АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2009, том 55, № 2, с. 208–215

АКУСТИКА СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ АКУСТИКА

УДК 534-18, 534.232, 550.834, 550.32

НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТОВ МЕДЛЕННОЙ ДИНАМИКИ В НЕКОНСОЛИДИРОВАННЫХ СРЕДАХ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

© 2009 г. В. С. Авербах, А. В. Лебедев, А. П. Марышев, В. И. Таланов

Институт прикладной физики РАН

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова 46

E-mail: swan hydro.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 23.05.08 г.

Рассмотрена реакция неконсолидированной среды на сильное ударное воздействие. Характер релаксации среды контролировался по изменению фазовой скорости пробной волны Рэлея. Анализ частотной дисперсии волны Рэлея и ее зависимость от расстояния до источника позволили судить о размерах области пространства, где проявилось ударное воздействие. Сейсмоакустические измерения показали, что временная зависимость скорости волны Рэлея носит логарифмический характер.

PACS: 43.20.Jr; 43.35.Pt; 83.85.St;91.60.Hg

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа лежит в русле акустических исследований свойств природных сред, что нашло отражение в многочисленных работах (например, [1–6]). В последнее время наблюдается повышенный интерес к различным проявлениям структурной неоднородности природных материалов [1–9]. Одним из проявлений структурной неоднородности является так называемая "медленная динамика" [10–13], которая выражается в логарифмической ($\propto \ln t$, где t – время) релаксации деформации структурно-неоднородного материала после интенсивного воздействия. В работе [12] для объяснения подобного закона затухания была предложена феноменологическая модель каскадной релаксации состояний с различными энергетическими уровнями. В работах [13, 2] отмечалось, что логарифмический закон имел место как в процессе возбуждения микроконтактов одиночной трещины, так и в процессе релаксации возмущений. Для объяснения наблюдавшегося поведения предложен механизм термических микродеформаций.

Анализ материалов работ указывает на общий характер явлений медленной релаксации возмущений различной природы, что свойственно большинству материалов, имеющих внутреннюю структуру на микроскопическом уровне. Например, в [14, 15] аналогия между (микро)пластическими деформациями в твердом теле и намагниченностью используется для описания необратимых процессов в ферромагнетиках, где имеет место логарифмический закон убывания спонтанной намагниченности.

Неконсолидированные природные материалы, к которым относятся приповерхностные слои осадочных пород, представляют собой многофазные системы со сложно организованными внутренними связями [16]. Поэтому представляет интерес провести анализ отклика таких сред на сильные воздействия, которые в состоянии изменить равновесие фаз внутри природного композита. Рассматриваемая проблема имеет и прикладной аспект. Наличие процесса с логарифмической по времени зависимостью параметра, например, модуля сдвига, свидетельствует о неравновесности всей многофазной системы и нахождении ее в метастабильном состоянии. Обнаружение таких процессов на начальных этапах строительства инженерно-технических сооружений позволило бы снизить риск деформации всей конструкции по окончании строительства.

МЕХАНИЗМ, ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА "МЕДЛЕННУЮ" ДИНАМИКУ

Приведем известные из литературы сведения относительно логарифмических по времени процессов релаксации возмущений различной природы. Скорость изменения деформации $\dot{\varepsilon}$, связанная с дислокациями и дефектами, может быть представлена в виде соотношения Аррениуса (связь закона Аррениуса с процессами на микроскопическом уровне анализируется в [17]):

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(-\frac{\Delta G(\sigma)}{kT}\right), \qquad (1)$$

где $\Delta G(\sigma)$ равно свободной энергии активации Гиббса; σ – напряжение, действующее на дислокации; T – абсолютная температура и k – постоянная Больцмана. Предэкспоненциальный множитель $\dot{\varepsilon}_0$ предполагается независящим или слабо зависящим от напряжения и температуры [17].

В общем случае энергия $\Delta G(\sigma)$ может рассматриваться как феноменологическая усредненная величина, зависящая от внутренних (скрытых) переменных.

Макроскопическая пластическая деформация при различных условиях нагрузки может быть описана механическими уравнениями состояния. Во многих случаях (например, для простой деформации, деформации малой кривизны) существует однозначная связь между скоростью деформации, напряжением и величиной пластической деформации, и она не содержит функционалов [18]. В дифференциальной форме это соотношение может быть записано следующим образом [19]:

$$d\sigma = Md\varepsilon + \Lambda d(\ln\dot{\varepsilon}), \qquad (2)$$

где $M = (\partial\sigma/\partial\varepsilon)_\varepsilon$ — модуль жесткости; $\Lambda = (\partial\sigma/\partial\ln\dot{\varepsilon})$ — чувствительность напряжения к скорости деформации при постоянной пластической деформации. Термодинамический потенциал Гиббса не зависит явным образом от смещения и определяется следующим образом [20]: $dG = -SdT - V^*d\sigma$, где S — энтропия, V^* — объем, связанный с микроскопическими процессами, определяющими характер релаксации (1). Появление члена $\propto d(\ln\dot{\varepsilon})$ в (2) является следствием неравенства $\Delta G/kT \gg 1$. После взятия логарифма от (1) и дифференцирования по σ величина Λ в (2) может быть поставлена в соответствие kT/V^*, что позволяет определить объем активации V^* из эксперимента.

Дифференцируя уравнение (2) по времени и полагая сторонние силы постоянными ($d\sigma \equiv 0$), получаем следующее уравнение:

$$Mv + \Lambda\frac{dv/dt}{v} = 0, \qquad (3)$$

где $v \equiv \dot{\varepsilon}$. Таким образом, производная по времени от скорости деформации $\dot{v}$ пропорциональна квадрату скорости деформации. Решая дифференциальное уравнение (3), получаем следующее выражение для скорости релаксации: $v(t) = \Lambda t^{-1}/M$. Нетрудно видеть, что характер процесса релаксации из-за наличия члена $\propto d(\ln\dot{\varepsilon})$ в (2) качественно изменился (постоянные интегрирования опущены):

$$\varepsilon(t) = \frac{\Lambda}{M}\ln(t). \qquad (4)$$

Особенностью уравнения (2) является зависимость второго слагаемого не от скорости деформации, что было бы в случае релаксации в среде с ньютоновской вязкостью, не зависящей от скорости, а от логарифма скорости деформации. Математически появление логарифмической зависимости от времени обусловлено соотношением (1) при $\Delta G/kT \gg 1$ и локальностью связи между напряжением, деформацией и скоростью деформации (2). С точки зрения физики процесса логарифмическая зависимость появляется из-за того, что скорость релаксации пропорциональна не разности энергий текущего и равновесного состояния, а экспоненциальной функции большого аргумента. Если бы энергия активации была мала, $\Delta G \ll kT$, то из-за тепловых флуктуаций любые два состояния оказались бы ничем не выделенными, а закон релаксации был бы таким же, как в вязкой жидкости. Таким образом, логарифмическая зависимость $\propto \ln t$ связана с существованием по крайней мере двух локализованных состояний термодинамического равновесия. При этом для существования таких состояний принципиально важно выполнение условия $\Delta G \gg kT$. В противном случае тепловые возмущения приведут к разрушению локализованных состояний и существенной деформации равновесной функции распределения энергий (квази)частиц [17].

