

УДК 550.34 +538.951

DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20713

МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНО-НЕУПРУГИХ ЯВЛЕНИЙ ОБУСЛОВЛЕННЫХ НАНО-РАЗМЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ СРЕДЫ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

© 2016 В.Б. Заалишвили¹, д.ф.-м.н., проф., Т.Т. Магкоев^{1,2}, д.ф.-м.н., проф., Д.А. Мельков¹, к.т.н., Ф.С. Морозов¹

¹Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru;

²Северо-Осетинский Государственный университет им. К.Л. Хетагурова, Россия 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46

В работе проведено сравнительное исследование характера механического отклика двух материалов – алмаза и кварца – на воздействие острия нанометрового размера с помощью атомно-силового микроскопа NTegra-Aura (NT-MDT). Описана связь нелинейно-неупругих явлений в грунтах, выражающихся в высокочастотном сейсмическом излучении в ближней зоне, изменении площади спектра колебаний, бимодальностью и постоянной составляющей поля смещений, с особенностями строения сред на атомном уровне и характером межатомного и межмолекулярного взаимодействия.

Ключевые слова: нелинейность, неупругость, дислокации, грунт, сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ)

Рассмотрим особенности поведения грунтов различной плотности при внешних интенсивных воздействиях, в том числе, сейсмических. Так как грунт в зависимости от его вида и физического состояния подвержен в той или иной степени пластической деформации, способной поглощать упругую энергию при землетрясении, то интересен вопрос о ее природе на микроскопическом уровне.

Пластическую деформацию осуществляют особые дефекты – дислокации – линейные дефекты кристаллической решетки (атомные ряды). Дислокации изначально существуют в любых материалах и при приложенных нагрузках изменяют его свойства. Дислокации влияют почти на все макроскопические свойства материала – вязкость, электросопротивление, магнитные качества. Если бы не существовало этих дефектов, то для деформирования материала нужно было бы приложить напряжения, равные теоретической прочности. Коль скоро реальные напряжения деформирования незначительны, то должен существовать какой-то концентратор, сосредотачивающий приложенное усилие в небольшой части материала.

Процесс пластической деформации, предвещающий разрушение, можно представить как соскальзывание одного слоя атома по другому, подобно тому, как сдвигается стопка листов чистой бумаги. Из-за того, что процесс этот идет одновременно по всей плоскости листа, то вынужденно рвутся межатомные связи сразу между всеми атомами по обе стороны плоскости скольжения. Между слоями бумаги силы притяжения ничтожно малы. Но между слоями атомов они велики. Поэтому попытка сдвинуть два атомных слоя – один по отношению к другому – хотя и возможна, но потребует очень большого усилия. Это есть так называемая теоретическая прочность материала. В.М. Финкель пересчитал это усилие на привычные нам напряжения и оказалось, что прочность в этом случае достигает очень больших

значений, превышающих обычные в 1000 раз [Финкель, 1989]. Если дислокация неподвижна, то пластической деформации быть не может. Когда множество дислокаций сплетаются, они мешают друг другу двигаться, делая материал сопротивляющимся пластической деформации, то есть более прочным. Следовательно, избыток дислокаций ведет к подавлению пластичности. Размеры дислокаций – длина в несколько миллиметров (сантиметров), а толщина в один атом (стоимиллионные доли сантиметра).

Таким образом, те или иные проявления материала при внешних сейсмических воздействиях определяются особенностями его строения на атомном уровне и характером межатомного и межмолекулярного взаимодействия. В связи с этим, в настоящей работе проведено сравнительное исследование характера механического отклика двух материалов – алмаза и кварца – на воздействие острия нанометрового размера с помощью атомно-силового микроскопа NTegra-Aura (NT-MDT) (рис. 1).

Это сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) для работы в условиях контролируемой атмосферы или низкого вакуума. В вакууме повышается добротность колебаний кантилевера, а значит, увеличивается чувствительность, надежность и достоверность в измерениях слабых сил между зондом и образцом. При этом переход от атмосферного давления к вакууму 10^{-2} Торр обеспечивает почти десятикратное возрастание добротности. При дальнейшем увеличении вакуума величина добротности быстро выходит на плато и изменяется минимально. [Заалишвили, Тотиева-Туева, 2010; Grigorkina et al, 2016]/



Рис. 1. Зондовая нанолaborатория NTegra-Aura (NT-MDT)

Прибор оснащен емкостными датчиками обратной связи по всем трем координатным осям, оптикой с разрешением до 1 мкм и возможностью проведения измерений в более чем 40 методиках. В частности, он позволяет нанотопографическое построение рельефа поверхности и распределения локальных напряжений. Зависимость частоты колебаний острия от его местоположения определяет локальный модуль Юнга материала в области единиц нанометров.

