



## О ПРОБЛЕМАХ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

М.Л. Владов<sup>1</sup>, В.В. Капустин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119234, Москва, Ленинские горы, 1, офис 523, Россия; e-mail: vladov\_ml@mail.ru

<sup>2</sup>ООО “НИИ ГЕОТЕХ”, 119607, Москва, 2-я улица Энтузиастов, 5, стр. 39, Россия; e-mail: info@geotech.ru

Настоящей публикацией авторы надеются привлечь внимание к проблемам инженерной сейсморазведки. Большинство из них связано с тем обстоятельством, что в основе теории методов инженерной сейсморазведки лежит теория линейно-упругих сред. Накопившиеся к настоящему времени факты свидетельствуют о проявлении нелинейных свойств среды даже в условиях малоамплитудных динамических полей. Современные условия проектирования и строительства сооружений требуют оценки свойств грунтов, находящихся под действием достаточно высоких статических и динамических нагрузок. В данной статье авторы намечают подходы к решению такого рода задач.

*Инженерная сейсморазведка, динамические поля напряжений, динамические нагрузки, статические нагрузки, нелинейность*

### PROBLEMS OF SHALLOW ENGINEERING SEISMIC SURVEYS

M.L. Vladov<sup>1</sup>, V.V. Kapustin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University,

119234, Moscow, Leninsky Gory, bld. 1, room 523, Russia; e-mail: vladov\_ml@mail.ru

<sup>2</sup>LLC “RSI GEOTECH”, 119607, Moscow, St. Second Entuziastov, 5, bld. 39, Russia, e-mail: info@geotech.ru

By this publication we wish to draw attention to problems in shallow engineering seismic surveys due to inconsistency between the linear elasticity assumption lying at the base of the methods and nonlinear (yielding) behaviour of soils even under weak dynamic loads. We suggest some approaches to assessment of soil properties under rather high static and dynamic loads, which is indispensable nowadays in civil and engineering construction.

*Engineering seismic survey, stress field, dynamic load, static load, nonlinearity*

Инженерная (малоглубинная) сейсморазведка за более чем полувековую историю своего развития неоднократно сталкивалась с целым рядом проблем, связанных с необходимостью решения неординарных задач при постоянно усложняющихся условиях проведения полевых работ. Урбанизация и индустриализация территорий создают постоянно меняющиеся условия, в которых наземной инженерной сейсморазведке приходится “приспосабливаться”, что выражается в появлении различных ее модификаций.

Прогресс в развитии аппаратуры, методики и программных средств обработки, достигнутый к настоящему времени, позволяет проводить работы с многоканальными и площадными (3D) установками, использовать трехкомпонентную и селективную регистрацию, значительно повысить точность и разрешающую способность наблюдений, осуществлять работы на инверсных разрезах и разных типах волн, применять различные виды решения задачи сейсмической инверсии.

Современные портативные сейсмостанции позволяют применять целый комплекс сейсмических методов, использующих различные типы (поверхностные, объемные продольные и поперечные) и виды (прямые, отраженные, обменные, преломленные, рефракированные) упругих волн [Применение..., 1992].

По отношению к типу источников динамического поля методы инженерной сейсморазведки могут быть разделены на две группы: методы, использующие синхронизируемые невзрывные источники (*active seismic*), и методы пассивной сейсморазведки, основанные на наблюдениях полей природных и техногенных источников (*passive seismic*). В общих чертах, без учета различного рода модификаций методов, схема инженерной сейсморазведки может быть представлена следующим образом (рис. 1).

По отношению к физическим явлениям на границах сред сейсмические методы могут быть разделены на три группы:

1. Отражение и обмен сейсмических волн на границах раздела.
2. Преломление сейсмических волн на границах раздела.
3. Геометрическая дисперсия поверхностных волн на границах раздела.

Применение различных методов инженерной сейсморазведки способствует решению следующих задач:

- определение скоростей распространения упругих волн в грунтовом массиве;
- определение геометрии границ, на которых происходит резкое изменение акустической жесткости;

- оценка деформационных и прочностных свойств грунтов;
- оценка зависимости параметров упругого поля от действующих напряжений;
- оценка зависимости параметров упругого поля от литологии, вещественного состава, структурных связей грунтов;
- оценка неоднородности и анизотропии грунтового массива;
- оценка частотных характеристик грунтовых массивов.

