsecond temporal resolution. The unusual short-period variations of amplitude in the form of sharp flattening wave front, stress drop, or plateau of different width (tens of microseconds) were detected in the wave profile. These low-amplitude variations in the waveform were regarded as manifestations of hopping intermittent inelasticity. This inelastic process was assumed to affect the waveform transformation. The contribution of hopping inelasticity depends on the applied stress magnitude, i.e. in this case, the seismic response amplitude. The mechanism of hopping inelasticity at

small strains may be explained by microplasticity of rocks. The findings obtained represent a new step in understanding of physics of seismic and acoustic wave propagation in rocks and can be useful for handling of applied problems in geophysics and mining.

**Keywords:** hopping strain, rock microplasticity, inelastic seismic attributes, amplitude dependence of wave velocities and attenuation.

**Acknowledgements:** The author thanks G. V. Egorov for conducting experiments and useful discussion.

**For citation:** Mashinskii E. I. Effects of intermittent Inelasticity when propagating seismic wave in low velocity zone. *Mining Science and Technology*. 2019;4(1):31-41. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-31-41.

## Введение

Изучение физических механизмов распространения и затухания сейсмических волн, несмотря на свою давнюю историю, до сих пор является актуальной задачей. Для решения этой задачи современный подход использует новые знания о деформации горных пород, полученные на микромасштабном уровне. Классическая вязкоупругая модель хорошо описывает дисперсию и релаксацию [5, 23]. Однако эта модель не объясняет механизм, например, неоднозначности амплитудной зависимости скорости волны и затухания. Этот наводит на мысль о существовании какого-то не учитываемого механизма неупругости.

Изучение динамических характеристик пород достаточно полно описано в работе [2]. Данные получены при больших и умеренных деформациях, однако здесь не рассматриваются амплитудные и другие нетипичные эффекты. Изучение нелинейных эффектов в сейсмике показало возможность их действия даже при малых деформациях [4, 8]. Эти работы дали толчок к дальнейшему изучению и поиску физических причин этих эффектов.

Обзор по амплитудной зависимости скоростей волн и затухания [26] представляет эксперименты, выполненные на образцах пород при гармонических колебаниях, и теоретические положения. Большинство данных указывает на уменьшение скорости волны и увеличение затухания при увеличении амплитуды [23; 31, 34]. Немногочисленные данные для пород показывают, наоборот, увели-

чение скорости волны и уменьшение затухания волны при увеличении амплитуды [20; 37]. Возможность нестандартного поведения скоростей волн была обоснована в теоретических работах [24; 20; 18]. Здесь показано, что уменьшение или увеличение модуля упругости происходит в соответствии с положительным или отрицательным характером кривизны диаграммы  $\sigma(\epsilon)$ .

Имеются немногочисленные полевые эксперименты по амплитудной зависимости скоростей волн, которые проведены в подпочвенном слое в неглубоких ямках или на берегу водоема [37]. Записи показывают, что с увеличением амплитуды сигнала скорость волны может как увеличиваться, так и уменьшаться. Имеет место также остаточный гистерезис скоростей волн, что свидетельствует о необратимых деформациях, вызванных сейсмической волной. Необычные данные по амплитудной зависимости получены также в лабораторных экспериментах [7]. Установлено, что в сухом и водонасыщенном песчанике в ультразвуковом диапазоне частот параметр затухания является более чувствительным к вариации амплитуды, чем скорость волны.

Данные указывают, что нестандартные эффекты обусловлены дефектностью пород, микро-неоднородностью, наличием тонких пленок, микротрещин, сложностью фазового состава. Эксперименты с использованием современной аппаратуры для регистрации волнового процесса и электронной микроскопии это подтверждают [19]. Например, данные

для кристаллического оливина показывают влияние нанометровых межзеренных соединений на параметр затухания поперечной волны. Эти межзерновые контакты имеют аномальные значения модуля упругости и вызывают необычные трансформации параметра затухания  $Q^{-1}(\omega)$ . Некоторые теоретические подходы и экспериментальные работы также выполнены в этом направлении [35; 11; 36].

Целью статьи является установление проявлений скачкообразной прерывистой неупругости в породах, вызванных сейсмической волной, и сопоставление этих данных с результатами квазистатических экспериментов и других новейших исследований.

#### Методика и техника эксперимента

Эксперименты проводились на Быстровском полигоне в Новосибирской области. Верхняя часть разреза (ЗМС) является относительно однородной (отсутствуют отражающие границы) и сложена из суглинков мощностью несколько десятков метров. Суглинки состоят из песка, ила и глины в концентрации около 40–15–45 %, соответственно. Размер глинистых частиц и песчаных зерен составляет от пяти до десятков микрометров. Суглинки до глубины ~3 м относительно сухие, до ~8,5 м – частично водонасыщенные, а далее полностью водонасыщенные. Скорость продольной волны в сухих и частично насыщенных суглинках составляет  $V_p = 240–500$  м/с, а в полностью насыщенных –  $V_p \approx 1500$  м/с.

