

УДК 550.834

**ПРОЯВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МИКРОПЛАСТИЧНОСТИ
ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПРОДОЛЬНОЙ ВОЛНЫ В ГОРНОЙ ПОРОДЕ**

Э. И. Машинский

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
E-mail: MashinskiiEI@ipgg.sbras.ru,
просп. Академика Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090, Россия*

Описаны эффекты локальной микропластической неупругости при распространении продольной сейсмической волны частотой 240 – 1000 Гц в суглинках в пространстве между двумя неглубокими скважинами. Импульсный пьезоэлектрический излучатель размещался в одной скважине, а аналогичный приемник — в другой. Проявления микропластичности на сейсмической записи представлены в виде ступенчатого изменения амплитуды в течение времени и встроенных плато длительностью единицы – десятки микросекунд. Плато создают краткосрочное прерывание упругого процесса, временную задержку, которая зависит от амплитуды сигнала. В результате этого процесса изменяется время первого вступления, происходит трансформация формы волны. Микропластичность, предположительно, обусловлена концентрацией напряжений на различных дефектах. Результаты могут быть полезными для решения прикладных задач в горном деле и сейсмике.

Локальная неупругость, динамическая микропластичность, задержка времени и деформации, неупругие сейсмические параметры, амплитудная зависимость скоростей волн и затухания

Горные породы имеют неоднородное блочно-иерархическое строение, которое оказывает значительное влияние на кинематические и динамические характеристики акустических и сейсмических волн [1, 2]. В настоящее время интенсивно ведутся теоретические и экспериментальные работы по изучению распространения упругих волн в породах с блочным строением [3–9]. В такой среде при импульсном воздействии распространяются волны маятникового типа. Низкочастотные волны по сравнению с высокочастотным волновым пакетом распространяются со значительно меньшей скоростью, чем волны в отдельных блоках. Масштабы блочной структуры простираются от размеров кристаллических зерен до блоков горного массива, разделенных разломами разной величины. Как зерна, так и блоки связаны между собой различными пленками и прослойками, обладающими существенно более слабыми механическими свойствами и аномальными неупругими характеристиками. Неупругие свойства горных пород определяют механизмы затухания волн и до настоящего времени изучены недостаточно.

Изучение неупругости пород и физических механизмов распространения и затухания сейсмических волн до сих пор является актуальной задачей. Современный подход в ее решении опирается на новые знания о неупругости горных пород, поскольку именно неупругие процессы формируют специфические особенности кинематических и динамических характеристик

волн. Известная вязкоупругая модель стандартного линейного тела хорошо описывает дисперсию и релаксацию, но эта модель не может объяснить, например, амплитудную зависимость скоростей волн и затухания. В экспериментах на консолидированных породах, извлеченных с больших глубин, при малых деформациях установлена важная особенность, которая заключается в том, что при увеличении амплитуды деформации наблюдается более сложное поведение скоростей волн и затухания [10–14].

Локализация деформации в твердых телах происходит на разных структурных уровнях и характерна для пластической деформации [15]. Наиболее известна макролокализация, которая проявляется в виде резких спадов напряжения в течение времени. Однако имеются также данные, показывающие скачкообразное поведение напряжения и деформации на микроуровне [16]. Скачкообразные неупругие процессы во многих твердых телах связаны с микропластичностью. Микропластичность горных пород обнаружена в квазистатических экспериментах на образцах пород различного литологического состава и менее известна в науках о Земле [17–21]. Процесс микропластичности в отличие от макропластичности происходит ниже предела упругости и проявляется как “включение” пластичности микроскопического масштаба в упругой области деформирования в локализованных областях горной породы. Локальный деформационный механизм в сильно неоднородных структурах активизирует процесс кристаллической пластичности как в микро-, так и в макромасштабе [22]. Изучение процессов необратимого деформирования является полезным для многих областей геомеханики, например при оценке времени устойчивого состояния целиков и некоторых параметров готовящегося сейсмического события [23, 24].

Экспериментальные данные, полученные при изучении амплитудной зависимости скорости продольной волны во внутренних точках среды, положили начало изучению локальной неупругости [25]. Первая оценка проявлений динамической микропластичности с применением высокоразрешающей записи сейсмического сигнала сделана в работе [26]. Дальнейшее описание эффекта микропластичности, инициированного сейсмической волной, представлено в [27]. Отметим, что автор не исключает возможность другого механизма, аналогичного проявлению микропластичности. В представленной статье проведен расширенный анализ полевых экспериментальных данных и сделаны вытекающие из него выводы.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на Быстровском полигоне в Новосибирской области. Верхняя часть разреза (зона малых скоростей — ЗМС) относительно однородная 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 5 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 $V_p = 240 - 250$ м/с, а в полностью насыщенных — $V_p \approx 1500$ м/с.