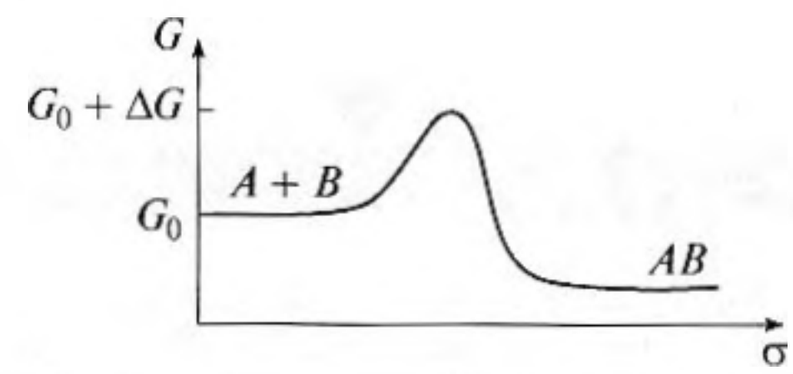

Рис. 1. Характер перехода из состояния **A** + **B** в связанное состояние **AB**.

Для существования энергетических барьеров необходимо наличие нескольких устойчивых состояний. В случае многофазных сред потенциальная энергия взаимодействия составляющих может определяться различными пространственными масштабами (например, [21–23]), что обеспечивает возможность существования метастабильных состояний.

Целью рассматриваемого ниже эксперимента по наблюдению релаксации возмущений в неконсолидированном грунте было выявление "медленной динамики" этих процессов. Мы предполагали, что в неконсолидированной среде связи между зернами достаточно слабы и могут быть разрушены в результате ударного воздействия на грунт. Например, наличие жидкой фракции, частично заполняющей пространство между зернами, может привести к появлению двух состояний с возможными энергетическими барьерами (рис. 1) [21]. Каждому энергетическому состоянию отвечает характерное пространственное расположение зерен материала. Таким образом, в процессе релаксации внутренних напряжений (деформаций) происходит переупаковка материала с возвращением к более плотной конфигурации зерен, чем в состоянии с частично разрушенными связями.

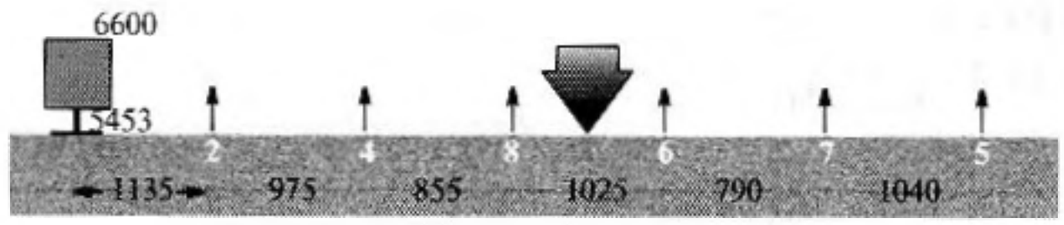

Рис. 2. Расстановка датчиков при проведении эксперимента по наблюдению "медленной динамики". Расстояния между датчиками указаны в миллиметрах в нижней части рисунка.

ОПИСАНИЕ СПОСОБА ОБРАБОТКИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Схема расстановки датчиков при проведении эксперимента показана на рис. 2. Цифрами на рисунке отмечены номера геофонов (2–8) и акселерометров, контролирующих величину силы F_g. Большой вертикальной стрелкой, направленной вниз, схематично показана область кратковременного воздействия на грунт. Это силовое воздействие осуществлялось за счет удара при падении массы 35 кг с высоты 1 м на жесткую площадку известной площади. Таким образом, имелась возможность оценить величину воздействия (сила, импульс, энергия), прикладываемого к грунту.

На способе представления экспериментальных данных следует остановиться подробнее. Предполагалось, что в результате падения груза может произойти как уплотнение, так и разрушение грунта, что приведет к изменению скорости распространения сейсмических волн. Поэтому было необходимо контролировать величины, которые в наибольшей степени связаны с изменениями свойств грунта. Уплотнение и разрыхление значительно изменяет скорость волны сдвига [4], величина которой близка к величине скорости поверхностной волны Рэлея [24]. Кроме того, ослабление смещений в волне Рэлея при увеличении глубины позволяет оценить пространственный масштаб (глубину), где имеют место изменения параметров среды в результате воздействия.

Для контроля изменений скорости волны Рэлея удобнее всего использовать фазовый метод SASW ("Spectrum of Acoustic Surface Waves") [25]. Как известно, скорость волны Рэлея, распространяющейся вдоль границы однородного упругого полупространства, не зависит от частоты [24]. Вертикальная стратификация свойств грунта приводят к появлению дисперсии – зависимости фазовой скорости волны Рэлея V_R от частоты ω. Из работ, посвященных методу SASW, известно, что изменение плотности и коэффициента Пуассона оказывает малое влияние на дисперсию волны Рэлея. Это позволяет связать измеряемые величины V_R на различных частотах со скоростью волны сдвига в слое толщины H_R, которая может быть определена, как отвечающая ослаблению смещений в волне Рэлея в "е" раз:

$$H_R = V_R/\omega, \tag{5}$$

т.е. толщина слоя приблизительно равна одной шестой длины волны Рэлея, $H_R \approx \lambda_R/6$.