Источник излучения располагался в шурфе глубиной около 1 м. Вблизи источника на расстоянии 0,4–1 м располагался первый приемник сигналов. Второй приемник размещался в скважине на глубине 1 м и на расстоянии от источника 6 или 14 м. Источник состоит из набора пьезоэлектрических дисков. Преобладающая частота излучаемого импульса в ближнем приемнике ~1100–3300 Гц, а в дальнем приемнике ~120–340 Гц. Излучение осуществляется че-

рез упругую оболочку с жидкостью, контактирующую со стенкой скважины. Пьезоэлектрический приемник давления контактирует со стенкой скважины аналогичным образом, что обеспечивает хороший контакт со средой. Сейсмическая запись – это напряжение в функции времени,  $\sigma(t)$ , время квантования  $t_{\text{квант}} = 20$  мкс и  $t_{\text{квант}} = 125$  мкс. Шаг квантования амплитуды ( $A_{\text{квант}}$ ) в АЦП составляет 78 мВ. Амплитудные значения в вольтах были преобразованы в величины механического напряжения, используя коэффициент преобразования  $K_{\text{пр}} = 100 \mu \text{ В/Па}$ . Приемник сигналов имеет предусилитель с коэффициентом усиления  $K = 100$ . Сигналы в цифровой форме записывались на компьютер. Амплитуда входного сигнала изменялась дискретно от минимума до максимума:  $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow A_4$ . Амплитуда возрастает как  $A_2/A_1 = 1,5$ ;  $A_3/A_1 = 2,0$ ;  $A_4/A_1 = 2,5$ . На расстоянии до 14 м от источника напряжение в среде составляет приблизительно единицы-десятки паскалей, а диапазон деформаций  $\sim 10^{-8}–10^{-6}$ . Это малые деформации, находящиеся ниже условного предела упругости.

#### Результаты и обсуждение

Анализ сейсмических записей проводился с использованием цифрового высоко разрешающего отображения сигнала в увеличенном масштабе. Отображение получено соединением всех точек квантования ( $t_{\text{квант}}$ ) цифровых амплитудных значений на трассе прямолинейными отрезками (без сглаживания). Такое представление сигнала позволяет детально рассмотреть динамический процесс, т.е. процесс развития напряжения (деформации) во времени. Иллюстрации приводятся как в аналоговом, так и цифровом отображении.

#### Результаты

На рис. 1 представлены шесть одновременно полученных записей сигналов в аналоговом виде, зарегистрированных на трех величинах амплитуды ( $A_1, A_2, A_3$ ). Из них три трассы – это записи первого (ближнего к ис-

точнику) приемника, установленного в скважине на глубине 1 м, и три трассы, записанные вторым приемником, находящимся в скважине на глубине 6 м в 1 м от источника.

Рассмотрение записей в цифровом отображении показывает следующее. Ввиду невозможности размещения всей записи на одном рисунке, она иллюстрируется отдельными частями. На рис. 2 показаны участки записей первого полупериода импульса, зарегистрированного вблизи источника *a* и импульса – на глубине 6 м (ниже источника) *б*. Сравнение записей *a* и *б* показывает их качественное различие. На всех амплитудах профиль первичного сигнала  $\sigma_s(t)$  довольно гладкий. Профиль  $\sigma_\gamma(t)$  имеет осложнения в виде плато *1* различной протяженности, локального падения напряжения *2* (помечены пунктирным овалом) и участков резкого изменения крутизны фронта волны *3* (помечены стрелками). Здесь крутизна фронта в течение одного  $t_{\text{квант}}$  изменяется в 9 раз. Перечисленные осложнения имеют здесь значительное распространение.

На рис. 3 показаны участки записей второго (положительного) полупериода ближнего импульса *a* и аналогичного дальнего полупериода *б*, зарегистрированного на глубине 6 м. Сравнение этих записей дает такой же результат, который был описан выше. Первая и повторная записи на одной и той же величине амплитуды  $A_2$ , зарегистрированные дальним приемником, показаны на рис. 4. Эти импульсы в аналоговой форме представлены на рис. 4, *a*. Детальную картину в цифровом отображении можно видеть на трех интервалах записи, где участок *б* представляет запись первого минимума, участки *в* и *г* – это фрагменты восходящего и нисходящего фронта импульса соответственно. Здесь имеют место те же нестандартные проявления и наблюдаются те же самые нюансы между первой и повторной записями, которые описаны выше. Падение напряжения заменяется полочкой (в рис. 4 помечено стрелками в прямоугольнике). Имеются участки фронта импульса, которые свободны от нестандартных проявлений (рис. 4, *г*).

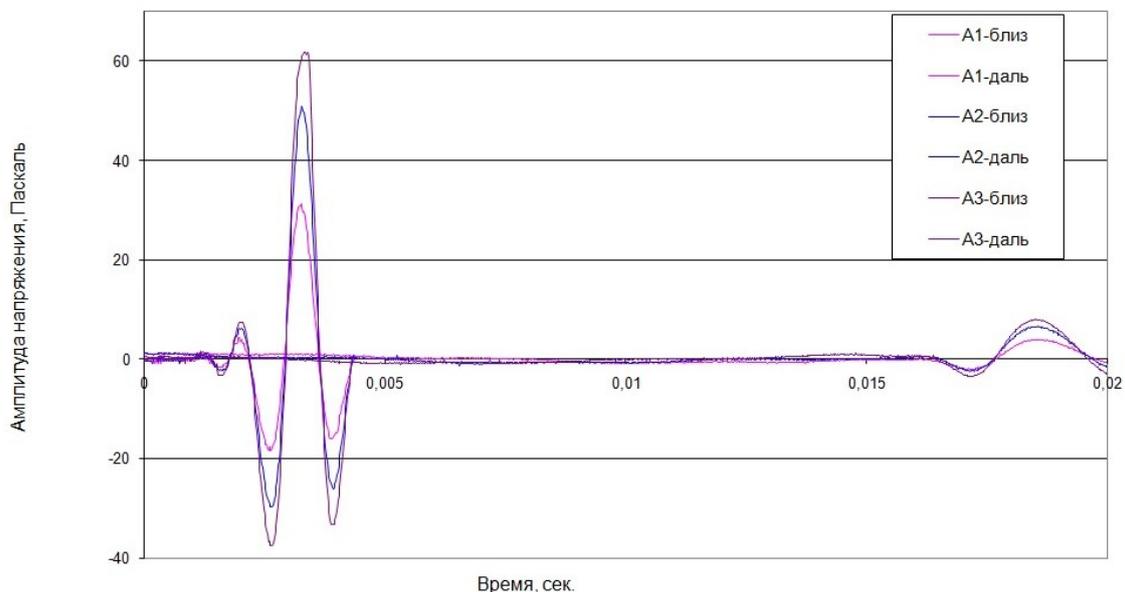


Рис. 1. Аналоговые записи сигналов на трех величинах амплитуды ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ), полученные вблизи от источника и на удалении от него