Возможно, к этому списку можно добавить еще ряд позиций, но в сущности это три группы задач: оценка геометрической модели грунтового разреза, оценка вещественного состава и оценка его физических свойств. Что касается первой группы задач, то развитие методов их решения происходит достаточно прогрессивно: этому способствуют развитие способов компьютерной обработки, трехмерные системы наблюдений, томографические способы инверсии и т. п. При оценке состояния и физических свойств грунтов важна возможность максимально подробного изучения динамических характеристик сейсмических записей, в том числе в абсолютных значениях. Последнее обстоятельство потребует калибровок источников и сейсмических каналов сбора информации. Это необходимо для получения значений колебательной скорости, оценок величин напряжений и деформаций на фронте упругой волны и количественных оценок потерь энергии волны при распространении в массиве грунта. В этом случае полученные данные могут быть пригодны для оценки поведения массивов грунтов при различных нагрузках и способах их приложения, характерных для условий строительства и воздействия землетрясений.

Проявление нелинейных свойств грунтов при распространении динамических напряжений зависит от физико-механических свойств, деформационных и прочностных характеристик грунтов, от величины динамической нагрузки, скорости и цикличности ее изменения. Анализируя данные, получаемые в методах инженерной сейсморазведки, можно столкнуться с разными видами проявления нелинейности. При наблюдении малоамплитудных волн чаще всего приходится иметь дело со следующими проявлениями нелинейности:

- взаимодействие волн разной частоты, приводящее к образованию колебаний с комбинационными частотами;
- изменение формы волны в процессе распространения;
- нелинейное поглощение волн;
- способность среды передавать часть своей внутренней энергии в колебательный процесс.

Как показано в работе [Логинов и др., 2012], исследование динамических особенностей волновых полей, определяемых нелинейными эффектами, позволяет получить дополнительную информацию о состоянии проницаемых сред.

Целью настоящей статьи является обсуждение некоторых проблем, тормозящих физически обоснованное применение инженерной сейсморазведки при изучении свойств и состояния массива грунтов. Авторы надеются, что напоминание об известных фактах и обозначение направлений преодоления существующих затруднений будут способствовать развитию научных исследований в этих направлениях.

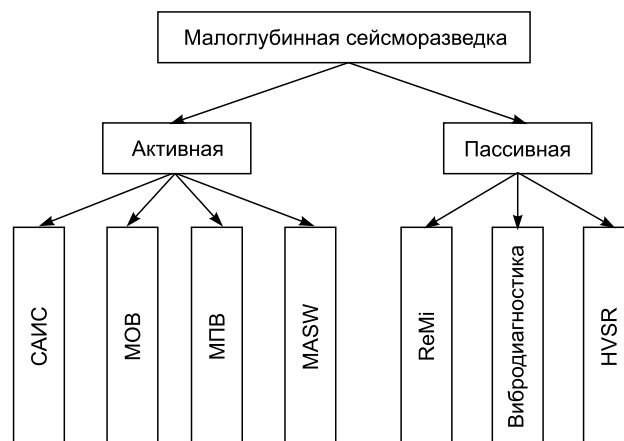


Рис. 1. Схема методов инженерной сейсморазведки.

САИС – сейсмоакустические исследования скважин с использованием волн разных типов, МОВ – методы, использующие отраженные волны, МПВ – методы, использующие преломленные и преломленно-рефрагированные волны, MASW (*multichannel analysis of surface waves*) – методы, использующие поверхностные волны, ReMi (*Refraction Microtremor*), вибродиагностика и HVSR (*the horizontal to vertical spectral ratio*) – методы, использующие волны, распространяющиеся вблизи поверхности.

Физической основой методов малоглубинной сейсморазведки является определение кинематических и динамических параметров поля упругой деформации, создаваемого источниками различной природы. Математической же основой по-прежнему остается теория сплошных линейно-упругих сред. Это в большей степени объясняется малой амплитудой сейсмических волн, наблюдение за распространением которых ведется в методах инженерной сейсморазведки и описание которых производится в рамках теории сплошных линейно-упругих сред посредством линеаризации задач. Рассмотрим принцип линеаризации на примере полной системы уравнений акустики:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \vec{g}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \text{div } \rho \vec{v} = 0, \\ p = p(\rho) \frac{dS}{dt} = 0 \end{cases},$$

где  $v$  – колебательная скорость частиц,  $\rho$  – плотность,  $p$  – давление,  $g$  – сила тяжести,  $S$  – энтропия.