Импульс продольной волны распространялся между двумя скважинами (глубиной 12 м и 110 мм в диаметре), расположенными на расстоянии 7 м друг от друга. Излучатель размещался в первой скважине, а приемник — во второй на глубине от 2 до 10 м. Основные записи сделаны при размещении источника и приемника на одной и той же глубине (6 и 10 м). Более подробное описание дано в работе [25].

Источник состоял из набора пьезоэлектрических дисков. Излучение осуществлялось через упругую оболочку с жидкостью, контактирующую со стенкой скважины. Пьезоэлектрический приемник давления контактировал со стенкой скважины аналогичным образом и имел хороший контакт со средой. Преобладающие частоты импульсов, зарегистрированные на разных глубинах, находились в диапазоне 240–1000 Гц. Сигналы представляли запись амплитуды напряжения в функции времени $\sigma(t)$. Запись проводилась на времени квантования $t_{\text{квант}} = 8$ и 40 мкс для сигналов высокой и малой интенсивности соответственно. Шаг квантования амплитуды $A_{\text{квант}}$ АЦП равен 78 мкВ. Амплитудные значения в вольтах преобразованы в величины механического напряжения с помощью коэффициента преобразования $K_{\text{пр}} = 100 \text{ мВ/Па}$. Приемник сигналов имел предусилитель с коэффициентом усиления $K = 100$. Сигналы в цифровой форме записывались на компьютер. Амплитуда сигнала изменялась дискретно: $A_{1\text{-вверх}} \rightarrow A_{2\text{-вверх}} \rightarrow A_{3\text{-вверх}} \rightarrow A_4 \rightarrow A_{3\text{-вниз}} \rightarrow A_{2\text{-вниз}} \rightarrow A_{1\text{-вниз}}$. Амплитуда возрастала как $A_2/A_1 = 1.4$, $A_3/A_1 = 2.1$, $A_4/A_1 = 2.7$. На расстоянии 7–11 м от источника напряжение в среде составляло приблизительно единицы–десятки паскалей, а диапазон деформаций $\sim 10^{-8} - 10^{-6}$. Это малые деформации, находящиеся ниже условного предела упругости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Анализ полученных записей проведен с использованием цифрового высокоразрешающего отображения сигнала в увеличенном масштабе. Такое отображение получено соединением всех точек квантования $t_{\text{кв}}$ цифровых амплитудных значений на трассе прямолинейными отрезками (без сглаживания), что позволяет детально рассматривать развитие динамического процесса во времени. Общая картина записи семи аналоговых трасс сигнала высокой интенсивности ($A_{1\text{-вверх}}$, $A_{1\text{-вниз}}$, $A_{2\text{-вверх}}$, $A_{2\text{-вниз}}$, $A_{3\text{-вверх}}$, $A_{3\text{-вниз}}$, A_4), записанных при расстановке источника и приемника сигнала на глубине 10 м, показана на рис. 1.

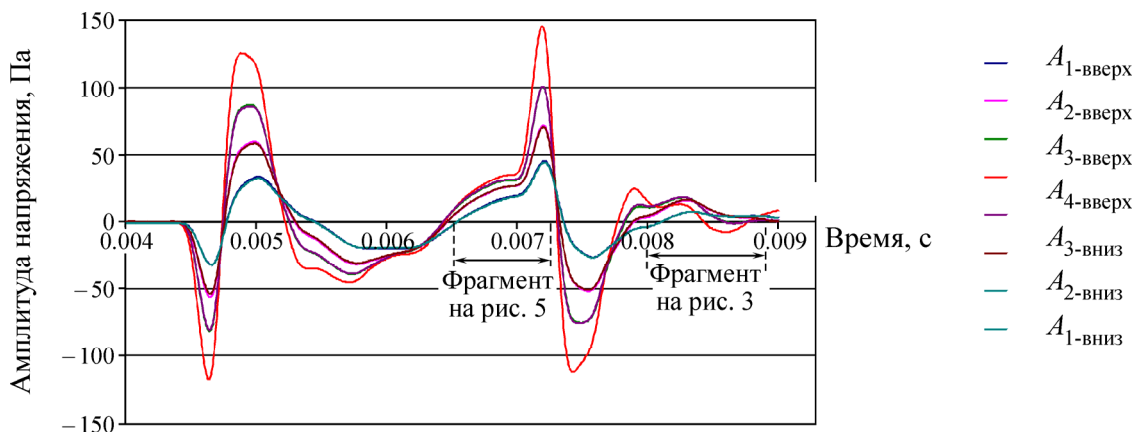


Рис. 1. Сейсмические записи для четырех восходящих амплитуд, зарегистрированные при расстановке “источник–приемник” на глубине 10 м. Записи для нисходящих амплитуд аналогичны