Примечательно то, что даже при относительно небольших воздействиях острия на кварц появляются линейные дислокации, напряжения и трещины вдоль соответствующих кристаллографических направлений кристалла SiO_2 , а именно (100) и (110) (рис. 2). В алмазе подобного не наблюдалось. Излом кварца следует ожидать именно вдоль наблюдаемых линий. Это означает, что даже незначительное локальное воздействие, но в нужном направлении, может привести к разрушению объекта.

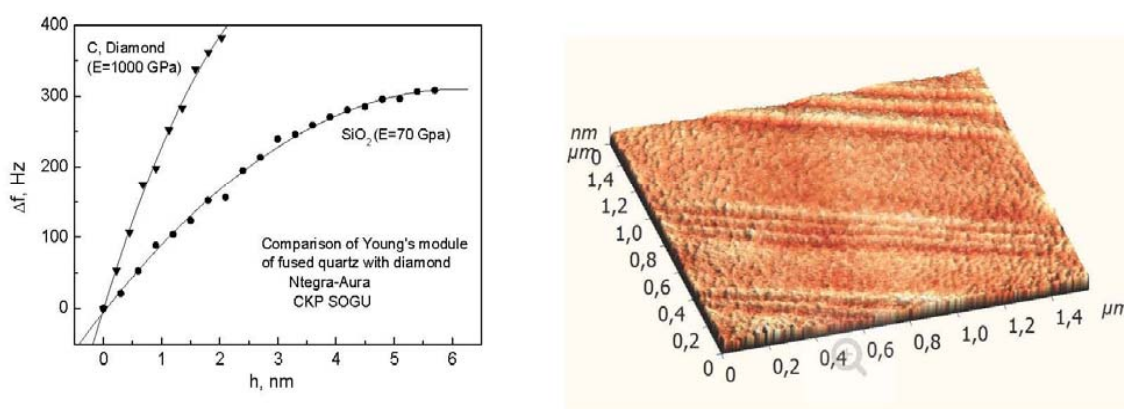


Рис. 2. Величины модуля Юнга для кварца и алмаза и микротопография поверхности кварца после воздействия острия СЗМ радиуса закругления 10 нм

В связи с этим, при строительстве сооружений для повышения сейсмостойчивости материалов конструкции следует перемешивать направления кристаллографических плоскостей соответствующего материала.

Внутренние остаточные напряжения, которые «хранит» в себе среда, нередко являются источниками возникновения трещин и, следовательно, внезапных непредвиденных разрушений. На этом этапе разрушения преобладает пластическая деформация, которая излучает высокочастотные колебания и сопровождается дальнейшее развитие трещины. Волны в скальном грунте подчиняются принципу суперпозиции и заставляют трещину подчиниться ему. В рыхлых грунтах проявляются нелинейные свойства, и волны различной природы взаимодействуют друг с другом. Здесь трудно заранее предсказать траекторию трещины, а значит, и саморазрушение.

Любое разрушение сопровождается акустическим излучением. Среди объектов неживой природы, способных испускать звук, трещина обладает едва ли не самым высокочастотным звучанием. Это связано с тем, что разрушение – процесс, в котором одновременно происходят упругая и пластическая деформации. Сложное их сочетание сопутствует всем этапам развития явления при зарождении трещины, продвижении и после разрыва. Естественно, что все стадии сопровождаются сложным взаимодействием волновых процессов. Услышать трещину невозможно, поскольку основной тон звучания трещины лежит в ультразвуковой области.

В 1987 г. В.Б. Заалишвили изучалось поведение слабых грунтов (искусственная глинистая насыпь мощностью 40 м, составляющая новую объездную дорогу в г. Тбилиси) при больших динамических нагрузках. Датчики находились на глубинах 1,0 м и 5,0 м. На поверхность толщи производилось импульсное воздействие движущейся частью скрепера. На сейсмограмме (рис. 3) хорошо виден преобладающий пик высокой частоты (ВЧ), который с глубиной быстро затухает.