Дисперсионные кривые $V_R(\omega)$ определяются экспериментально следующим образом. Рассмотрим любую из пар сейсмоприемников (рис. 2). Выделим в принимаемом сигнале вклад волны Рэлея. Это можно сделать за счет того, что скорость распространения поверхностной волны меньше скорости распространения других волн. Обработка сигналов состояла из последовательности действий: (1) регистрация сигнала линейной частотной модуляции (ЛЧМ); (2) преобразование Фурье – вычисление импульсного отклика; (3) стробирование по времени – выделение вклада волны Рэлея; (4) обратное преобразование Фурье от импульсного отклика; (5) вычисление фазо-частотной характеристики с устранением неоднозначностей фазы; (6) вычисление скорости волны Рэлея в частотном диапазоне сигнала ЛЧМ.

При излучении сигнала с линейной частотной модуляцией преобразование Фурье позволяет определить импульсную характеристику. Стробирование сигнала с учетом полосы излучения позволяет выделить в импульсной характеристике компоненты, отвечающие волне Рэлея. Волна Рэлея легко идентифицируется в импульсном отклике, поскольку ее амплитуда значительно превышает амплитуды объемных волн [26]. Выделение вклада волны Рэлея позволило уменьшить погрешность измерения фазы, и, следовательно, увеличить точность диагностики изменения состояния грунта. После выполнения обратного преобразования Фурье разность фаз $\Delta\varphi$ в волне Рэлея, регистрируемой парой сейсмоприемников, равна фазе взаимного спектра для каждой спектральной составляющей внутри полосы излучения. С другой стороны, разность фаз определяется очевидным выражением:

$$\Delta\varphi = \omega d/V_R, \tag{6}$$

где d – известное расстояние между сейсмоприемниками, ω – частота спектральной составляющей для измеренной величины $\Delta\varphi$. Выражение (6) позволяет связать измеренную разность фаз со скоростью волны Рэлея.

На рис. 3 представлены дисперсионные зависимости $V_R(\omega)$ для пары датчиков, расположенных по краям области ударного воздействия. Записи № 262, № 266, № 270 были сделаны до внесения каких-либо возмущений в область между датчиками № 8 и № 6 (рис. 2). Запись № 266 представляет собой повторение через 25 минут записи № 262. Запись № 270 была сделана через 13 минут после записи № 266. Таким образом, данные на рис. 3 сверху позволяют судить о погрешности выбранного способа измерений.

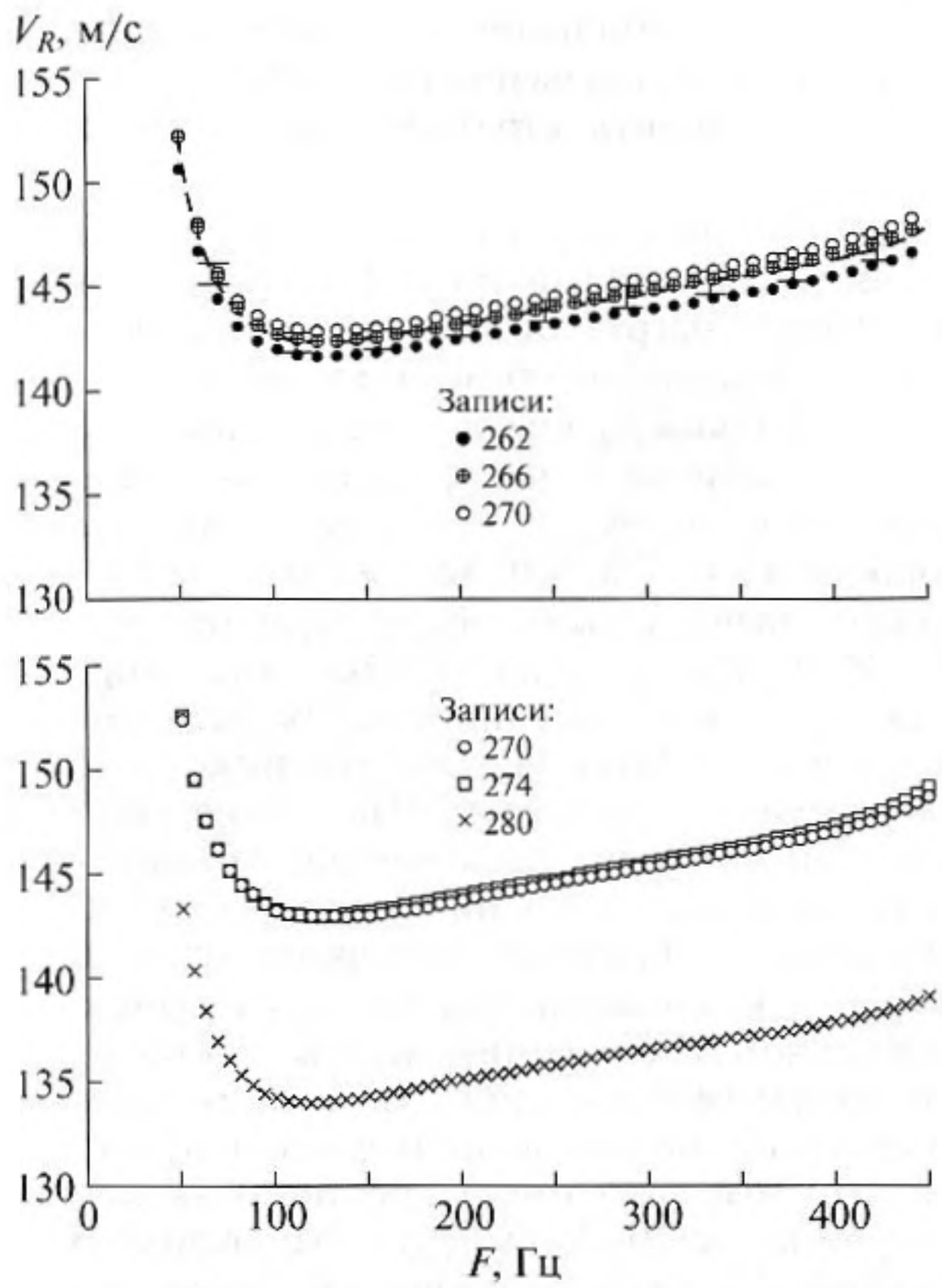

Рис. 3. Дисперсионные свойства волны Рэлея по данным пары датчиков № 8 и № 6 (см. рис. 2). Сверху показан естественный разброс данных из-за влияния неконтролируемых в эксперименте факторов.