Сигнал низкой интенсивности, зарегистрированный при расстановке “источник–приемник” на глубине 6 м, представлен в аналоговом виде на вставке рис. 2. Первые вступления и фронты волн для четырех восходящих амплитуд показаны на этом рисунке в цифровом отображении. Как видно из записей, фронты волн осложнены многочисленными плато, которые прерывают нормальный ход амплитуды. Эти плато (постоянство напряжения) относятся к проявлениям неупругости в виде микропластичности. С увеличением амплитуды сигнала происходит слож-

ная трансформация фронта волны за счет встроенных плато. Здесь наибольшее изменение на фронте наблюдается для максимальной амплитуды A_4 . На этом фронте длительность (продолжительность) различных плато изменяется от 1 до 7 времен квантования (40–280 мкс). Необходимо отметить, что во всем рассматриваемом временном интервале ($\Delta t - A_4$), несмотря на присутствие плато, крутизна амплитуды упругих элементов сохраняется неизменной.

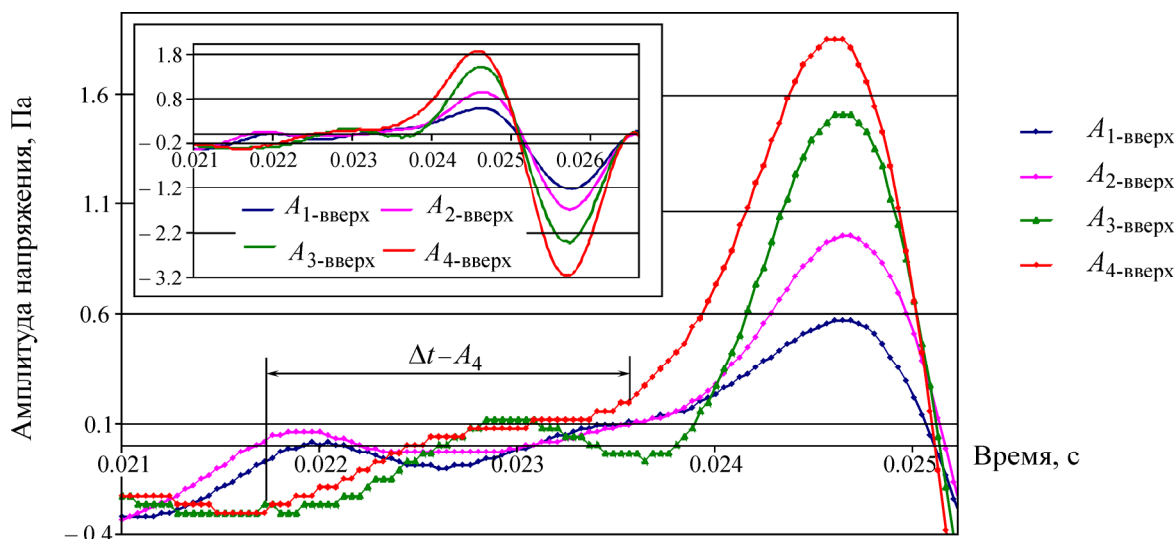


Рис. 2. Первые вступления импульсов для четырех восходящих амплитуд, зарегистрированные при расстановке “источник – приемник” на глубине 6 м. Аналоговая запись тех же импульсов показана на вставке

Прерывистый характер записи $\sigma(t)$ встречается также и в области больших времен регистрации. Такое поведение амплитуды расценено как проявление локальной неупругости, природа которой пока точно не установлена. Наиболее вероятной причиной данного явления может быть микропластичность пород, поскольку аналогичное ступенеобразное прерывание упругого деформирования наблюдалось на квазистатических диаграммах $\sigma(\varepsilon)$ именно за счет микропластичности [19, 21]. Подобный эффект локальной неупругости в слабokonсолидированной породе, вызванный сейсмической волной, назван проявлениями сейсмомикропластичности (СМП) [26, 27].

Более подробно рассмотреть проявления микропластичности и возможный механизм его действия можно на рис. 3. Здесь показан фрагмент сейсмической трассы (см. рис. 1), зарегистрированной при расстановке “источник – приемник” на глубине 10 м. Видно, что нормальный ход возрастания и уменьшения амплитуды в упругом режиме прерывается областью микропластичности, представленной встроенными горизонтальными площадками (плато). Эти площадки можно характеризовать как “вставки микротекучести” в ходе упругого процесса, которые определяют микрозадержку упругого деформирования. Таким образом, реальный импульс на восходящем и нисходящем фронтах осложнен наличием областей микропластичности. Эти плато затягивает фронт и тем самым уменьшает его крутизну на данном отрезке времени. Проявления микропластичности могут быть единичными, локальными и фронтальными. Первичная $A_{1\text{-вверх}}$ и повторная $A_{1\text{-вниз}}$ записи имеют хорошее совпадение по расположению плато и упругих элементов, что свидетельствует о достоверности полученного результата и снимает подозрение на ошибки АЦП и другие погрешности, имеющие произвольный характер. Кроме того, здесь крутизна фронта волны намного превышает чувствительность цифрового преобразователя.