Fig. 1. Seismic response analog records at three values of amplitudes ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ) obtained near the source (pulse emitter) and at a distance from it

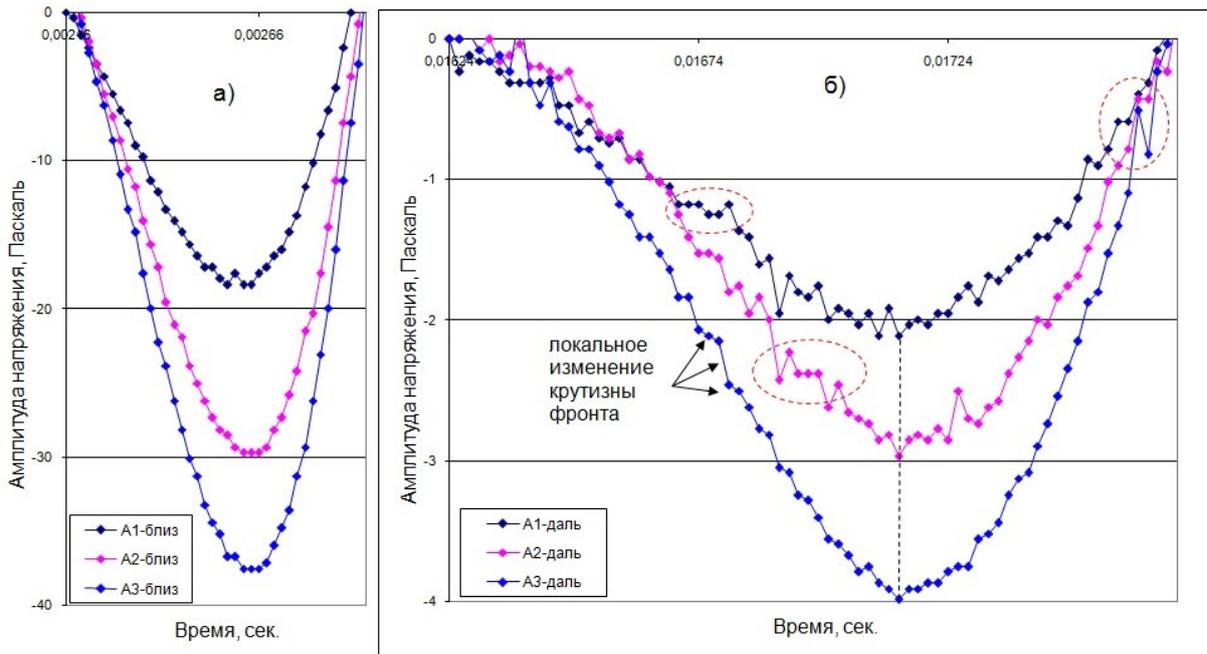


Рис. 2. Участки записей первого полупериода ближнего к источнику импульса (а) и импульса, зарегистрированного на глубине 6 м (б)

Fig. 2. Sections of the records of the first semiperiod of the pulse closest to the source (a) and the pulse recorded at a depth of 6 m (b)