Данные уравнения нелинейные, но так как мы рассматриваем волны малых амплитуд, их можно привести к линейной системе. Для этого обычно используют следующий прием: к начальным значениям добавляют малые по величине возмущающие значения. Далее рассматривают получившиеся уравнения, пренебрегая малыми величинами более высокого порядка:

$\rho_0(\vec{r}, t), p_0(r, t), \vec{v}_0 = 0$  – начальные равновесные характеристики,  
 $\rho'(\vec{r}, t), p'(\vec{r}, t), \vec{v} \equiv \vec{v}'$  – добавки, они несильно изменяют среднее значение, т. е.  $\rho' \ll \rho_0; p' \ll p_0, |\vec{v}'| \ll c$ .

Введем коэффициент Маха:

$$M = \frac{v}{c} \ll 1 \begin{cases} \rho = \rho_0 + \rho', \\ p = p_0 + p', (*) \\ \bar{v} = \bar{v} \end{cases}$$

Подставляем в уравнение Эйлера:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v}, \nabla) \bar{v} = -\frac{\nabla(p_0 + p')}{\rho_0 \left(1 + \frac{\rho'}{\rho_0}\right)} + \bar{g}.$$

Пренебрегаем нелинейностью второго порядка  $(\bar{v}, \nabla) \bar{v}$ , получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} &= -\frac{\nabla(p_0 + p)}{\rho_0} \left(1 - \frac{\rho'}{\rho_0}\right) + \bar{g}, \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} &= -\frac{\nabla p_0}{\rho_0} - \frac{\nabla p'}{\rho_0} + \frac{\nabla p_0 \rho'}{\rho_0^2} + \frac{\nabla p' \rho'}{\rho_0^2} + \bar{g}. \end{aligned}$$

Слагаемое  $\frac{\nabla p' \rho'}{\rho_0^2}$  – второй порядок малости, в итоге получим уравнение

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\frac{\nabla p_0}{\rho_0} - \frac{\nabla p'}{\rho} + \frac{\nabla p_0 \rho'}{\rho_0^2} + \bar{g}.$$

Опустим дальнейшие выкладки и предположим, что можно пренебречь изменениями давления и плотности по координате  $z$ . Тогда полная система линеаризованных уравнений акустики идеальной однородной жидкости выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\frac{\nabla p'}{\rho_0}, \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \bar{v} = 0, \\ \frac{\partial p'}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho'}{\partial t}. \end{cases}$$

Именно тот факт, что в основе методов лежат малоамплитудные волны, является одной из принципиальных причин внутреннего конфликта в современном состоянии инженерной сейсмозащиты, который можно сформулировать как все чаще проявляющееся на практике несоответствие математического описания процессов распространения волн наблюдаемым фактам. Проиллюстрируем данное утверждение следующим примером. Пористые грунты и трещиноватые горные породы могут обладать свойством по-разному сопротивляться сжатию и растяжению даже в условиях малых деформаций. Такого рода материалы называются бимодульными [Амбарцумян, 1982; Gianluca, 1982]. Свойство бимодульности характеризуется существенным различием значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона при растяжении  $E_{+} \nu_{+}$  и при сжатии  $E_{-} \nu_{-}$  [Ватолин, 1966; Rigbi, 1980]. При расчетах напряженно-деформированного состояния бимодульных материалов этим свойством часто пренебрегают, рассматривая обыкновенную линейно-упругую модель сплошной среды, что может приводить к принципиальным расхождениям с экспериментальными данными.

Сильно выраженным свойством бимодульности обладает такой распространенный строительный материал, как бетон. Для некоторых видов мелкозернис-

того бетона модуль Юнга при растяжении в 2–3 раза меньше, чем при сжатии. Столь существенные различия в значениях параметров, очевидно, будут приводить к значительным расхождениям в результатах расчетов деформаций для бетона без учета его свойства бимодульности. Для разных типов гранитов модуль Юнга при сжатии превосходит модуль Юнга при растяжении до 1.5 раза, а для осадочных пород (известняки, песчаники) – до 4 раз. Некоторыми из проявлений свойств бимодульности может считаться появление постоянной составляющей в поля смещений, впервые предсказанное А.В. Николаевым [1967], а также объемных деформаций при реализации чистого сдвига.