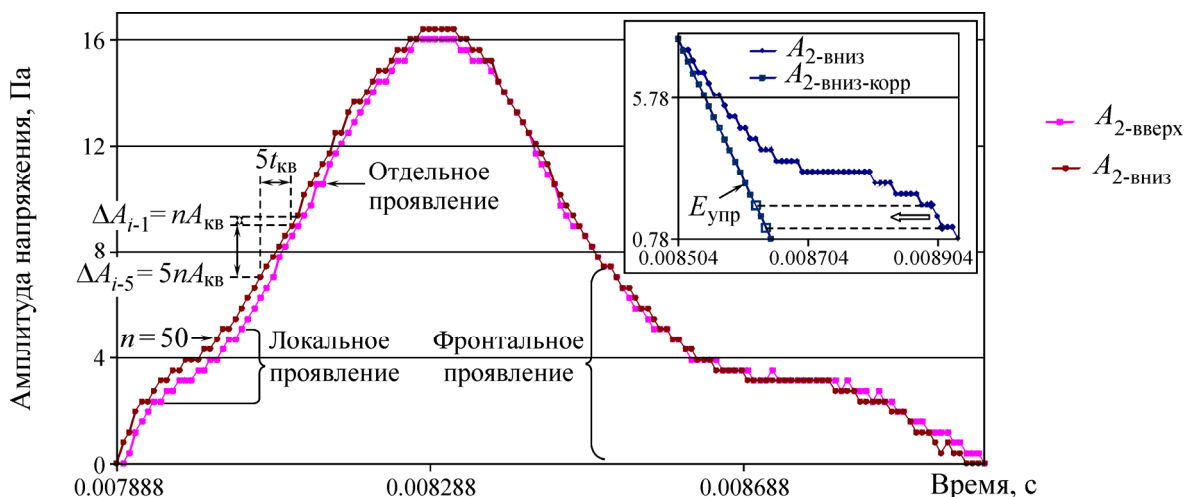


Рис. 3. Трансформация импульса амплитуды A_2 , вызванная процессом микропластичности (фрагмент помечен на рис. 1). Детальная картина переноса упругих элементов дана на вставке: представлены два способа определения крутизны амплитуды

Оценивать эффект СМП на записях, полученных при различной интенсивности сигнала, т. е. при различной скорости деформации, следует исходя из крутизны амплитуды $R_{A/t}$ [26], т. е. степени нарастания или убывания напряжения на любом участке записи $\sigma(t)$, привязанной к величинам квантования по амплитуде и времени. Крутизна — это изменение амплитуды на данном интервале времени: $R_{A/t} = \Delta A_i / t_{кв} = n A_{кв} / t_{кв}$, где ΔA_i — изменение амплитуды в течение определенного промежутка времени. Величина ΔA_i есть произведение числа n и шага квантования амплитуды $A_{кв}$. Число n представляет количество шагов $A_{кв}$ в ходе амплитуды в течение времени $t_{кв}$. При постоянной величине $A_{кв} / t_{кв}$ на записи число n определяет крутизну амплитуды. На рис. 3 показаны способы определения числа n (для единичного и пяти квантов $t_{кв}$).

С целью установления влияния плато на форму импульса выполнена простая операция “приведения к упругости” с использованием процедуры построения виртуального фронта импульса, которая показана на вставке рис. 3. В области микропластичности удалены все плато, затем сделано параллельное перемещение каждого “упругого элемента” назад по оси времени на величину, соответствующую изъятой задержке времени для каждого элемента. Можно сказать, что эта процедура и построение фронта $E_{упр}$ эквивалентна “восстановлению” упругого режима в области фронта. В результате сформирован виртуальный фронт $E_{упр}$, который оказался линейным. Его линейность объясняется тем, что в области микропластичности все упругие элементы имеют одинаковую крутизну (наклон к оси времени) $n = 50$.

Влияние плато на изменение фронта можно увидеть на рис. 4, где показана детальная картина совместного действия упругих и микропластических элементов на фрагменте записи с амплитудой A_2 . Эффективная крутизна фронта формируется под влиянием совместного действия упругих и микропластических элементов. При наличии на сейсмической трассе множества областей микропластичности, особенно протяженного характера, их влияние на трансформацию импульса может быть значительным. Искусственный импульс по сравнению с реальным должен быть более высокочастотным, что может указывать на возможное участие рассматриваемого процесса в затухании реального сигнала.