Различие данных для записей № 262, № 266 и № 270 составляет около 1% и может быть отнесено на счет неконтролируемых факторов, оказывающих влияние на характеристики грунта в процессе проведения измерений. Это различие носит регулярный характер, и поэтому не может быть связано с естественными микросейсмическими шумами, относительный уровень которых составлял около –50 дБ. Несложные оценки показывают, что в этом случае случайные вариации V_R имеют порядок величины $\leqslant 0.1\%$. В работе [4] мы показали, что модуль сдвига неконсолидированной среды подвержен изменениям до 50% при изменении температуры окружающей среды в пределах ~5°C и относительной влажности в пределах ~10%. Можно предположить, что изменение освещенности (скорости испарения жидкости с поверхности), порывы ветра и подобные явления, которые не контролировались в процессе проведения эксперимента, могли приводить к вариациям величины V_R. Поэтому в дальнейшем вариации скорости волны Рэлея в пределах 1% будем рассматривать как погрешность наших измерений. Пунктиром на рис. 3 показаны усредненная за 40 минут наблюдений дисперсионная зависимость $V_R(\omega)$. Вертикальными отрезками показаны оценки стандартных отклонений $V_R(\omega)$ для трех записей.

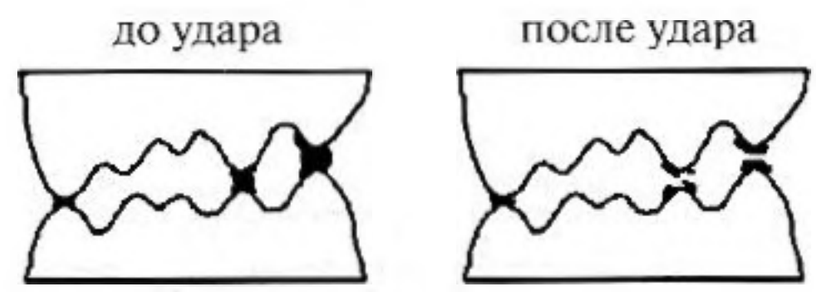

Рис. 4. Схема разрушения связей внутри гранулированной среды на границах контактов зерен.

Дисперсионные зависимости (рис. 3) обнаруживают интересную особенность – скорость волны Рэлея имеет минимум для частоты $\omega/2\pi \approx$ ≈ 100 Гц, которой отвечает эффективная глубина проникновения поверхностной волны $H_R \approx 25$ см. Раскапывание грунта по завершении эксперимента показало, что на глубинах до 20–30 см грунт очень сухой, плотный и имеет однородный по глубине цвет. Эти прямые наблюдения находятся в согласии с данными рис. 3, которые указывают на слабую дисперсию $V_R(\omega)$ в области частот $\omega/2\pi > 100$ Гц. Увеличение скорости волны Рэлея на низких частотах ($\omega/2\pi < 100$ Гц, рис. 3) может быть связано с увеличением сжатия зерен из-за давления со стороны лежащих у поверхности слоев.

Рис. 3 снизу показывает влияние различных возмущающих факторов на дисперсию волны Рэлея. Здесь же для сравнения приведена запись № 270, которой отвечает отсутствие возмущений. Запись № 274 была сделана через 6 минут после установки груза массой 35 кг на площадку и иллюстрирует пренебрежимо малое влияние статического усилия $F_0 = 340$ Н и статического давления $P_0 \simeq 2$ кПа. Оценим величину силы в момент удара. При падении с высоты $h = 1$ м груз набирал скорость $v = \sqrt{2gh} \simeq 4.4$ м/с, где $g \simeq 9.8$ м/с^2 – ускорение свободного падения. Импульс груза перед ударом составлял $p = 155$ кг м/с. Длительность удара, как было видно из записи виброускорения на сейсмоприемнике, составляла приблизительно $\tau = 0.025$ с. Остановка груза при ударе о площадку привела к передаче в среду усилия $p/\tau =$ $= 6200$ Н, что значительно превышает величину статического усилия. Запись № 280 была начата через 30 секунд после падения груза. Нетрудно видеть, что удар привел к уменьшению скорости волны Рэлея приблизительно на 7% для частот 50–450 Гц.

Возможный сценарий изменения свойств среды в результате воздействия показан на рис. 4. Предполагается, что в результате удара происходит быстрое разрушение слабых связей, отмеченных на рис. 4, а затем их медленное восстановле-