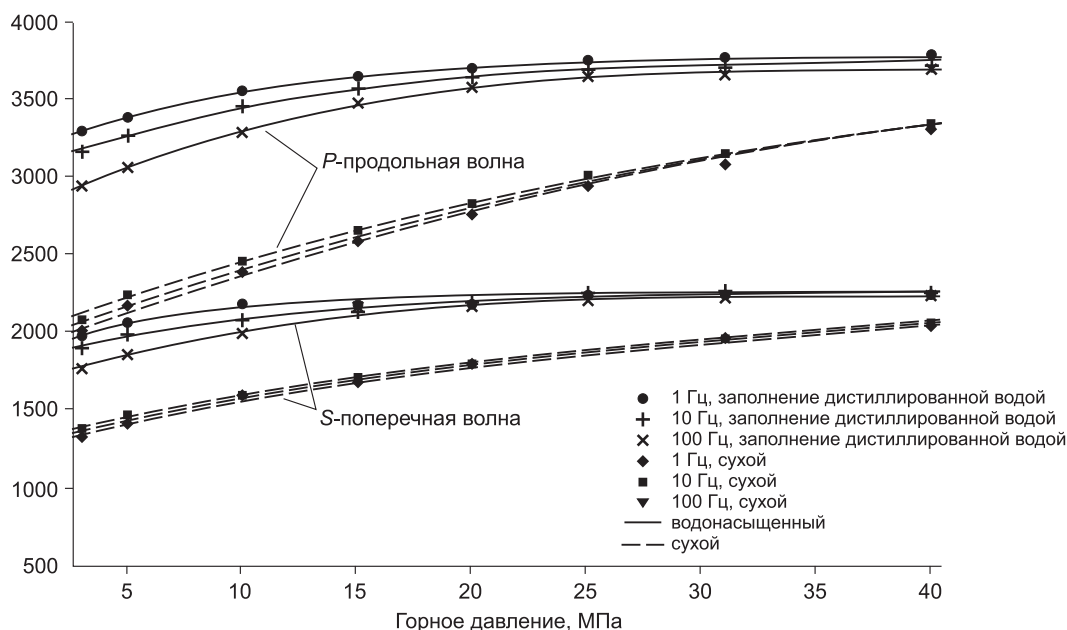
Следующей причиной, приводящей уже к внешним конфликтам, таким как несовместимость данных сейсмозащиты и данных, получаемых методами инженерной геологии, является то, что это малоамплитудное воздействие, создаваемое упругой волной при сейсмических исследованиях, еще и очень кратковременное.

Основной подход к характеристике тела, в котором распространяются упругие волны, в сейсмозащитке вообще и в инженерной сейсмозащитке в частности состоит в аппроксимации среды идеально упругим телом Гука. На этой основе производятся и все расчеты динамических модулей, которые, собственно, и называются динамическими, поскольку получены из сейсмических данных:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad \delta = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}, \quad v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\sigma}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}},$$

где  $\lambda$  и  $\mu$  – константы Ламэ, где одна из них  $\mu$  – модуль сдвига,  $E$  – модуль Юнга,  $\delta$  – коэффициент Пуассона,  $V_p$  и  $V_s$  – значения скоростей распространения продольных и поперечных волн, соответственно. (В другой распространенной системе обозначений:  $G$  – модуль сдвига,  $\nu$  – коэффициент Пуассона.)

К настоящему времени накопилось много экспериментальных фактов, свидетельствующих о недостаточности линейно-упругой модели для описания волновых процессов. Как показано в работе [Логинов и др., 2012], некоторые динамические характеристики сейсмических записей нередко указывают на неидеальную упругость среды. Тогда начинают изучать характеристики этой неидеальной упругости – отличия от тела Гука – как дополнительный параметр среды. Это в большей степени объясняется тем, что описание распространения волн напряжений в нелинейных средах связано со значительными математическими трудностями. Ярким примером такого подхода являются определения параметров поглощения сейсмической (акустической) энергии для того же разреза или слоя, для которого динамические модули вычисляли по приведенным выше формулам, т. е. для идеально упругого тела. Наиболее распространенные способы изучения поглощающих свойств среды изложены в работах [Владов и др., 2003; Sams, Goldberg, 1990]. В результате в научной литературе и производственных отчетах нередко появляются таблицы, в которых одновременно присутствуют динамические модули упругости и значения параметров поглощения для конкретной геологической среды. Суммируя вышесказанное, можно прийти к заключению, что основной проблемой в инженерной сейсмозащитке является необходимость прогнозирования физических



**Рис. 2.** Значения продольных и поперечных скоростей, полученные при различных нагрузках и частотах (1, 10 и 100 Гц) для сухого и водонасыщенного песчаника [Mikhailsevitch et al., 2012].

свойств и поведения грунтов под действием относительно высоких по амплитуде и длительности статических и динамических нагрузок посредством изучения ее отклика на действие кратковременных и малоамплитудных динамических воздействий.