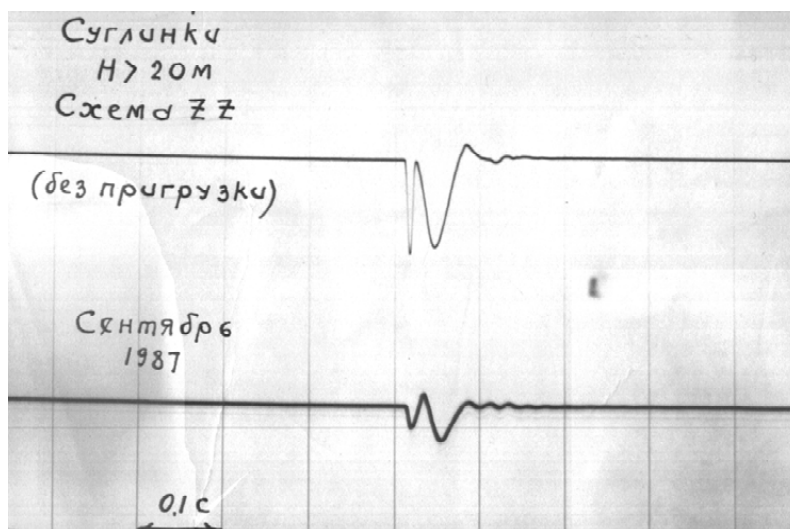


Рис. 3. Нелинейные явления в слабых грунтах при интенсивных нагрузках

В 2005 году аппарат Гюйгенс Европейского космического агентства сел на поверхность спутника Сатурна Титан. Данные акселерометра и пенетрометра позволили определить характер поверхности, на которую опустился зонд. Она оказалась не твердой и не слишком мягкой. То есть это не лед, но и не толстый слой осевшего аэрозоля. По механическим свойствам поверхность напоминает мягкую глину, слегка утрамбованный снег или песок. Титан больше похож на Землю, чем любое другое тело в Солнечной системе, несмотря на огромные отличия в температурных и других климатических условиях. Роль воды в гидрологическом цикле на Титане исполняют метан и этан – они выпадают в виде дождя и снега.

Акустические данные, полученные на последних 90 м полета, показали, что подстилающая поверхность относительно ровная, но не совершенно гладкая. После посадки аппарат зарегистрировал признаки испарения метана. Это говорит о том, что почва могла быть пропитана метаном. Например, это могло оказаться побережье метанового моря или реки. Впрочем, данные не противоречат возможности, что поверхность состоит из очень мелкого, но сухого песка. Пока окончательно выбрать между этими вариантами нельзя, поскольку анализ наличия в почве жидкости еще не завершен.

Анализ соответствующей сейсмограммы (рис. 4) показывает, что и здесь наблюдается излучение ВЧ составляющей в начале процесса деформирования. Это позволяет предположить, что по аналогии с предыдущей сейсмограммой (рис.3) грунт участка, несомненно, весьма непрочен и должен быть сформирован рыхлыми грунтами или грунтами значительно флюидонасыщенными (мягкая глина, слегка утрамбованный снег или песок).

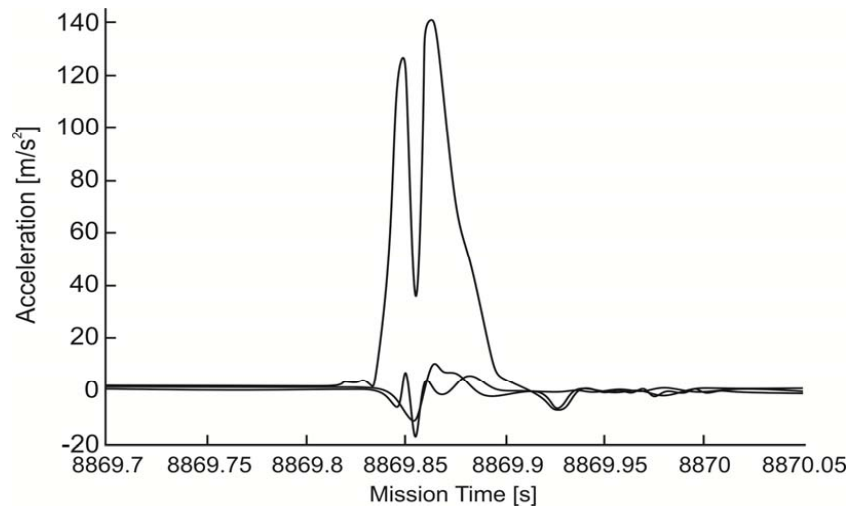


Рис. 4. Данные акселерометра зонда «Гюйгенс» при посадке на поверхность Титана. Скорость в момент посадки составляла 4,6 м/с [сайт www.esa.int]: по горизонтальной оси – время в секундах от включения зонда, а по вертикальной – ускорение

При импульсном воздействии на поверхность толщи песков (Воронеж) в ближней зоне мощного источника ГСК-6М появилась ВЧ область, с расстоянием быстро затухающая (рис. 5).

В основе формирования ВЧ излучения лежат явления, проявляющиеся, несомненно, хотя бы на молекулярном уровне. При интенсивных воздействиях среда переходит в напряженно-деформированное состояние. Состояние это не только внешнее проявление реакции вещества (среды), а интегральный результат колебаний молекул около положения равновесия. При этом, амплитуда колебаний прямо пропорциональна температуре среды, которая будет расти по мере увеличения уровня воздействия. В связи с этим еще раз отметим, что размеры дислокаций – длина в несколько миллиметров (сантиметров), а толщина в один атом (стоимиллионные доли сантиметра).