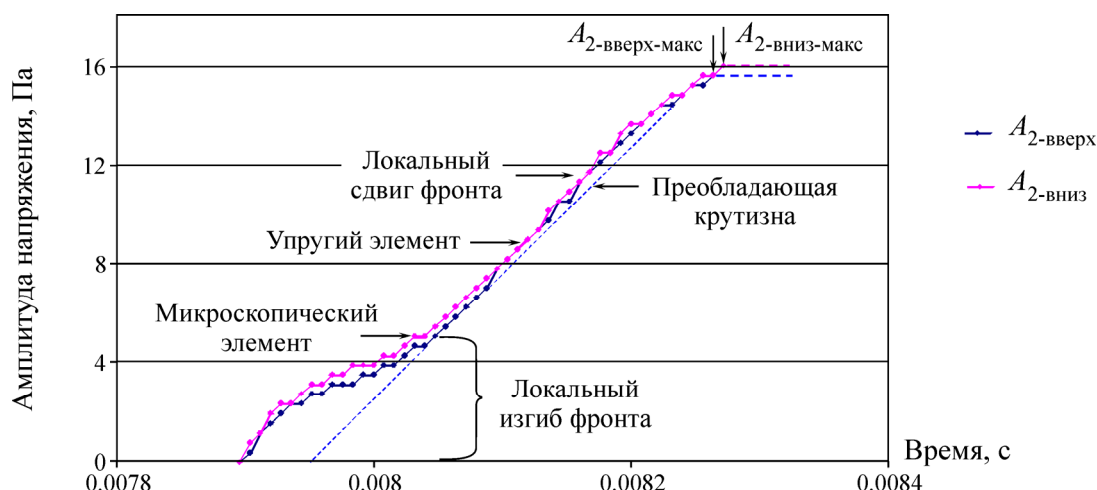


Рис. 4. Детальная картина совместного действия упругих и микропластических элементов на фрагменте записи с амплитудой A_2

Уменьшение крутизны фронта (более плавный медленный подъем или спад амплитуды напряжения) за счет локальной микропластической неупругости можно охарактеризовать как “ленивый” стресс. Об этом свидетельствуют многочисленные экспериментальные данные, полученные для различных твердых тел. Так, например, плато на диаграмме $\sigma(\varepsilon)$, переходящее в “ленивый” (медлительно возрастающий) стресс, обнаружено в эксперименте на образце металлического стекла с цирконием [28]. В наших экспериментах проявление “ленивого” стресса получено как на восходящем, так и на падающем участке фронта импульса. Типичное проявление этого эффекта на падающем фронте можно видеть на рис. 3. Здесь длительность плато составляет от 1 до 13 $t_{\text{кв}}$ (8–104 мкс). Удлинение фронта в этом временном интервале происходит только за счет плато, так как крутизна упругих элементов остается неизменной.

“Ленивый” стресс на восходящем фронте для четырех амплитуд представлен на рис. 5. С увеличением амплитуды крутизна фронта падает за счет возрастания количества микропластических элементов в этом временном интервале. Кривые восходящей и нисходящей амплитуды ($A_{1\text{-вверх}}$ и $A_{1\text{-вниз}}$ и т. д.) достаточно хорошо совпадают друг с другом. Детальная картина поведения амплитудных кривых показана на рис. 6. Полное совпадение обеих амплитудных кривых происходит только на отдельных участках интервала времени. Несовпадение амплитудных кривых наблюдается на участках фронта между указанными выше областями, т. е. между “узловыми точками” совпадения кривых. Фигуры несовпадения на участке между соседними узловыми точками имеют разнообразную форму: треугольник, восьмерка, параллелограмм в виде петли гистерезиса и т. д. Это свидетельствует о том, что деформирование в отдельных областях фронта при прямом и обратном ходе амплитуды происходит различным образом, включая микропластичность. Проявление микропластичности на восходящем и падающем фронте может различаться по характеру поведения, что объясняется различием источников активации, задействованных в том и другом случае. Такое различие ранее установлено при нагрузке и разгрузке образцов горных пород в квазистатическом режиме [19].

Таким образом, эксперименты показали, что упругий волновой процесс имеет прерывистый характер и осложнен встроенными в него элементами микропластичности. Термин микропластичность применен здесь на основе установленных ранее данных [19] и ввиду аналогичного проявления микропластичности в металлах, сплавах и других твердых телах [29, 30].