При использовании тела Гука для описания поведения сред в сейсморазведке обычно не рассматривается значение начальной величины напряжения, а также времени действия и скорости нагружения. Вместе с тем экспериментально установлено, что одно и то же тело ведет себя по-разному именно в зависимости от величины и способа нагружения (рис. 2).

Соответственно, одно и то же тело в зависимости от способа приложения нагрузки может описываться разными упругими модулями, а в ряде случаев – разными системами уравнений. Возникает естественный вопрос: насколько правомерно применять для грунтового массива, находящегося в условиях нагрузок, соответствующих началу пластических деформаций, линейно-упругую модель для описания распространения малоамплитудных волн? А ведь это довольно типичная ситуация для инженерной сейсморазведки. Обычно распространение малоамплитудных волн в среде, находящейся под действием статических нагрузок, рассматривается с позиций линейной упругости, а изменение фазовой или групповой скорости корреляционно связывается с изменением напряженного состояния массива.

Принципиальный вопрос о соотношении упругих модулей, полученных по данным сейсморазведки и иными (инженерно-геологическими) способами при конечных напряжениях и относительно длительных воздействиях, ставился довольно давно [Савич и др., 1966; Применение..., 1992]. Рассмотрение приведенных в указанных работах результатов привело нас к очевидному выводу: чем ближе порода к телу Гука, тем меньше отличия между динамическими и статическими модулями. Таким образом, на оси “слабо отличаются” – “сильно отличаются” слева будут распола-

гаться сохраненные кристаллические породы, а справа – слабоконсолидированные осадки с большой долей глинистых частиц и воды. Для одного и того же способа измерений прочностных и деформационных характеристик данная порода может переходить в разные категории в зависимости от внешних условий – статической нагрузки, температуры и иных факторов, приводящих к упрочнению структурных связей. Например, водонасыщенный песок при положительной температуре весьма далек от идеально-упругого тела, но при замораживании он сильно сдвинется по упомянутой оси влево.

Значения динамических модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента Пуассона, определяемые по данным сейсморазведки, относятся к линейно-упругому деформированию грунтов и, строго говоря, не могут быть использованы для оценки поведения грунтов под статическими и динамическими нагрузками от реальных сооружений и воздействий.

Здесь необходимо отметить, что скорость деформирования заметно влияет на свойства материалов [Вознесенский, Сидорова, 2009; Вознесенский и др., 2013]. Для большинства грунтов зависимость может быть представлена в общем виде (рис. 3).

У большинства материалов с увеличением скорости деформации повышаются характеристики прочности (предел прочности и предел текучести) и снижаются характеристики пластичности. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований различных материалов. В качестве примера можно привести результаты в работе [Степанов и др., 2010] (рис. 4).

Как уже отмечалось, грунты проявляют линейно-упругое поведение до относительно небольших нагрузок. Однако даже в этом случае при разгрузке в грунтах может возникнуть остаточная деформация. При больших нагрузках деформации в грунтах начинают нелинейно зависеть от напряжений. Это особенно необходимо учитывать при проектировании высотных

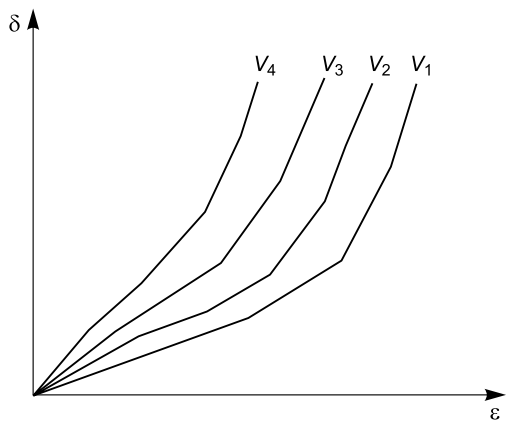


Рис. 3. Кривые зависимости напряжения  $\sigma$  от деформации  $\varepsilon$  ( $\delta = f(\varepsilon)$ ) при различных скоростях приложения нагрузки ( $V1 < V2 < V3 < V4$ ).

зданий, когда давление по подошве фундаментов может составлять 600–800 кПа. Определение жесткости грунта или модулей деформации необходимо для решения одной из основных теоретических задач фундаментостроения, которой является прогноз осадки фундаментов.

Деформации грунтов под основаниями зданий и сооружений определяются с использованием упругих параметров: модуля деформации  $E$ , модуля сдвига  $G$ , модуля объемной деформации  $K$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .