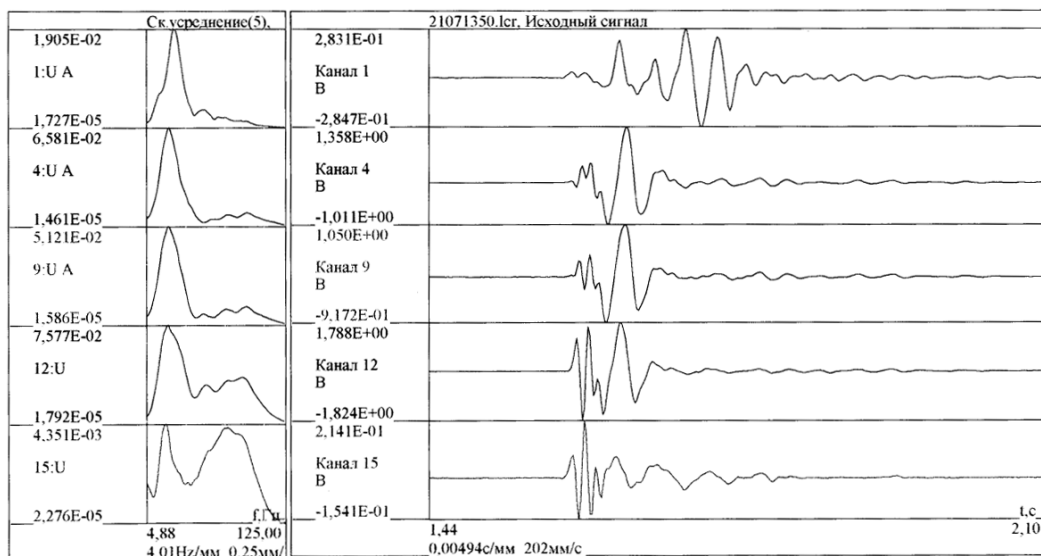


Рис. 5. Появление значительной ВЧ составляющей в ближней зоне мощного невзрывного импульсного источника ГСК- 6М

Площадь реального спектра колебаний – важный показатель нелинейного поведения грунта при различных уровнях воздействия. Она представляет собой надежный индикатор физического состояния среды и характеризует ее деформируемость или степень отклонения ее поведения от линейно-упругого закона Гука. По результатам исследований сильных землетрясений, полученных с помощью системы SMART1 значительная нелинейность на графиках проявляется, начиная с ускорений $a = 0,1g$ (рис. 6). В связи с тем, что значительная нелинейность проявляется для величин ускорений порядка $0,1g$, именно для таких уровней воздействий, несомненно, следует ожидать ВЧ излучение, которое быстро затухает при удалении от источника и, поэтому, не регистрируется при сильных землетрясениях.

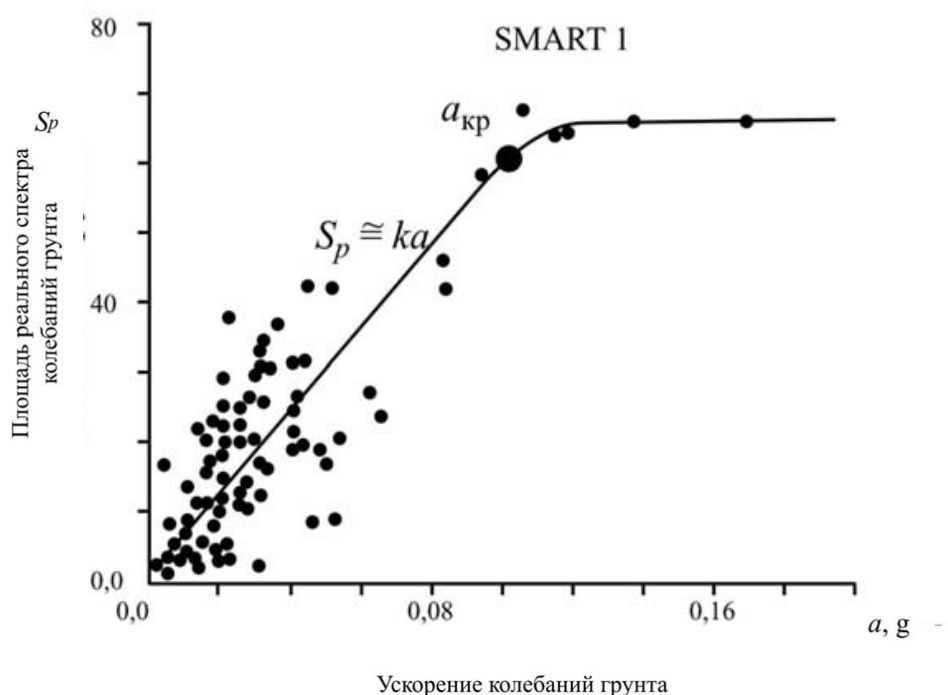


Рис. 6. Зависимость площади реального спектра колебаний от ускорения (Тайвань)

При ускорениях, достигающих значений $a = 0,1g$, начинается «излом» кривой зависимости площади реального спектра от ускорения для ст. Земобари (рис. 7б), расположенной на рыхлых грунтах. На скальных грунтах указанное явление отсутствует (рис. 7а). Поглощение при малом уровне воздействия по мере увеличения последнего растет линейно до ускорения $a = 0,08-0,1g$, далее стремительно уменьшается и при ускорении $a > 0,2g$ поглощение вновь начинает увеличиваться, характеризуя тем самым переход физической системы в новое напряженно-деформированное состояние.