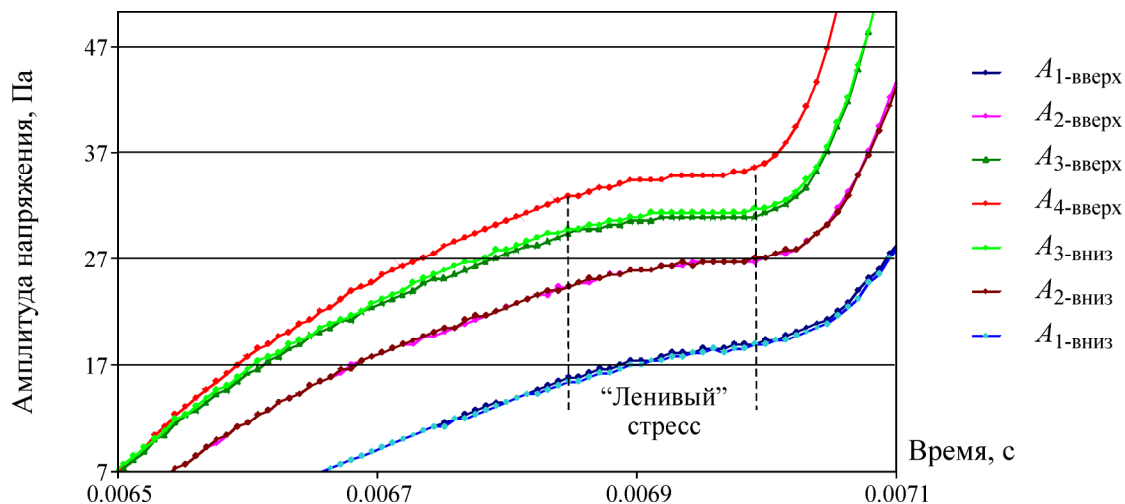


Рис. 5. Эффект “ленивого” стресса для четырех восходящих и трех нисходящих амплитуд в интервале времени $t = 0.0067 - 0.0071$ с (см. фрагмент трассы, рис. 1)

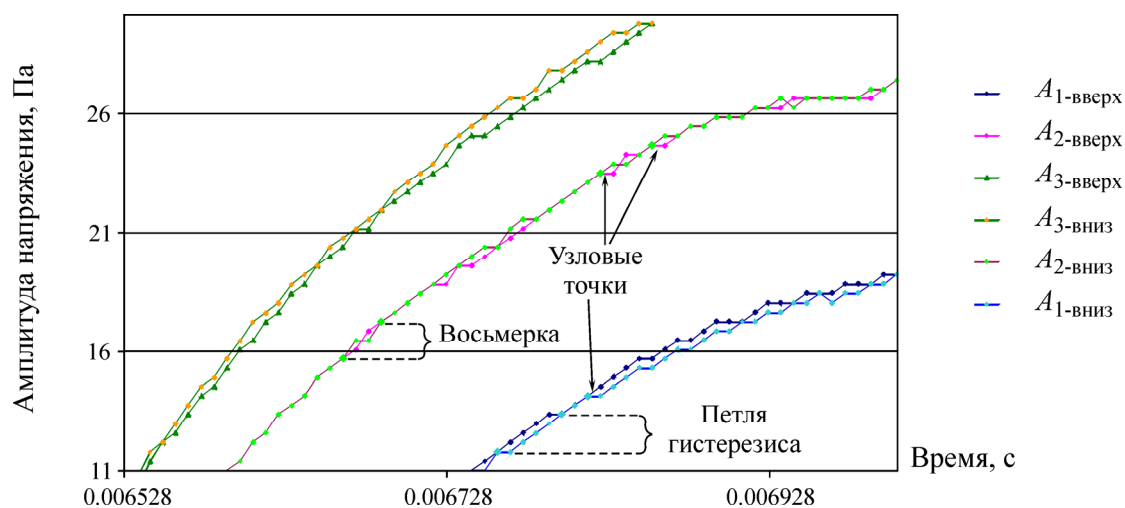


Рис. 6. Детальная картина поведения разноамплитудных кривых для восходящей и нисходящей амплитуд ($A_{1-вверх}$ и $A_{1-вниз}$ и т. д.)

Прерывистое изменение амплитуды импульса аналогично остановке напряжения (stress plateau) при достижении им критической величины σ_{cr} на кривой $\sigma(\varepsilon)$ [21, 31]. Область микропластичности, как правило, представляет собой чередование упругих элементов и плато. В большинстве случаев крутизна упругих элементов на этом участке сейсмической трассы и соответственно модуль упругости являются неизменными. При этом “эффективная” крутизна фронта формируется при совместном участии упругости и скачкообразной неупругости. Исследование показало, что при динамическом деформировании пород, помимо известных механизмов (упругость, вязкоупругость), может существовать не учитываемый ранее в горном деле и сейсмике механизм неупругости локального типа.