На рис. 5 представлена обобщенная зависимость между статическими и динамическими модулями по данным разных исследователей для разных пород [Применение..., 1992]. В относительной мере пунктирной линией отмечено положение тела Гука – идеально упругого. На других графиках из указанной работы можно видеть, что чем выше акустическая жесткость породы, тем ближе она к телу Гука и тем вернее оценки ее физических свойств по сейсмическим данным.

На рис. 6 показан пример, где мерой близости к идеально-упругому телу является наклон отрезков аппроксимирующих прямых. Чем ближе наклон к вертикали, тем дальше среда от идеально упругого тела, тем больше разница между значениями динамических и статических модулей. Соль дальше от тела Гука, чем полускальные породы. Это может быть объяснено, в

частности, тем, что в процессе деформации несвязных грунтов при наличии значительных нагрузок нарушаются структурные связи [Ватолин, 1966]. Деформация тела Гука ограничивается только изменением линейных размеров. Для описания деформации пористой среды необходимо рассматривать тело Кельвина [Столл, 1977].

Оценка статических значений данных модулей с использованием сейсмических методов основана на корреляционной зависимости между результатами лабораторных испытаний (или полевых методов испытаний грунтов) и значениями скоростей распространения упругих волн, полученных сейсмическими методами (или параметра, вычисленного на основе измеренных скоростей). По сути, параметры, полученные на основе корреляционных зависимостей, являются прогнозной оценкой значения изучаемого параметра, который может быть получен в результате прямых лабораторных испытаний образца, в точках определения значений сейсмических скоростей.

Аналогичная ситуация возникает и при определении прочностных характеристик, в частности, использовании корреляционной зависимости для предела прочности на одноосное сжатие. Статические и динамические характеристики пород иногда сильно различаются между собой. Их необоснованное использование может отразиться на результатах расчетов. Поэтому очень важно знать условия применения и получения динамических характеристик горных пород и их связь со статическими параметрами.

Таким образом, мы имеем дело с двумя моделями – моделью среды А и моделью распространения волн напряжений Б в этой модели среды. Какова допустимая степень генерализации каждой из моделей? Какова степень адекватности каждой из моделей реальности? Вот круг вопросов, который в настоящее время очерчен теоретическими основами, аппаративно-методическим комплексом, приемами обработки и интерпретации современной инженерной (малоглубинной) сейсморазведки. Однако даже в случае более или менее успешного решения очерченных выше внутренних проблем сейсморазведки со всей остротой встанет проблема сопоставимости данных сейсморазведки и данных инженерной геологии, относящихся к одному объекту.

На рис. 7 приведено схематическое изображение связей разных групп данных. Главный вопрос – что получают потребители информации об упругих, проч-

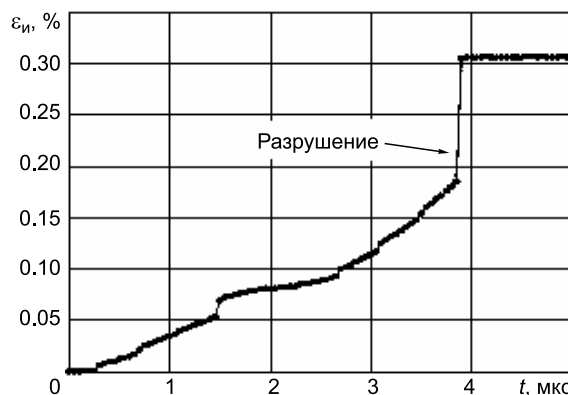
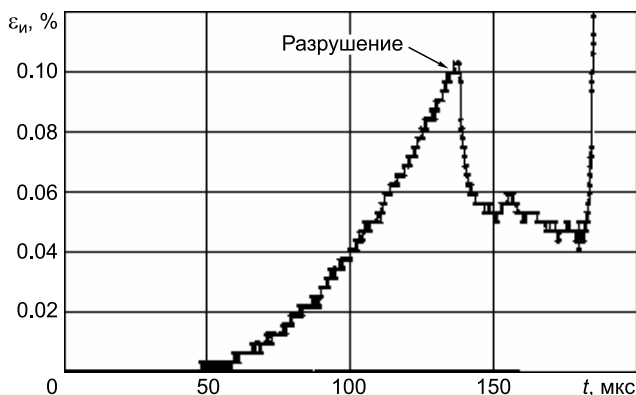


Рис. 4. Примеры экспериментально зарегистрированных осциллограмм зависимости деформации от времени при скорости ударного нагружения соответственно 57 и 177 м/с.