Вся теория колебаний, построенная на законе Гука, является приближенной, поскольку в ее основе лежит разложение упругой энергии в ряд по степеням тензора деформации, причем оставляются члены до второго порядка включительно [Ландау, Лифшиц, 1987]. Соответственно компоненты тензора деформации и уравнения движения – линейны. При переходе к следующим приближениям линейные свойства исчезают, возникают ангармонические эффекты – это геометрическая не-

линейность. Эффекты следующих приближений хотя и являются малыми, но в некоторых случаях могут играть основную роль. Эффекты ангармоничности третьего порядка приводят к тому, что на совокупность основных монохроматических волн с частотами ω_1 и ω_2 накладываются некоторые «волны» слабой интенсивности с комбинационными частотами $\omega_1 \pm \omega_2$. Другой тип нелинейности физической – выражается в нелинейности связи «напряжение-деформация».

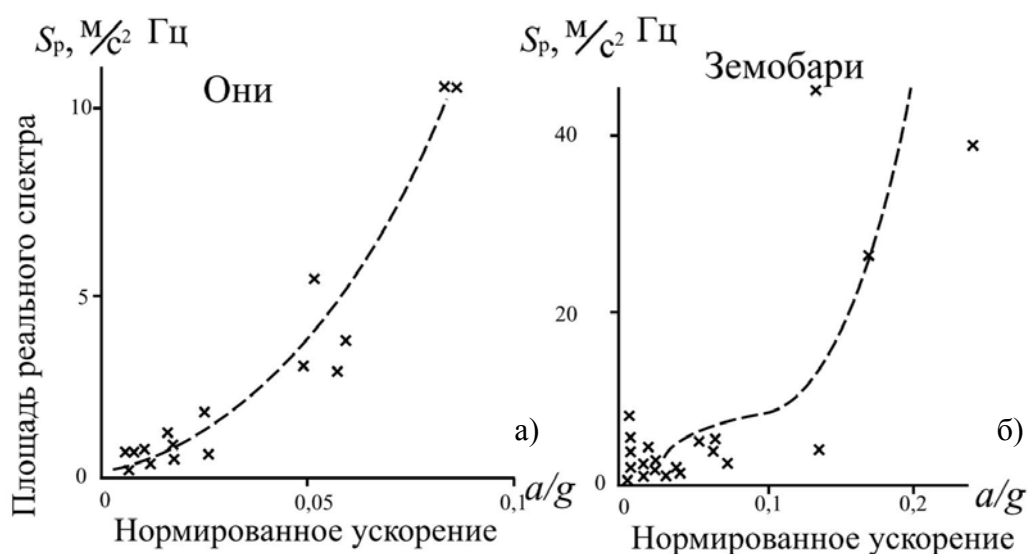


Рис. 7. Зависимость площади реального спектра колебаний от ускорения, *СМАСН (Грузия, 1991)*

При интенсивных нагрузках, когда наблюдается увеличение поглощения сейсмической энергии, рассматриваемые процессы уже не могут предполагаться изотермическими. Если предположить процессы адиабатическими (т.е. без теплообмена с другими участками среды), то упругие «константы» становятся зависимыми от температуры [Ландау, Лифшиц, 1987].

Тепловое движение заставляет ионы решетки колебаться вокруг своих положений равновесия. Удерживающими силами являются силы химической связи. Все упругие свойства, сжимаемость и распространение сейсмических волн определяются этими свойствами. Причем эти свойства, обычно описываются в рамках континуальной теории, в которой не учитывается атомная структура [Маделунг, 1980]. Континуальное приближение соответствует фонному спектру, взятому при волновом векторе $K \rightarrow 0$ ($\lambda \rightarrow \infty$), и также называется «длинноволновым приближением». Рассмотрение процессов на более детальном уровне должно дать ответы на многие вопросы и, в частности, увеличение поглощения сейсмической энергии с увеличением интенсивности воздействия (рис. 5-6), представляющее собой не что иное как переход энергии в «тепловой диапазон».

Для простоты рассмотрим потенциал Леннарда Джонса (рис. 8), обычно применяемый для описания простейших молекулярных кристаллов [Ашкрофт, Мерлин, 1979]:

$$\phi(r) = -\frac{A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}}, \quad (1)$$

где A и B – положительные коэффициенты, r – расстояние между атомами.