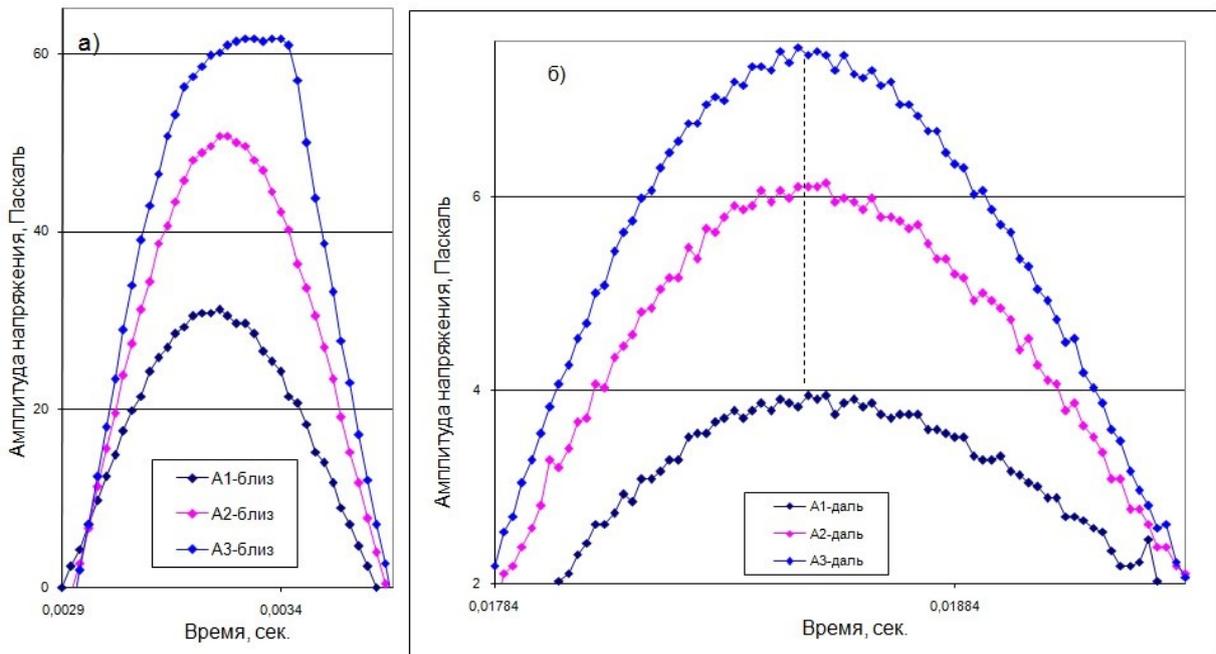
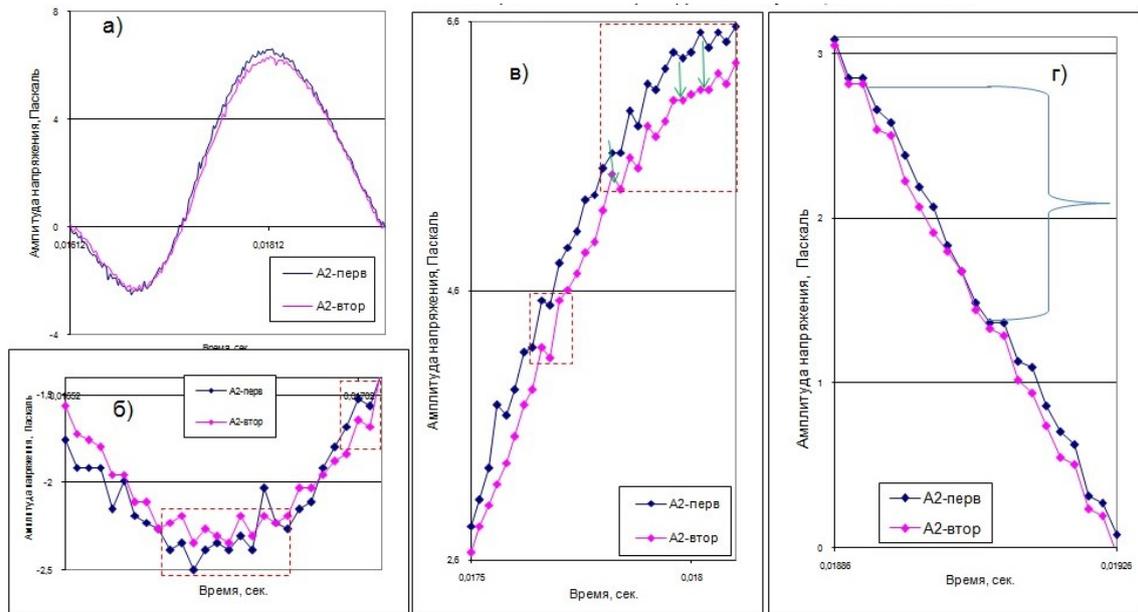


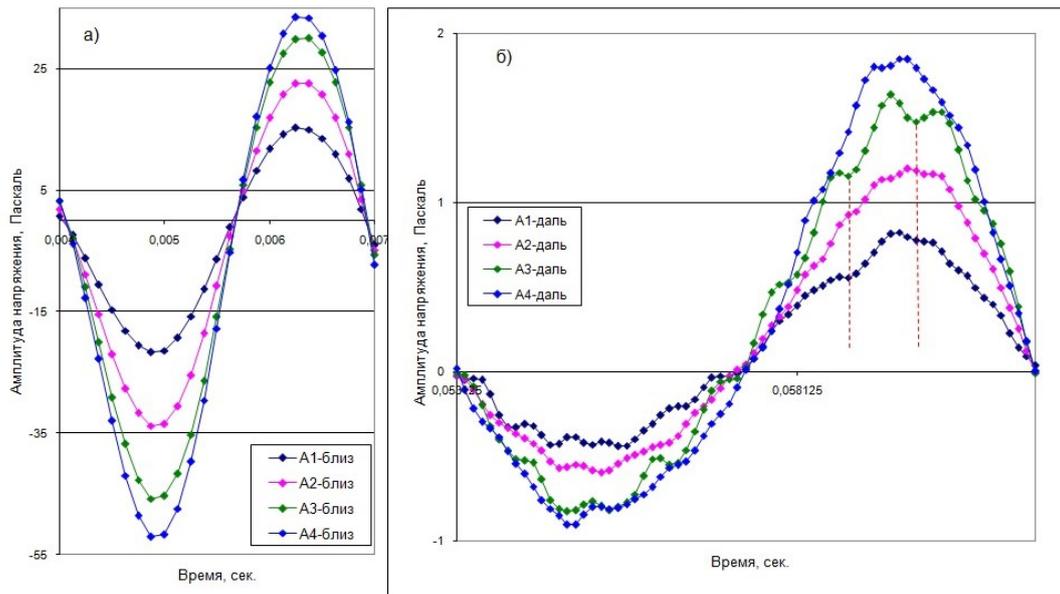
Рис. 3. Участки записей положительного полупериода ближнего импульса (а) и аналогового полупериода импульса, зарегистрированного на глубине 6 м (б)

Fig. 3. Sections of the records of the positive semiperiod of the pulse closest to the source (a) and the analog semiperiod of the pulse recorded at a depth of 6 m (b)



**Рис. 4. Первая и повторная записи на одной и той же величине амплитуды ( $A_2$ ), зарегистрированные дальним приемником:**  
*a* – импульс в аналоговой форме; *b* – первый минимум; *c, d* – фрагменты восходящего и нисходящего фронтов импульса, соответственно