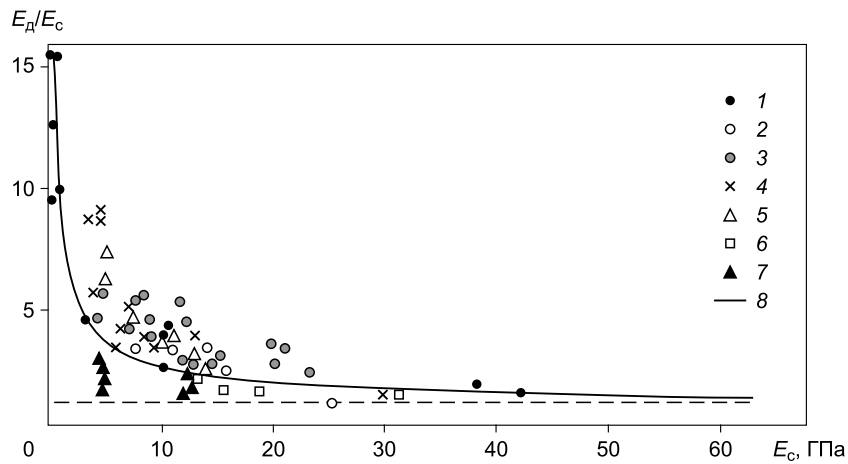


Рис. 5. Пример связи между динамическим и статическим модулями [Применение..., 1992].

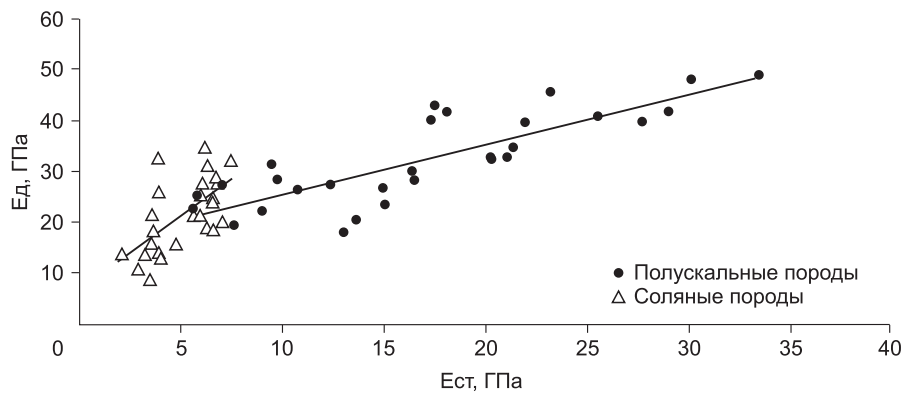


Рис. 6. Взаимосвязь динамических и статических модулей упругости полускальных пород надсолевой толщи и соли [Бельтюков, Евсеев, 2010].



Рис. 7. Схематическое изображение групп данных и связей между ними.

ностных и деформационных свойствах в виде одноименных значений, полученных разными способами? Уровнем ниже представлены два основных источника информации – инженерная геология и сейсморазведка. Еще ниже расположены области внутренних для каждого источника информации проблем. Каждую из этих пар можно обозначить как сопоставимость данных полевых и лабораторных методов (ПЛ, синие линии). Проблемы парной совместимости лабораторных (ЛЛ) и полевых (ПП) данных сейсморазведки и инженерной геологии изображены также синими линиями. Наконец, вопросы сравнения, использования для взаимных прогнозов результатов исследований изображены красными линиями. Наиболее распространенным примером такого перекрестного использования результатов разных методов является использование результатов лабораторных исследований кернов методами инженерной геологии для построения сейсмогеологической модели среды и решения прямой задачи сейсморазведки при расчетах полевых методик сейсмических исследований.

Очевидно, что область внутренних проблем (ПЛ) совместимости данных в инженерной геологии выходит за рамки нашей компетентности и обсуждаться здесь не будет. Вместе с тем, например, в области сейсморазведки несходство полевых и лабораторных данных, полученных с помощью ультразвуковых измерений на образцах, с большой долей правдоподобия может быть объяснено масштабным эффектом и использовано в качестве характеристики массива грунтов. Сопоставление измеряемых значений скоростей упругих волн или вычисляемых на их основе динамических параметров в массивах и в образцах позволяет оценивать значение объемного фактора и содержащуюся в нем информацию. В частности, для скальных и полускальных грунтов – степень трещиноватости и разрушенности. Хотя вклад в это несходство данных определяется различием не только в интегральных физико-механических свойствах массива и образца, но и в инструментах измерений, а как следствие этого – уже упоминавшимися дисперсией скоростей волн, проявлением нелинейных свойств, а также известными эффектами нарушения физико-механических свойств образца при бурении, извлечении и хранении керна и т. д.