Таким образом на больших расстояниях потенциал является «притягивающим», а на малых расстояниях «сильно отталкивающим» (показатель степени выбран равным 12 из соображения удобства вычислений и требования, чтобы это число было больше 6).

Особенности потенциала взаимодействия атомов и молекул вещества также объясняют известное явление «бимодульности», т.е. различного вида зависимости напряжений от деформаций при сжатии и растяжении [Заалишвили, 2009].

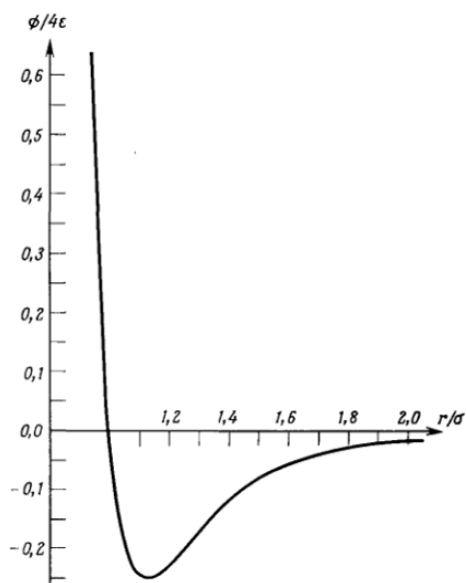


Рис. 8. Потенциал Леннарда-Джонса [Ашкрофт, Мерлин, 1979].

Особое место среди нелинейных эффектов занимает возникновение постоянной составляющей поля смещений грунта в зоне интенсивных динамических воздействий [Заалишвили, 2000]. Из-за ярко выраженной нелинейной связи напряжение–деформация на границе полупространства имеет место неодинаковость фаз разрежения и сжатия. Это выражается в возникновении т.н. сейсморадиационной силы, приводящей к характерному приподнятию грунта. Исследования показали, что при воздействии вибрационного источника на грунт в нем создается постоянная составляющая, которая может быть измерена по величине наклона поверхности толщи, который уменьшается с удалением от источника (рис. 9).

Изменение интенсивности воздействия также существенно изменяет величину наклона (рис. 10). И, наконец, эффект непосредственно зависит от литологического состава грунта. Более слабым грунтам соответствуют более высокие значения угла наклона, т.е. если для более плотных (скальных) грунтов изменение давления в цилиндре вибратора приводит к еле заметному эффекту, то для более рыхлых – он весьма ощутим. При максимальном давлении системы гидроцилиндра (180 атм) для песка и асфальта, перекрывающего указанный песок, грунтовые разрежения весьма резко увеличиваются.

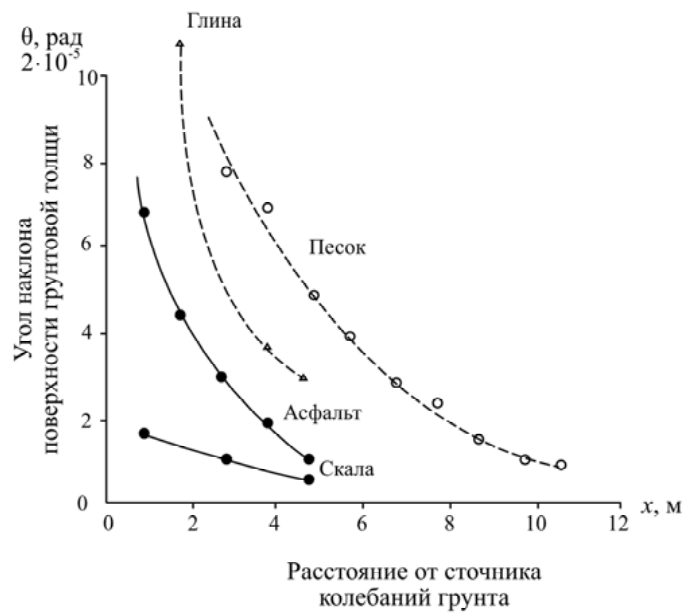


Рис. 9. Зависимость наклона грунта от расстояния до источника (с. Узнож, Белоруссия, 1992; г. Дедоплисакаро, Грузия, 1992)