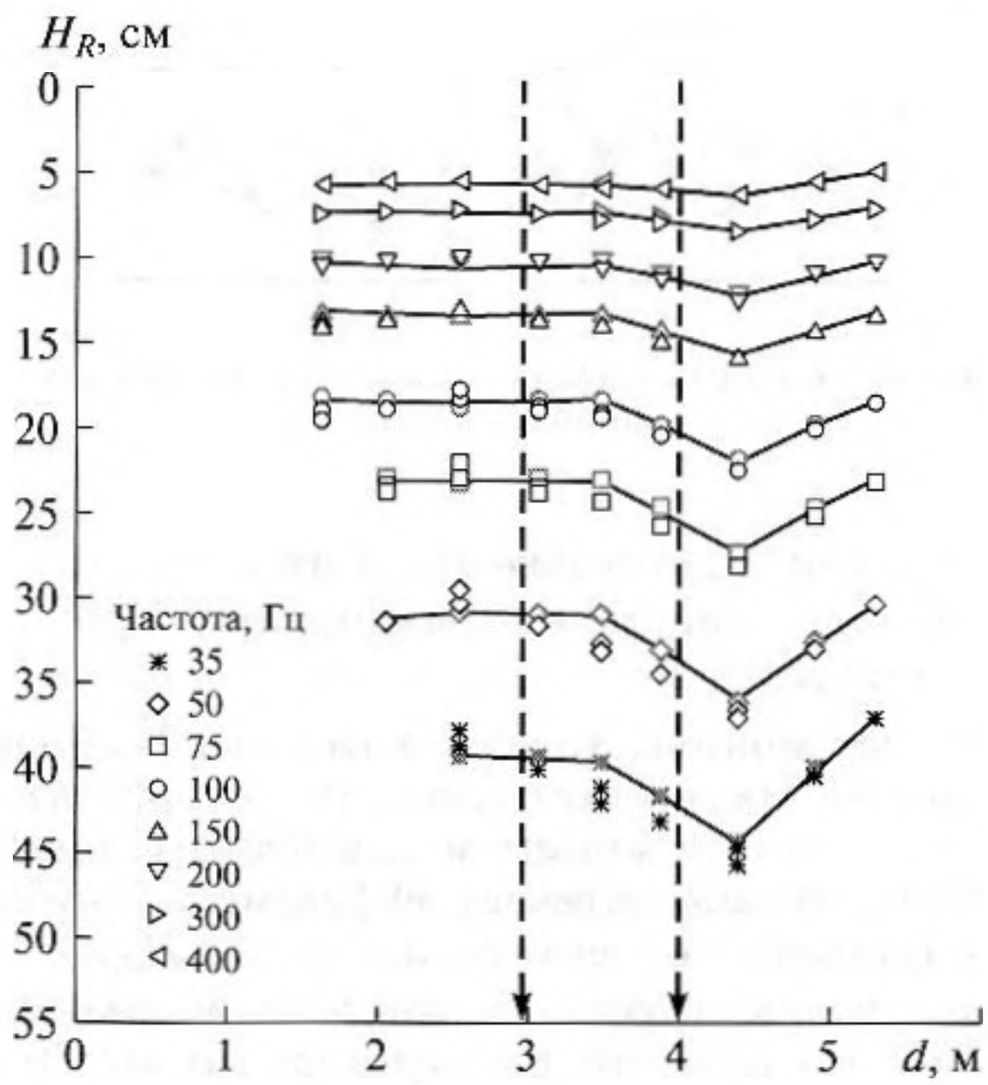

Рис. 5. Зависимость эффективной глубины проникновения поверхностной волны от расстояния до источника. Область ударного воздействия отмечена вертикальными стрелками. Черные символы отвечают невозмущенному состоянию, серые символы, соединенные линиями, показывают состояние через 30 секунд после ударного воздействия.

ние при отсутствии возмущающих факторов. О масштабах области пространства, свойства которой изменились в результате ударного воздействия, можно судить по данным рис. 5. На этом рисунке представлены зависимости эффективной глубины слоя распространения волны Рэлея от дистанции до источника – $\lambda_R/6 \approx H_R(d)$ для различных частот в полосе излучения. Минимальная дистанция для каждой из частот ограничена условием $d > \lambda_R$, что определяет дальнюю зону излучения.

Излучение на частотах выше 400 Гц очень сильно затухает, что выражается в повышении уровня шума в зависимости $\Delta\varphi(\omega)$. Сильное затухание этих спектральных составляющих связано с наличием корневой системы травы, что приводит к сильному рассеянию волн Рэлея на случайных неоднородностях в области высоких частот. Можно отметить, что по мере увеличения частоты (уменьшения H_R) среда распространения сейсмических волн становится все ближе к модели плоско-слоистой среды. Это связано с тем, что верхние слои грунта в большей степени подвержены эрозии, значительным изменениям температуры и другим факторам, которые приводят к повышению однородности приповерхностной области [16]. На дистанции примерно 5 м от источника имеется локальное увеличение жесткости на глубинах более 20 см (напомним, как видно из (5), $H_R \propto V_R$). Эти небольшие ~12% вариации V_R приводят к изменению разности фаз $\Delta\varphi$ (6), что позволяет определить стратификацию приповерхностных слоев.

В результате ударного воздействия происходит "размягчение" грунта (рис. 4) непосредственно под ударной нагрузкой, что выражается в уменьшении V_R и H_R в этой области. Уменьшение скорости волны Рэлея V_R может быть связано с изменением двух величин – модуля сдвига μ и плотности ρ грунта. Наблюдаемому локальному уменьшению скорости V_R на 7% при том же модуле сдвига μ должно отвечать локальное уплотнение грунта на 14%. Измеренная величина модуля всестороннего сжатия в условиях проведения эксперимента составляет 78 МПа [4]. Уплотнению грунта на 14% отвечает давление 11 МПа, что на много порядков превосходит развиваемое давление. Поэтому наиболее вероятной причиной уменьшения V_R является разрушение связей между зернами грунта, как показано на рис. 4, что выражается в локальном уменьшении модуля сдвига μ. При этом самые верхние слои с глубинами залегания менее 15 см почти не подвержены изменению (рис. 5). Этот факт имеет простое объяснение – на глубинах до 10–15 см грунт был очень сухой и похожий на камень, что свидетельствует о сильной связи между зернами. Это было выяснено после проведения измерений и раскапывания грунта на глубину около 20 см. На рис. 5 такое изменение жесткости вблизи поверхности также заметно по сближению зависимостей $H_R(d)$ для пары частот 300 и 400 Гц по сравнению с парой частот 200 и 300 Гц.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ГРУНТА ВО ВРЕМЕНИ

Сразу после удара разность фаз сигналов, принимаемых приемниками № 8 и № 6 (рис. 2), увеличилась. Разности фаз сигналов для приемников, установленных вне области возмущения, почти не изменились, что свидетельствует о локальном характере воздействия. Тот факт, что дополнительное запаздывание связано с изменением макроскопической характеристики (модуля сдвига) среды распространения пробной волны, хорошо видно на рис. 6. На этом рисунке показан фрагмент временной зависимости *изменения* величины фазовой скорости волны Рэлея (отклонения от значения в момент начала измерений) для нескольких частот.

Цифрами на рис. 6 отмечены номера записей. Записи № 270, которая была сделана до внесения каких-либо возмущений, отвечает $\Delta V_R = 0$. Все последующие записи отражают процесс релаксации среды после удара. Напомним, что волна Рэлея прижата к поверхности. Поэтому характер ре-