Следует отметить, что деформационные остановки и краткосрочная текучесть, вызванная микропластичностью, обнаружены, например, в монокристаллах C_{60} при действии магнитного поля на образец [32]. Скачкообразная деформация металлов и сплавов проявляется в виде ступеней (“лестничная” ползучесть) на кривых нагружения (эффект Савара – Массона) и в виде повторяющихся сбросов нагрузки на кривых деформирования с постоянной скоростью (эффект

Портевена – Ле Шателье) [33]. Внезапное появление плато текучести на кривых $\sigma(\varepsilon)$, названное внезапным прыжком смещения при нагрузке и разгрузке (pop-in и pop-out event), обнаружено во многих экспериментах [34, 35]. Аналогичный эффект встречается также в других природных материалах (кварц, стишовит, кремний, сапфир, диорит, графит, слюда) в диапазоне умеренных деформаций (около $10^{-4} - 10^{-3}$) [36]. Проявления микропластичности в суглинках обнаружены на значительно меньших деформациях ($\sim 10^{-8} - 10^{-5}$), что свидетельствует о более широком их распространении. Теоретические обоснования механизма затухания волн в породах с привлечением процесса микропластичности представлены в [37, 38]. Механизм затухания в горных породах намного сложнее, чем в твердых телах, что не исключает возможности действия гибридного механизма, например включающего известные механизмы и дополнительный механизм с микропластичностью [39]. Предложены также другие возможные механизмы, в частности акустопластический эффект в металлах и сплавах [31].

ВЫВОДЫ

В экспериментах при динамическом (волновом) деформировании массива между двумя неглубокими скважинами обнаружены проявления микропластической (скачкообразной) неупругости в суглинках, которые представлены на сейсмической записи в виде лестницеобразного изменения амплитуды в течение времени. Полученные результаты могут быть сведены к следующему:

- микропластичность оказывает влияние на динамические характеристики распространяющегося импульса: время вступления, длительность фронта, его форму;
- проявления динамической микропластичности имеют единичный, локальный и фронтальный характер;
- трансформация формы импульса происходит с участием элементов микропластичности, встроенных в упругий режим деформирования. Наиболее ярко это проявляется в виде эффекта “ленивого” стресса;
- величина амплитуды импульса влияет на характер и распределение элементов микропластичности на сейсмической трассе.

Обнаруженные эффекты могут быть использованы для развития реологической модели геоматериала и теоретических исследований на ее основе. Микропластический механизм может быть ответственным за амплитудную зависимость скоростей волн и затухания. Механизм такой неупругости может быть тем же самым, что и в твердых телах (движение дислокаций и других дефектов микроструктуры), или совершенно другим (квазимикропластичность). Этот вопрос требует дальнейшего изучения. Новые знания о нелинейно-неупругих процессах необходимы не только для развития теории, но также могут быть полезными в горном деле и при обнаружении более эффективных диагностических признаков, например литологического и микроструктурного характера, при решении различных прикладных задач сейсмическими и акустическими методами.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа v_{μ} // ДАН СССР. — 1993. — Т. 333. — № 4.