**Fig. 4. The first and repeated records at the same amplitude ( $A_2$ ), recorded by the far receiver tool:**  
*a* – the analog pulse record; *b* – the first minimum; *c, d* – fragments of the pulse ramp and downgoing front, respectively



**Рис. 5. Импульсы напряжения, зарегистрированные ближним к источнику приемником (*a*) и дальним приемником (*b*), расположенным в 1 м скважине на расстоянии 14 м от источника**

**Fig. 5. Stress pulses recorded by the receiver tool closest to the source (*a*) and the far receiver (*b*), located in 1-m borehole at a distance of 14 m from the source**

На рис. 5 показаны записи ближнего приемника *a* и дальнего приемника *b*, расположенных на расстоянии 1 и 14 м от источника. Профиль волны вдали от источника на всех амплитудах осложнен плато и участками падения напряжения. Падающий фронт по-

ложительного полупериода почти не имеет осложнений. На рис. 6 показан пример записи импульса в 14 м от источника, где имеется наличие протяженного осложнения на восходящем фронте и его отсутствие на падающем фронте. В интервале времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  на

всех величинах амплитуды наблюдается уменьшение крутизны фронта, которое имеет структурированный характер. Здесь осложнения представлены в виде плато и падения напряжения пилообразной формы. Вне этого участка поведение профиля напряжения относительно монотонное. С увеличением величины амплитуды размах зубчато-подобных

проявлений возрастает. Начало падения напряжения происходит в точке **а**. Последующие падения происходят в точках времени **б** и **в**. Замечено, что «микро-фронт» последующего за точками **а**, **б**, **в** возрастания напряжения имеет тот же самый наклон к оси времени, т.е. одинаковую крутизну фронта (пунктирные линии параллельны).

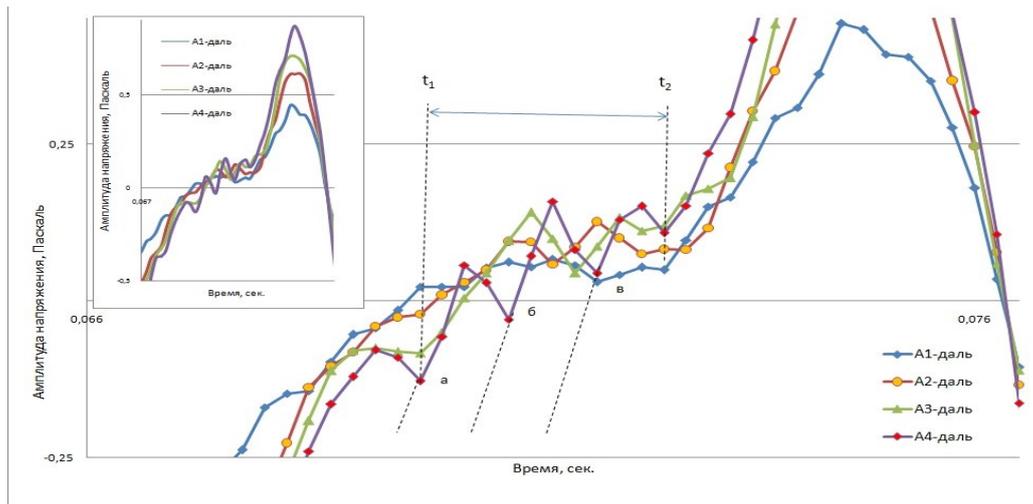


Рис. 6. Записи импульсов на четырех величинах амплитуды, зарегистрированные на расстоянии 14 м от источника и глубине 1 м

Fig. 6. Pulse records at four amplitude values recorded at a distance of 14 m from the source at a depth of 1 m

### Обсуждение

Изучение сейсмических записей  $\sigma(t)$  показало, что форма волны осложнена вставками в виде плато скачкообразного изменения амплитуды напряжения. Такой эффект предположительно отнесен к проявлению скачкообразной прерывистой неупругости, обусловленной микропластичностью горных пород. Многочисленные данные в физике твердого тела и материаловедении также указывают на механизм пластичности и скачкообразной деформации [1; 3; 6; 9; 14; 29; 27; 33]. Экспериментально показано, что процесс микропластичности по своей природе является амплитудно-зависимым [16, 37, 22, 25]. Прерывистое изменение амплитуды в форме сейсмического импульса аналогично остановке напряжения при достижении им критической величины  $\sigma_{cr}$  на кривой  $\sigma(\epsilon)$  [28]. Эффективная крутизна фронта импульса

формируется при совместном участии упругости и неупругости скачкообразного характера. Это совпадает с данными, полученными в материаловедении. Внезапное появление плато текучести на кривых  $\sigma(\epsilon)$ , названное как внезапный прыжок смещения при нагрузке и разгрузке («pop-in» и «pop-out event»), обнаружено во многих экспериментах [12; 21].

Дублирование записей, регистрация сигнала с накоплением обеспечивает достоверность измерений и снимает причастность помех произвольного характера. Повторная запись в пределах одного кванта времени не всегда совпадает с первой записью, как, например, показано на рис. 4. Это допустимо для записи с высокой детализацией в сложнопостроенном материале, таком как горная порода. Эффект одинакового наклона локального участка на фронте волны после локального падения напряжения (рис. 6, парал-

лельные пунктирные линии из точек **а**, **б**, и **в**) предсказан в работе [14]. Здесь показано, что после участков падения напряжения на диаграмме  $\sigma(\varepsilon)$  следуют участки упругой деформации, которые являются параллельными друг другу. Также известен переход плато в падение напряжения (их взаимная замена), который показан на рис. 4, в. Необходимо отметить, что восходящий фронт импульса на всех амплитудах имеет осложнения, в то время как падающий фронт свободен от них (см. рис. 6). Входной импульс всегда также является практически «чистым».