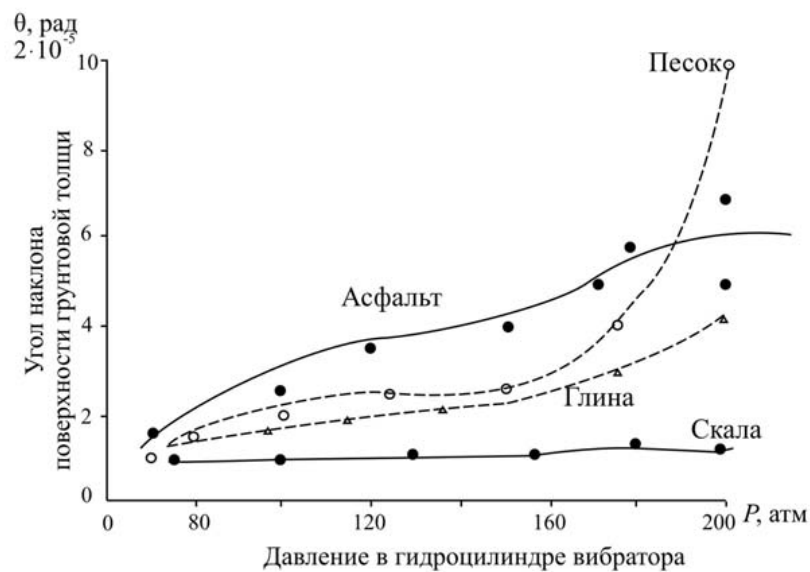


Рис. 10. Влияние давления в гидроцилиндре вибратора на «сейсморадиационный» эффект наклона грунта от расстояния до источника (с. Узнож, Белоруссия, 1992; г. Дедоплисакаро, Грузия, 1992)

Дисперсность означает, что грунт состоит из отдельных частиц различной крупности, либо не связанных между собой, либо связанных, но с прочностью связей намного меньшей прочности самих частиц грунта. Между частицами имеются поры, которые могут быть заполнены либо газом, либо жидкостью. Структурированная вода, как показывают результаты экспериментальных исследований, существенно влияет на различные свойства строительных материалов [Родионов, 2006]. Структура воды и её свойства определяются взаимосвязями и формой кластеров, в которые объединяются атомы воды под влиянием внешних активирующих воз-

действий. По размерам атома (0,3 нм) и кластеров воды (несколько нм) технологии использования структурированной воды следует отнести к классу нанотехнологий.

Дисперсные горные породы являются специфической средой распространения сейсмических волн. Этот факт недостаточно учитывается современной сейсмологией. Между тем практическое значение этого вопроса велико, т.к. грунтами основаниями зданий и сооружений по большей части являются дисперсные породы [Кригер и др., 1994].

Физико-химические и сейсмоакустические процессы в дисперсных породах взаимодействуют. Упругие волны могут вызывать физико-химические процессы. Поэтому сейсмические характеристики дисперсных пород и интенсивность сейсмических эффектов в них в значительной мере зависят не только от состава пород, но и изменяющейся термодинамической обстановки.

Кристаллическая решетка твердых частиц грунта образована химическими элементами – ионами, несущими тот или иной электрический заряд. Внутри кристаллической решетки заряды ионов различных знаков уравниваются, а на поверхности твердой частицы ионы уравниваются только частично. Таким образом, такая частица не является нейтральной и ведет себя как заряженное тело. Теоретически заряд должен распространяться по всей поверхности частицы одинаково, однако, как отмечает С.С. Вялов [1978], базальные плоскости глинистых частиц заряжены отрицательно, а кромки (торцы) – положительно.

Обычно при диаметре зерен $> 0,1$ мм влияние структуры дисперсных пород на их сейсмические свойства выражены слабо [Кригер и др., 1994], такой крупности соответствуют мелкие пески. Пылеватые частицы (пылеватые пески) имеют размер частиц 0,05–0,005 мм [Абуханов, 2006] и по характеристикам занимают промежуточное между песчаными и глинистыми частицами положение. По крупности к глинистым частицам относятся частицы с размерами $< 5 \cdot 10^{-6}$ м, т.е. фактически исследуемые процессы рассматриваются на наноуровне (частицы размерами от 1 до 1000 нм обычно называют нано частицами). Многими исследователями отмечено, что свойства глинистых частиц значительно отличаются от песчаных. Глинистые частицы имеют вид чешуек, пластин или иголок неправильной угловатой формы, при этом толщина их в 10–50 и даже 100 раз меньше максимального размера. В результате этого глинистые частицы имеют большую удельную поверхность по сравнению с песчаными.

Как известно, один из важнейших вопросов, стоящих перед нанотехнологией – это заставить молекулы группироваться определенным способом, самоорганизовываться, чтобы в итоге получить новые материалы с новыми свойствами. Одновременно приведенные примеры показывают, что при интенсивных сейсмических нагрузках происходит изменение структуры грунтов. Указанные явления в грунтах также представляют интерес для супрамолекулярной химии, изучающей более сложные, чем молекулы, химические системы связанных в единое целое посредством межмолекулярных (нековалентных) взаимодействий.

Таким образом, при интенсивных воздействиях поведение напряженно-деформированной среды определяется интегральным результатом колебаний молекул около положения равновесия. При этом амплитуда колебаний прямо пропорциональна температуре среды, которая будет расти по мере увеличения уровня воздействия.