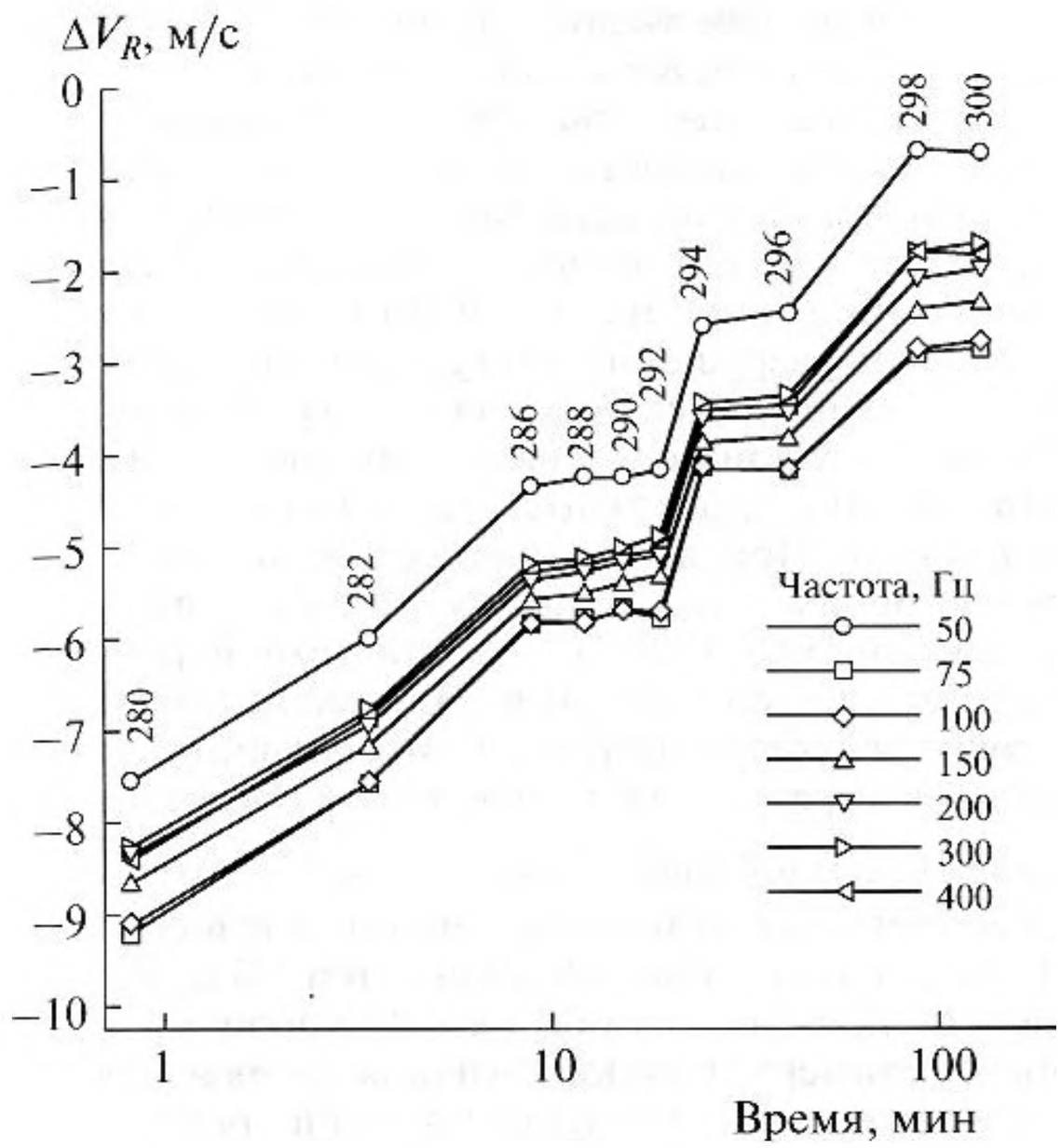

Рис. 6. Характер изменения фазовой скорости волны Рэлея на нескольких опорных частотах в зависимости от времени в минутах с момента удара. Цифрами возле символов показаны номера записей.

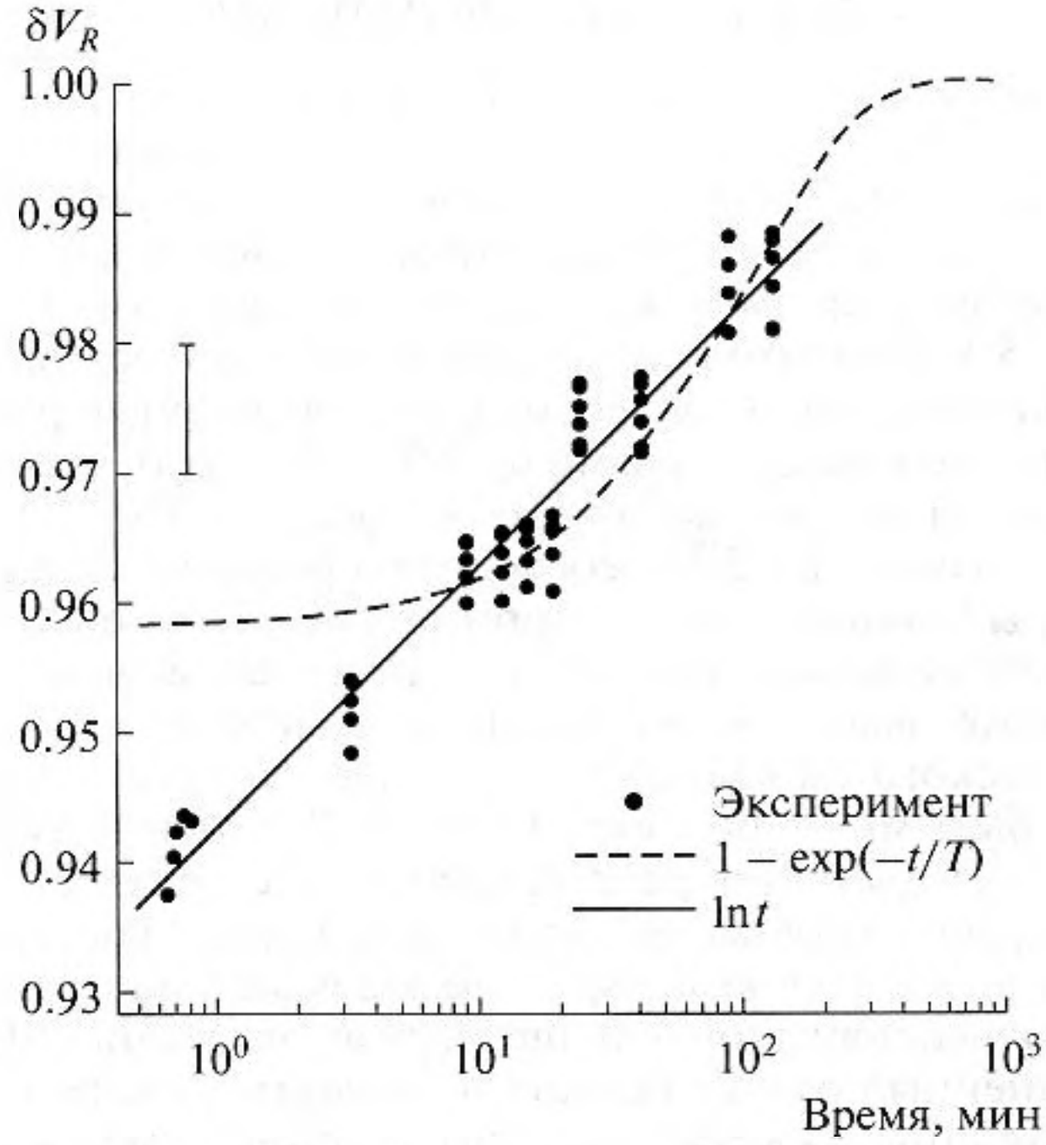

Рис. 7. Относительное изменение скорости волны Рэлея на частотах, указанных на рис. 6, в зависимости от времени в минутах с момента удара. Погрешность измерения относительного изменения скорости волны Рэлея составляет var $(\delta V) \simeq 1\%$ и показана вертикальным отрезком.