Скачкообразная деформация и плато напряжения обнаружены также в природных материалах, таких как кремний [32], стишовит [30], сапфир, диорит, графит, слюда и другие [10]. Кварцевые зерна и другие минералы присутствуют как в твердых породах, так и в слабоконсолидированной среде. С помощью электронной микроскопии показано, что монокристаллы кварца содержат включения различного химического состава микрометровых размеров. При распространении волны малой интенсивности кварц обладает признаками неклассической неупругости, что зарегистрировано на параметрах амплитудно-частотно-зависимого затухания с применением электронной микроскопии [22]. Примечательным является тот факт, что скачки деформации и плато были обнаружены в таком слабом материале, как наноглина (nanoclay) [15], а также в гипсе [13] и граните. Эти факты тоже можно расценить как косвенное подтверждение возможности проявления таких эффектов в слабо консолидированной среде. Теоретическое обоснование распространения сейсмических волн с привлечением процесса микропластичности сделано в работе [36]. Необходимо рассмотреть и другие возможные механизмы, как например, акустопластический эффект в металлах и сплавах [28]. В этой работе был проанализирован экс-

периментальный материал и предложены обоснования и подходы решения проблемы механизма скачкообразной неупругости в горных породах.

### **Заключение**

Новые данные о физике распространения сейсмических волн в реальной среде получены в этой работе. Имеется множество механизмов затухания сейсмических волн, однако механизм прерывистой (скачкообразной) деформации пока не включен в сейсмическую модель. Новые знания могут быть использованы для развития реологической модели и теоретических исследований. Вполне вероятно, что амплитудная зависимость скоростей волн и затухания связана с прерывистой неупругостью и, в частности, с микропластичностью. Об этом свидетельствует скачкообразный и стрессозависимый характер процесса деформации. Причиной трансформации формы волны может быть микропластичность.

Проблема природы микропластичности в геологических материалах остается пока открытой. Механизм неупругости может быть тем же самым, что и в твердых телах (движение дислокаций и других дефектов микроструктуры), или совершенно другим. Однако обнаруженные проявления сейсмопластичности в суглинках очень похожи на проявления микропластичности в обычных твердых телах. Этот вопрос требует дальнейшего прояснения. Микропластичность задевает малоизвестные неупругие процессы распространения малоамплитудных волн в природных материалах. Новые знания об упруго-неупругих процессах необходимы не только для развития теории, но и для получения более эффективных диагностических признаков при решении различных прикладных задач сейсмическими и акустическими методами.

## Библиографический список

1. Баранникова С. А., Надежкин М. В., Зуев Л. Б. О локализации пластической деформации при сжатии кристаллов LiF // *Физика твердого тела*. 2010. Том 52. Вып. 7. С. 1291–1294.
2. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках. М.: Издательство Московского университета, 1998. 320 с.
3. Головин Ю.И., Дуб С.Н., Иволгин В.И., Коренков В.В., Тюрин А.И. Кинетические особенности деформации твердых тел в нано-микрообъемах // *Физика твердого тела*. 2005. Том 47. Вып. 6. С. 961–973.
4. Гушин В. В., Павленко О. В. Изучение нелинейно-упругих свойств земных пород по сейсмическим данным // *Современная сейсмология. Достижения и проблемы*. М.: 1998. Т. 13
5. Кондратьев О. К. Сейсмические волны в поглощающих средах. М.: Недра, 1986. 176 с.
6. Лебедев С. В., Савич С. В. Параметры скачкообразной деформации сплава Al- 3% Mg в интервале температур (210–350) К. // *Вісник ХНУ*. 2010. № 915. Серія «Фізика». Вип. 14. С. 91–95.
7. Машинский Э. И., Амплитудно-зависимое затухание продольных и поперечных волн в сухом и насыщенном песчанике под давлением // *Геология и Геофизика*. 2009. Т. 50. С. 950–956.
8. Николаев А. В. Проблемы нелинейной сейсмологии. М.: Наука, 1987. 288 с.
9. Песчанская Н. Н., Смирнов Б. И., Шпейзман В.В. Скачкообразная микродеформация в наноструктурных материалах // *ФТТ*. 2008. Т. 50. Вып. 5. С. 815–819.
10. Barsoum M. W. MAX Phases: Properties of Machinable Ternary Carbides and Nitrides, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2013
11. Braccini S., *et al.* The maraging-steel blades of the Virgo super attenuator. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, 11, pp. 467–476.
12. Bradby J. E. and Williams J. S. Pop-in events induced by spherical indentation on compound semiconductors. *J. Mater. Res.*, 19, 2004, No. 1, pp. 380–386.
13. Brantut N., Schubnel A., and Y. Gueguen Damage and rupture dynamics at the brittle-ductile transition: The case of gypsum. *Journal of Geophysical Research*, 2011, Vol. 116, B01404.
14. Derlet P. M., Maaf R. Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model, arXiv:1205.1486v2 [cond- mat.mtrl-sci] 8 Feb 2013, 2013, pp. 1-33.
15. Dhakal H. N., Zhang Z. Y., Richardson M. O. W. Nanoindentation behaviour of layered silicate reinforced unsaturated polyester nanocomposites. *Polymer Testing*, 2006, 25, pp. 846-852.
16. Golovin I. S., Sinning H.-R., Goken J., Riehemann W. Fatigue-related damping in some cellular metallic materials. *Materials Science and Engineering*, 2004, A 370, pp. 537 - 541.
17. Guyer R. A., McCall K. R., Boitnott G. N. Hysteresis, Discrete Memory and Nonlinear Wave Propagation in Rock: a New Paradigm, *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74, 17, pp. 3491–3494.
18. Guyer R. A., Johnson P. A. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials *Physics Today* 52, 1999, 4, pp. 30–36.
19. Jackson I., Faul U. H., Fitz Gerald J. D., Tan B. H. Shear wave attenuation and dispersion in melt-bearing olivine polycrystals: 1. Specimen fabrication and mechanical testing // *J. Geophys. Res.*, 2004, v. 109, B06201, pp. 1–17.
20. Johnston D. H., Toksoz M. N., 1980. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research*, 85, pp. 937-942.
21. Lorenz D., Zeckzer A., Hilpert U., Grau P. Pop-in effect as homogenous nucleation of dislocations during nanoindentation. *Physical Review*, B 67, 172101, 2003.
22. Mashinskii E. I. Amplitude-frequency dependencies of Wave Attenuation in Single-Crystal Quartz: Experimental Study. *Journal of Geophysical Research*, 113, B11304, 2008.
23. Mavko G. M. Friction Attenuation: An Inherent Amplitude Dependence. *Journal of Geophysical Research* 84 (9), pp. 4769–4775, 1979.
24. McCall K. R., Guyer, R. A. Equation of State and Wave Propagation in Hysteretic Nonlinear Elastic Materials, *J. Geophys. Res.*, 1994, 99, B 12. 23,887–23,897.
25. Nishino Y., Asano, S., 1996. Amplitude-dependent internal friction and microplasticity in thin-film materials. *Journal de Physique IV*, 6, pp. 783–786.
26. Ostrovsky L. A., Johnson P. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *La Rivista del Nuovo Cimento* 24, 2001, 4, 7.
27. Qiang J. B., Xie G. Q., Zhang W., Inoue A., 2007. Unusual room temperature ductility of a Zr-based bulk metallic glass containing nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 90, 231907, pp. 1–3.