При сильных сейсмических воздействиях резко падает прочность рыхлых грун-

тов, их структурные связи ослабевают, а скорости поперечных волн уменьшаются. Это опять же обусловлено свойствами среды на молекулярном и атомном уровне. Скорости упругих волн зависят от свойств среды на молекулярном и атомном уровне, что обусловлено энергией кристаллохимических связей.

Это впервые констатировали в 1959 г. М. Борн и Х. Кунь, а также позже О. Андерсон и Р. Либерман (1970), Кригер (1984), Заалишвили В.Б.(1987) [Кригер и др., 1994; Заалишвили, 1997; Заалишвили, Тотиева–Туаева, 2010].

Исследование механизмов поглощения энергии сейсмических колебаний на наноуровне позволит на физической основе объяснить явления, наблюдаемые при интенсивных сейсмических нагрузках в средах с различными свойствами.

Заключение

При интенсивных воздействиях в слабых средах имеют место пластические деформации. Пластические деформации сопровождаются высокочастотным излучением, величина которого хотя и превосходит т.н. основные колебания, но с расстоянием быстро затухает из-за сильнейшего поглощения и, как правило, не сейсмическими станциями не регистрируется.

При интенсивных воздействиях поведение напряженно-деформированной среды определяется интегральным результатом колебаний молекул около положения равновесия. При этом амплитуда колебаний прямо пропорциональна температуре среды, которая будет расти по мере увеличения уровня воздействия.

При сильных сейсмических воздействиях резко падает прочность рыхлых грунтов, их структурные связи ослабевают, а скорости поперечных волн уменьшаются. Это опять же обусловлено свойствами среды на молекулярном и атомном уровне.

Исследование механизмов формирования нелинейно-неупругих свойств среды и поглощения энергии сейсмических колебаний на наноуровне позволит на физической основе объяснить явления, наблюдаемые при интенсивных сейсмических нагрузках в средах с различными физико-механическими и иными свойствами.

Литература

1. Абуханов А.З. Механика грунтов. Ростов н/Д: Феникс, 2006. 352 с.
2. Ашкрофт Н., Мерлин Н. Физика твердого тела. М.: Мир, 1979. Т.1, 2.
3. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
4. Заалишвили В.Б. Инструментальный метод сейсмического микрорайонирования. Владикавказ: Изд-во СОГУ, 1997. 76 с.
5. Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования. М.: ОИФЗ РАН, 2000. 367с.
6. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование территорий городов, населенных пунктов и больших строительных площадок. М, Наука, 2009, 350 с.
7. Заалишвили В.Б., Тотиева-Туаева Ж.Д. Механизмы формирования нелинейно-неупругих явлений, обусловленных наноразмерными частицами среды при интенсивных воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – М.: ВНИИСТПИ, №2. 2010. С.26-30.
8. Кригер Н.И., Кожевников А.Д., Миндель И.Г. Сейсмические свойства дисперсных пород (сейсмолитологический подход). М.: Инжэко, 1994, 196с.

9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. - 4-е изд. – М.: Наука, 1987. – 248 с.

10. Маделунг О. Теория твердого тела. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.

11. Родионов Р.Б. Инновационный потенциал нанотехнологий в производстве строительных материалов. Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века”, № 8 (91), 2006.

12. Финкель В.М. Портрет трещины. М.: Metallurgia, 1989, 192 с.

13. Grigorkina G.S., Tvauri I.V., Kaloeva A.G., Burdzieva O.G., Sekiba D., Ogura S., Fukutani K., Magkoev T.T. Reduction of nitric oxide with carbon monoxide on the Al–Mo(110) surface alloy // Solid State Communications 233 (2016) 11–14. P. 11-14.

DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20713

NATURE OF NONLINEAR-INELASTIC EFFECTS CAUSED BY NANOSIZE OF PARTICLES AT INTENSIVE IMPACTS

© 2016 V.B. Zaalishvili¹, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., T.T. Magkoev^{1,2}, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof.1, D.A. Melkov¹, Sc. Candidate (Tech.), F.S. Morozov¹

¹Geophysical Institute of VSC RAS, 93a, Markova Str., Vladikavkaz, 362002 Russia, e-mail: cgi_ras@mail.ru

²North-Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, 44-46, Vatutina Str., Vladikavkaz, 362025, Russia.

Comparative study of the nature of the mechanical response of the two materials – diamond and quartz on the impact of nanosized tip is performed with atomic-force microscope NTegra-Aura (NT-MDT). Relationships of nonlinear-inelastic soil effects appearing in the form of high-frequency seismic radiation in the near field zone, changes in vibrations spectrum area, elastic coefficient bimodularity and constant component of displacement field with medium structural features at the atomic level and the character of interatomic and intermolecular interaction are described.

Keywords: nonlinearity, inelasticity, dislocation, soil, scanning probe microscopy (SPM).