2. Садовский М. А. Естественная кусковатость горных пород // ДАН СССР. — 1979. — Т. 247. — № 4.
3. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010.
4. Айзенберг-Степаненко М. В., Шер Е. Н. Моделирование волновых явлений в структурированных средах // Физ. мезомеханика. — 2007. — Т. 10. — № 1.
5. Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н. Экспериментальная проверка одномерной расчетной модели распространения волн в блочной среде // ФТПРПИ. — 2005. — № 3.
6. Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н. О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5.
7. Александрова Н. И., Шер Е. Н., Черников А. Г. Влияние вязкости прослоек на распространение низкочастотных маятниковых волн в блочных иерархических средах // ФТПРПИ. — 2008. — № 3.
8. Шер Е. Н., Александрова Н. И., Айзенберг-Степаненко М. В., Черников А. Г. Влияние иерархической структуры блочных горных пород на особенности распространения сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2007. — № 6.
9. Александрова Н. И., Шер Е. Н. Распространение волн в двумерной периодической модели блочной среды. Ч. 1. Особенности волнового поля при действии импульсного источника // ФТПРПИ. — 2010. — № 6.
10. Машинский Э. И., Дьяков Г. Н. Амплитуднозависимое затухание импульсных сигналов в горных породах // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1999. — № 11.
11. Машинский Э. И., Кокшаров В. З., Нефедкин Ю. А. Амплитуднозависимые эффекты в диапазоне малых сейсмических деформаций // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40. — № 4.
12. Mashinskii E. I. Experimental study of the amplitude effect on wave velocity and attenuation in consolidated rocks under confining pressure, Journal of Geophysics and Engineering, 2005, 2.
13. Mashinskii E. I. Effect of Strain Amplitude on the Relaxation spectra of attenuation in the dry and saturated sandstone under pressure, Journal of Geophysics and Engineering, 2007, 4.
14. Mashinskii E. I. Amplitude-frequency dependencies of Wave Attenuation in Single-Crystal Quartz: Experimental Study, Journal of Geophysical Research, 2008, 113, B11304.
15. Песчанская Н. Н., Смирнов Б. И., Шпейзман В. В. Скачкообразная микродеформация в наноструктурных материалах // ФТТ. — 2008. — Т. 50. — № 5.
16. 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.
17. Машинский Э. И. Эффект Портевена–Ле Шателье в осадочных породах в сейсмическом диапазоне деформаций // Теория и практика вибросейсмического зондирования Земной коры. — Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР, 1988.
18. Машинский Э. И., Кочегаров Г. Г. Квазимикропластическая неупругость горных пород // ДАН. — 1992. — Т. 324. — № 6.
19. Машинский Э. И. Процессы квазимикропластичности и нелинейная сейсмика // Физика Земли. — 1994. — № 2.
20. Машинский Э. И., Кочегаров Г. Г., Кокшаров В. З., Чаплыгин В. Н. Экспериментальные исследования квазимикропластичности пород при деформации сжатием // Геология и геофизика. — 1994. — № 12.
21. Mashinskii E. I. Non-linear stress-strain relation in sedimentary rocks and its effect on seismic wave velocity, Geophysica (Finland), 2005b, 41 (1, 2).
22. Raphanel J., Dimanov A., Nazarova L. A., Nazarov L. A., and Artemova A. I. High temperature rheology of synthetic two-phase gabbroic aggregates: microstructural heterogeneities and local deformation mechanisms, Journal of Mining Science, 2010, 5.

23. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Эпов М. И., Ельцов И. Н. Нелинейные процессы эволюции геомеханических полей природных и техногенных объектов // Вестн. Нижегородского гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского. — 2011. — № 4 (2).
24. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Эпов М. И., Ельцов И. Н. Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
25. Машинский Э. И. Амплитудно-зависимые эффекты при распространении продольной сейсмической волны в межскважинном пространстве // Физика Земли. — 2007. — Т. 43. — № 8.
26. Mashinskii E. I. Seismo-microplasticity phenomenon in the rocks, Natural Science, 2010, 2 (3).
27. Mashinskii E. I. Microplasticity effect in low-velocity zone induced by seismic wave, Journal of Applied Geophysics, 2012, 83.
28. Qiang J. B., Xie G. Q., Zhang W., and Inoue A. Unusual room temperature ductility of a Zr-based bulk metallic glass containing nanoparticles, Applied Physics Letters, 2007, 90, 231907.
29. Nishino Y., Asano S. Amplitude-dependent internal friction and microplasticity in thin-film materials, Journal de Physique IV, 1996, 6.
30. Golovin I. S., Sinning H.-R., Goken J., and Riehemann W. Fatigue-related damping in some cellular metallic materials, Materials Science and Engineering, 2004, A 370.
31. Sapozhnikov K. V., Vetrov V. V., Pulnev S. A., and 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).
32. Smirnov B. I., Shpeizman V. V., Peschanskaya N. N., and Nikolaev R. K. Effect of magnetic field on microplastic strain rate for C60 single crystals, Physics of the Solid State, 2002, 44 (10).
33. Шибков А. А., Золотов А. Е., Желтов М. А. Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации алюминий-магниевого сплава АМг6 // ФТТ. — 2010. — Т. 52. — Вып. 11.
34. Bradby J. E., Williams J. S. Pop-in events induced by spherical indentaton ib compound semiconductors, J. Mater. Res., 2004, 19, No. 1.
35. Lorenz D., Zeckzer A., Hilpert U., and Grau P. Pop-in effect as homogenous nucleation of dislocations during nanoindentation, Physical Review, 2003, B 67, 172101.
36. Sheng-Nian Luo J. G., Swadener Chi Ma., and Oliver Tschauner. Examining crystallographic orientation dependence of hardness of silica stishovite, Physica, 2007, B 390.
37. Yarushina V. M., Podladchikov Y. Y. Micriscale yielding as mechanism for low-frequency imtrinsic seismic wave attenuation. 70th EAGE Conference & Exhibition – Rome, Italy, 9 – 12 June 2008.
38. Yarushina V. M., Podladchikov Y. Y. Plastic yielding as a frequency and amplitude independent mechanism of seismic wave attenuation, Geophysics, 2010, 75, 3.
39. Mashinskii, E. I. Nonlinear amplitude-frequency characteristics of attenuation in rock under pressure, Journal of Geophysics and Engineering, 2006, 3.

Поступила в редакцию 2/XII 2013