28. Sapozhnikov K. V., Vetrov V. V., Pulnev S. A., Kustov S. B. Acousto-pseudoelastic effect and internal friction during stress-induced martensitic transformations in Cu-Al-Ni single crystals. *Scripta Materialia.*, 1996, 34(10), pp. 1543–1548.
29. Smirnov B. I., Shpeizman, V. V., Peschanskaya, N. N., Nikolaev R. K., 2002. Effect of magnetic field on microplastic strain rate for C<sub>60</sub> single crystals. *Physics of the Solid State*, 44 (10), pp. 2009–2012.
30. Sheng-Nian Luo J. G. Swadener, Chi Ma, Oliver Tschauner, 2007. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite. *Physica*, B 390, 138–142.
31. Tutuncu, A.N., Podio, A.L., Sharma, M.M., 1994. An experimental investigation of factors influencing compressional- and shear-wave velocities and attenuations in tight gas sandstones. *Geophysics*, 59 (1), pp. 77–86.
32. Vodenitcharova T., Zhang L.C., 2004. A new constitutive model for the phase transformations in mono-crystalline silicon. *International Journal of Solids and Structures*, 41, pp. 5411–5424.
33. Wang W., 2003. Deformation behavior of Ni<sub>3</sub>Al single crystal during nanoindentation. *Acta Materialia*, 51, pp. 6169–6180.
34. Winkler, K.W., Nur, A., Gladwin, M., 1979. Friction and seismic attenuation in rock. *Nature* 274, pp. 528–531.
35. Xu H., Day S.M., Minster, J.-B.H., 1998. Model for Nonlinear Wave Propagation Derived from Rock Hysteresis. *Measurements Journal of Geophysical Research*, 103, (B 12), 29,915–29,929.
36. Yarushina V.M., Podladchikov Y.Y., 2010, Plastic yielding as a frequency and amplitude independent mechanism of seismic wave attenuation. *Geophysics*, 75, 3, pp. 51–63.
37. Zaitsev V. Yu., Nazarov V. E., Talanov V. I., 1999. Experimental Study of the self-action of seismoacoustic waves. *Acoustic Physics*, 45 (6), pp. 720–726.