лаксации на каждой из выбранных частот отражает процессы в слое соответствующей толщины. В пределах толщины $H_R \approx \lambda_R/6$, которая может быть определена по данным рис. 5 и составляет не более 50 см на частотах выше 50 Гц, процессы протекают однородно. Это отражается в сходстве экспериментальных кривых для различных частот, исключая частоту 50 Гц, на рис. 6.

На рис. 7 представлена экспериментальная зависимость относительного изменения скорости волны Рэлея для частот 75–400 Гц, которым отвечает эффективная глубина $\lesssim$30 см. Относительное изменение скорости волны Рэлея определялось по формуле:

$$\delta V_R(\omega, t) = \frac{V_R(\omega, t)}{V_R(\omega, t_0)},$$

где t_0 – момент записи № 270 (до внесения каких-либо возмущений), t – текущее время с учетом того факта, что каждой частоте излучения отвечает свое время записи. Данные для частоты 50 Гц на рис. 7 не приводятся, поскольку ранее (рис. 6) было видно, что характер релаксации для этой частоты (глубины слоя) несколько отличается от характера релаксации возмущения на более высоких частотах.

Здесь же, на рис. 7, пунктиром и сплошной линиями показаны зависимости $\propto[1 - \exp(-t/T)]$ и $\propto \ln(t)$, которым отвечает минимум среднеквадратичного отклонения аппроксимации от экспериментальных данных. Можно утверждать, что экспериментальным данным в большей степени отвечает логарифмический закон релаксации. С учетом погрешности измерения $V_R(\omega)$, которая составляла около 1% (рис. 3, сверху), экспериментальные данные "ложатся" на логарифмическую зависимость. Это, в свою очередь, позволяет предположить, что воздействие на грунт переводит его в метастабильное возбужденное состояние с последующей релаксацией за счет "просачивания через энергетический барьер" (рис. 1).

"Обычной" релаксации на рис. 7 отвечает зависимость $\propto[1 - \exp(-t/T)$, где $T \approx 1.5$ часа. Логарифмическая зависимость имеет вид $0.0009 \ln(t) + 0.9$. Множитель перед логарифмом отвечает отношению Λ/M в (4). В свою очередь величина Λ позволяет оценить объем активации и характерный пространственный размер области возбуждения (2). Полагая M равным модулю сдвига $\mu = 29$ МПа [4], можно оценить объем активации $V^* = \dfrac{kT}{0.009\mu} \approx$ $\approx 1.6 \times 10^{-26}$ м^3, что отвечает линейному размеру $\mathscr{L} \sim \sqrt[3]{V^*} \simeq 2.5$ нм или $\mathscr{L} \sim 25$ Å. Этот масштаб отвечает короткодействующим слабым силам поверхностного взаимодействия: Ван-дер-Ваальса (Лондона), структурным и Борновским силам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Имеются литературные источники [21], где показывается, что при частичном насыщении консолидированной пористой среды водой глобальному минимуму потенциальной энергии отвечают расстояния между зернами в области контакта $\delta \sim 5$ Å. Также отмечается возможность существования метастабильного состояния с характерным расстоянием между зернами $\delta \sim 60$ Å. Для того, чтобы попасть из возбужденного состояния с $\delta \sim 60$ Å в состояние с $\delta \sim 5$ Å, необходимо преодолеть некоторый пороговый энергетический уровень — энергию активации процесса. При этом модель (1) требует выполнения условия на величину энергетического барьера [17]: энергия активации должна быть много больше $kT \simeq 0.03$ эВ, чтобы возмущения функции распределения энергетических состояний оставались малыми. Оценки на основе данных [21] показывают, что эта величина на несколько порядков меньше энергии активации ΔG. Линейный размер области активации по порядку величины также согласуется с расстоянием между зернами в области контакта — $\delta \sim 5$–60 Å. Таким образом, мы можем предположить, что наблюдавшийся процесс релаксации связан с восстановлением связей [21] между зернами на микроскопическом уровне.

В заключение сопоставим полученные результаты с известными из источников фактами. Грунт, как и многие природные материалы, представляет собой сложную многофазную систему с большим числом внутренних связей [16]. Из-за сложности строения реальных многофазных систем для описания их поведения используются реологические модели, в основе которых лежат соображения, учитывающие основные особенности поведения материала. Общее реологическое уравнение было предложено Гогенэмзером и Прагером и описывает все возможные линейные реологические модели [16]:

$$\tau - \tau_p = G\gamma + \eta\dot{\gamma} - T_r\dot{\tau}, \qquad (7)$$

где τ — напряжение сдвига, γ — деформация сдвига, τ_p — напряжение. при котором начинаются пластические деформации, G — модуль сдвига, η — сдвиговая вязкость, T_r — характерное время релаксации напряжений. Как следует из общей записи линейного реологического уравнения (7), процессы релаксации и запаздывания реакции на стороннее воздействие протекают по закону $\exp(-t/T)$.

Нетрудно заметить, что учет нелинейности или зависимости параметров (7) от величин напряжения и/или деформации, обеспечит переход к зависимости $\propto \ln(t)$ (4), если положить $\eta \sim 1/\dot{\gamma}$. Другими словами, характер релаксации $\ln(t)$ может проявиться, если имеется падающий участок зависимости коэффициента сдвиговой вязкости от скорости деформаций. Зависящая от скорости вязкость называется структурной вязкостью, поскольку наличие зависимости коэффициента вязкости от скорости связано с внутренними структурными изменениями. В качестве примера таких изменений свойств дисперсных систем можно привести тиксотропный (вибрационный) механизм разрушения коагуляционной структуры — нарушение слабых связей внутри геля [16]. Слабые коллоидные связи образуются за счет притяжения поверхностных ионов и ионов жидкости. При встряхивании происходит разрушение этих связей, которые затем полностью восстанавливаются, если на систему перестают действовать возмущения. Для малых величин скорости деформации член, отвечающий вязким силам в выражении (7), может быть представлен в виде степенной зависимости $\tau = k_n\dot{\gamma}^n$, что отвечает реологической модели степенной зависимости вязкости тиксотропных жидкостей [27], показатель степени для которых $n < 1$. Хорошо известными примерами подобного поведения являются глинистое тесто, плывуны и бетон в процессе застывания [28]. Следовательно, коэффициент вязкости $\eta = k_n\dot{\gamma}^{n-1}$ уменьшается при увеличении скорости деформации, что приближает решение уравнения (7) относительно релаксации деформаций в отсутствии сторонних возмущений ($\tau = \dot{\tau} = 0$) к зависимости (4). Отметим, что в основе кинетики химических реакций, равно и реакций диссоциации, лежат те же соображения, что и представленные выше при обсуждении выражения (1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, можно предположить, что независимо от конкретной реализации (физико-химические превращения в связях коллоидного типа, частичное разрушение контакта зерен, смоченных жидкостью, и т.п.) за наблюдавшийся закон релаксации возмущений в грунте отвечают локализованные состояния (рис. 1). Использование описанного выше метода анализа сейсмических сигналов позволяет производить диагностику наличия таких состояний и оценивать характерные пространственные масштабы внутренней структуры, которые связаны с параметрами релаксационного процесса. Отметим, что для более детального исследования механизмов, ответственных за релаксацию вида (4), которая наблюдалась в натурном эксперименте (см. рис. 7), требуется проведение дополнительных экспериментов в условиях лаборатории при контролируемом изменении температуры (скорость процесса релаксации (1) должна зависеть от температуры), влажности (соотношение фаз внутри пористой среды) и других внешних факторов.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 08-02-00670, № 08-05-97014, № 06-05-64925, грантом президента РФ "Ведущие научные школы" № НШ-1244.2008.2 и программой фундаментальных научных исследований ОФН РАН "Когерентные акустические поля и сигналы".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Есипов И.Б., Николаев А.В.* Введение // Акуст. журн. 2005. Т. 51 (Приложение). С. 5.
2. *Зайцев В.Ю., Гусев В.Э., Назаров В.Е., Кастаньеде Б.* Взаимодействие акустических волн с трещинами: упругие и неупругие механизмы нелинейности с различными временными масштабами // Акуст. журн. 2005. Т. 51 (Приложение). С. 80–91.
3. *Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н., Бредихин В.В., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.* Оценка концентрации трещин в скальных породах в натурных условиях // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 84–96.
4. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.* Диагностика акустических свойств неконсолидированных сред в натурных условиях // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 4. С. 607–620.
5. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.* Акустическая диагностика физических свойств неконсолидированных сред в натурных условиях / Сб. тр. XIX сессии РАО. Т. 1. М.: ГЕОС. 2007. С. 328–331.
6. *Авербах В.С., Лебедев А.В., Марышев А.П., Таланов В.И.* Наблюдение эффектов медленной динамики в неконсолидированных средах в натурных условиях / Сб. тр. XIX сессии РАО. Т. 1. М.: ГЕОС. 2007. С. 331–335.
7. *Ostrovsky L.A., Johnson P.A.* Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // Rivista del Nuovo Cimento. 2001. V. 24. N. 7. P. 1–46.
8. *Гущин В.В., Шалашов Г.М.* О возможности использования нелинейных сейсмических эффектов в задачах вибрационного просвечивания Земли // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 144–155.
9. *Николаев А.В.* Проблемы нелинейной сейсмики / Проблемы нелинейной сейсмики. М.: Наука. 1987. С. 5–20.
10. *Guyer R.A., Johnson P.A.* Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class of materials // Physics Today. V. 52. N. 4. P. 30–36.
11. *Ten Cate J.A., Shankland T.J.* Slow dynamics in the nonlinear elastic response of Berea sandstone // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. N. 21. P. 3019–3022.
12. *Ten Cate J.A., Smith E., Guyer R.* Universal slow dynamics in granular solids // Physical Review Letters. 2000. V. 85. N. 5. P. 1020–1023.
13. *Zaitsev V., Gusev V., Castagnede B.* Thermoelastic mechanism for logarithmic slow dynamics and memory in elastic interactions with individual cracks // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. N. 7. P. 075501:1--4.
14. *Estrin Y., McCormic P.G., Street R.* A phenomenological model of magnetisation kinetics // J. Phys.: Condens. Matter. 1989. V. 1. P. 4845–4851.
15. *Folks L., Street R.* Analysis and interpretation of the time dependent magnetic phenomena // J. Appl. Phys. 1994. V. 76. N. 10. P. 6391–6395.
16. *Гольдштейн М.Н.* Механические свойства грунтов. М.: Изд. лит. по строительству, 1971. 368 с.
17. *Штиллер В.* Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика. М.: Мир, 2000. 177 с.
18. Пластичности теория / Физический энциклопедический словарь. Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. С. 546.
19. *Hart E.W.* Theory of the tensile test // Acta Metallurgica. 1967. V. 15. N. 2. P. 351–355.
20. *Базаров И.П.* Термодинамика. Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1991. 376 с.
21. *Tutuncu A.N., Sharma M.M.* The influence of fluids on grain contact stiffness and frame moduli in sedimentary rocks // Geophysics. 1992. V. 57. N. 12. P. 1571–1582.
22. *Sharma M.M., Tutuncu A.N.* Grain contact adhesion hysteresis: A mechanism for attenuation of seismic waves // Geophys. Research Letters. 1994. V. 21. N. 21. P. 2323–2326.
23. *Пономарев В.С.* Горные породы как среды с собственными источниками упругой энергии / Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука. 1981. С. 55–64.
24. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
25. *Stokoe K.H., Rix G.R., Nazarian S.* In situ seismic testing of surface waves // Proc. of 12-th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engng. V. 1. 1989. P. 331–334.
26. *Авербах В.С., Заславский Ю.М.* Пространственно-угловые характеристики и энергетический баланс упругих волн, возбуждаемых в полупространстве источником типа центр расширения // Физика Земли. 1997. Т. 12. С. 1–5.
27. *Berker A.* Rheology for adhesion science and technology // The mechanics of adhesion D.A. Dillard and A.V. Pocius ed. V. 1. Elsevier. N.-Y. 2002. P. 443–498.
28. *Овчинников П.Ф.* Виброреология. Киев: Наукова думка, 1983. 272 с.