## References

1. Barannikova S. A., Nadezhkin M. V., Zuev L. B. On localization of plastic deformation during compression of LiF crystals: *Solid State Physics*, 2010, v. 52, No. 7, pp. 1291-1294. (in Russ.)
2. Voznesensky E. A. Soil behavior under dynamic loads: Moscow, Moscow University Press, 1998, 320 p.
3. Golovin, Yu. I., Dub O. N., Ivolgin V. I., Korenkov V. V. Tyurin A. I. Kinetic features of deformation of solids in nano-micro-volumes, *Solid-state physics*, 2005, v. 47, No. 6, pp. 961-973. (in Russ.)
4. Gushchin V. V., Pavlenko, O. V. Study of nonlinear elastic properties of rocks by seismic data, *Modern Seismology, Achievements and Challenges: Moscow*, 1998, v. 13. (in Russ.)
5. Kondratyev O. K., 1986, *Seismic waves in absorbing media: Nedra Press, Moscow*, 176 p. (in Russ.)
6. Lebedev S. V., Savich S. V., Alloy Al-3%Mg intermittent deformation parameters in the temperature range (210–350) K: *Visnyk KhNU*, No. 915, "Physics" series, 2010, v. 14, pp. 91-95. (in Russ.)
7. Mashinsky E. I. Amplitude-dependent attenuation of longitudinal and transverse waves in dry and saturated sandstone under pressure: *Geology and Geophysics*, 2009, v. 50, pp. 950-956. (In Russ.)
8. Nikolaev A. V. Problems of nonlinear seismic: Moscow, Nauka Press, 1987, 288 p. (in Russ.)
9. Peschanskaya N. N., Smirnov B. I., Shpeizman V. V. Hopping microdeformation in nanostructured materials: *FTT*, 2008, v. 50, No. 5, pp. 815-819. (in Russ.)
10. Barsoum M. W. MAX Phases: Properties of Machinable Ternary Carbides and Nitrides, Wiley-VCH Verlag GmbH, 2013.
11. Braccini S., *et al.*. The maraging-steel blades of the Virgo super attenuator. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, 11, pp. 467–476.
12. Bradby J. E. and Williams J. S., 2004, Pop-in events induced by spherical indentation in compound semiconductors. *J. Mater. Res.*, 19. No 1, pp. 380–386.
13. Brantut N., Schubnel A., and Y. Gueguen, 2011. Damage and rupture dynamics at the brittle-ductile transition: The case of gypsum. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, B01404.
14. Derlet P. M., Maaf R., 2013, Micro-plasticity and intermittent dislocation activity in a simplified micro structural model, arXiv:1205.1486v2 [cond- mat.mtrl-sci] 8 Feb 2013, pp. 1 - 33.
15. Dhakal H. N., Zhang Z. Y., Richardson M.O.W., 2006. Nanoindentation behaviour of layered silicate reinforced unsaturated polyester nanocomposites. *Polymer Testing*, 25, pp. 846 – 852.
16. Golovin I. S., Sinning H.-R., Goken J., Riehemann W., 2004. Fatigue-related damping in some cellular metallic materials. *Materials Science and Engineering*, A 370, p. 537 - 541.
17. Guyer R. A., McCall K. R., Boitnott G. N., 1995. Hysteresis, Discrete Memory and Nonlinear Wave Propagation in Rock: a New Paradigm, *Phys. Rev. Lett.*, 74, 17, pp. 3491–3494.
18. Guyer R. A., Johnson P. A., 1999. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials *Physics Today* 52, 4, pp. 30–36.

19. Jackson I., Faul U. H., Fitz Gerald J. D., Tan B. H. Shear wave attenuation and dispersion in melt-bearing olivine polycrystals: 1. Specimen fabrication and mechanical testing // *J. Geophys. Res.*, 2004, v. 109, B06201, pp. 1–17.
20. Johnston D. H., Toksoz M. N., 1980. Thermal cracking and amplitude dependent attenuation. *Journal of Geophysical Research*, 85, pp. 937 - 942.
21. Lorenz D., Zeckzer A., Hilpert U., Grau P., 2003, Pop-in effect as homogenous nucleation of dislocations during nanoindentation. *Physical Review*, B 67, 172101.
22. Mashinskii E. I., 2008. Amplitude-frequency dependencies of Wave Attenuation in Single-Crystal Quartz: Experimental Study. *Journal of Geophysical Research*, 113, B11304.
23. Mavko G. M., 1979. Friction Attenuation: An Inherent Amplitude Dependence. *Journal of Geophysical Research* 84 (9), pp. 4769–4775.
24. McCall K.R., Guyer, R. A., 1994. Equation of State and Wave Propagation in Hysteretic Nonlinear Elastic Materials, *J. Geophys. Res.*, 99, B 12. 23,887–23,897.
25. Nishino Y., Asano, S., 1996. Amplitude-dependent internal friction and microplasticity in thin-film materials. *Journal de Physique IV*, 6, pp. 783–786.
26. Ostrovsky L. A., Johnson, P. A., 2001. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials. *La Rivista del Nuovo Cimento* 24, 4, 7.
27. Qiang J. B., Xie G. Q., Zhang W., Inoue A., 2007. Unusual room temperature ductility of a Zr-based bulk metallic glass containing nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 90, 231907, pp. 1–3.
28. Sapozhnikov K. V., Vetrov V. V., Pulnev S. A., Kustov S. B., 1996. Acousto-pseudoelastic effect and internal friction during stress-induced martensitic transformations in Cu-Al-Ni single crystals. *Scripta Materialia*, 34 (10), p. 1543–1548.
29. Smirnov B. I., Shpeizman V. V., Peschanskaya, N. N., Nikolaev R. K., 2002. Effect of magnetic field on microplastic strain rate for C<sub>60</sub> single crystals. *Physics of the Solid State*, 44 (10), pp. 2009–2012.
30. Sheng-Nian Luo J.G. Swadener, Chi Ma, Oliver Tschauner, 2007. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite. *Physica*, B 390, 138–142.
31. Tutuncu, A.N., Podio, A.L., Sharma, M.M., 1994. An experimental investigation of factors influencing compressional- and shear-wave velocities and attenuations in tight gas sandstones. *Geophysics*, 59 (1), pp. 77–86.
32. Vodenitcharova T., Zhang L.C., 2004. A new constitutive model for the phase transformations in monocrystalline silicon. *International Journal of Solids and Structures*, 41, pp. 5411–5424.
33. Wang W., 2003. Deformation behavior of Ni<sub>3</sub>Al single crystal during nanoindentation. *Acta Materialia*, 51, pp. 6169–6180.
34. Winkler, K.W., Nur, A., Gladwin, M., 1979. Friction and seismic attenuation in rock. *Nature* 274, pp. 528–531.
35. Xu H., Day S.M., Minster, J.-B.H., 1998. Model for Nonlinear Wave Propagation Derived from Rock Hysteresis. *Measurements Journal of Geophysical Research*, 103, (B 12), 29,915–29,929.
36. Yarushina V.M., Podladchikov Y.Y., 2010, Plastic yielding as a frequency and amplitude independent mechanism of seismic wave attenuation. *Geophysics*, 75, 3, pp. 51–63.
37. Zaitsev V. Yu., Nazarov V. E., Talanov V. I., 1999. Experimental Study of the self-action of seismoacoustic waves. *Acoustic Physics*, 45 (6), pp. 720–726.