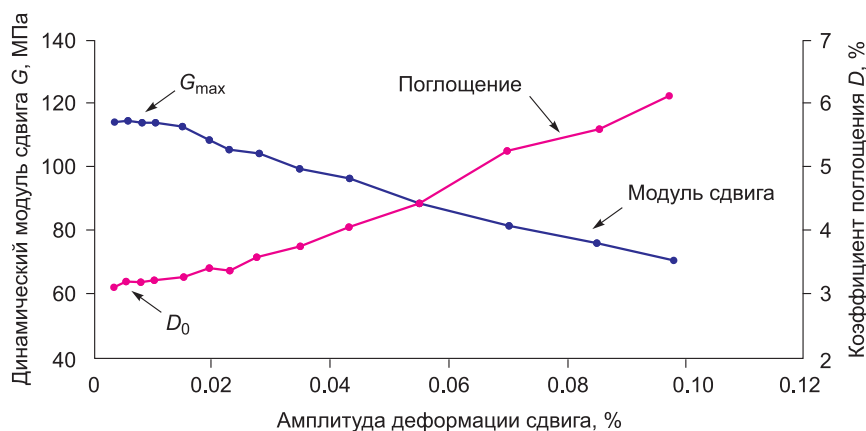
При рассмотрении рис. 3 с учетом вышеизложенного вообще может возникнуть вопрос об информа-

тивности данных сейсморазведки с точки зрения конечного потребителя. В действительности такой вопрос нередко и возникает даже на стадии экспертизы результатов изысканий. Если рассмотреть общеизвестные аргументы в пользу геофизики вообще (и сейсморазведки в частности) в составе инженерно-геологических изысканий, на основании которых составлены нормативные документы, то их окажется достаточно для положительного ответа. Однако практика показывает, что конкретные вопросы не могут быть так легко и однозначно разрешены без серьезных и целенаправленных исследований.

Например, вопрос о поглощении упругой энергии в массиве грунтов. Данные инженерной сейсморазведки часто не соответствуют данным сейсмологии. При этом данные инженерной сейсморазведки используются при микросейсморайонировании. Обычно в качестве объяснения различий в конкретных значениях параметра поглощения в этих областях говорят о различиях частотных диапазонов и различии в величинах напряжений. Скорее всего, это основная причина, однако вряд ли возможен какой-либо переводный коэффициент. Параметр поглощения, определенный методами инженерной геологии, отличается от того же параметра, определенного с использованием данных малоглубинной сейсморазведки по падению давления на фронте поверхностной волны при распространении в приповерхностной толще исследуемого массива грунтов [Вознесенский и др., 2005, 2013].

В качестве примера такой “нестыковки данных” можно сравнить значения параметра поглощения (или добротности) для глин, определенные методом резонансной колонки [Вознесенский и др., 2013] и по данным ультразвуковых измерений на керне. На рис. 8 представлены экспериментальные зависимости коэффициента поглощения  $[D\%]$  энергии волны сдвига и модуля сдвига  $G_{\max}$  в зависимости от величины деформации для глин.

Как отмечено в работе [Вознесенский и др., 2013], анализ таких зависимостей показывает, что в области малых относительных деформаций – примерно до  $10^{-4}$  – динамический модуль сдвига (упругость) и поглощение грунтов можно считать постоянными и равными  $G_{\max}$  и  $D_0$  соответственно. Лишь после преодоления этого порогового уровня деформаций фиксируется в большинстве случаев монотонное увеличение поглощения и деградация упругости. Необходимо



**Рис. 8.** Изменение коэффициента поглощения и динамического модуля сдвига глины  $V_{1kt}$  в функции амплитуды деформации сдвига ( $\sigma' = 487$  кПа,  $\rho = 2.11$  г/см<sup>3</sup>,  $We = 18\%$ ,  $e = 0.536$ ,  $S_r = 0.94$ ) [Вознесенский и др., 2013].

отметить, что резонанс был достигнут в данном случае на частоте около 150 Гц.

В сейсморазведке при изучении параметра поглощения традиционно принята запись множителя, ответственного за этот эффект, как  $e^{-\beta(\omega)Z}$ , где  $\beta(\omega)$  – частотно-зависимое поглощение, а  $Z$  – путь в среде. Более универсальным является представление о добротности –  $Q$ . При этом  $Q = \pi f/V\beta$ , где  $f$  – частота,  $V$  – скорость распространения волны напряжения,  $\beta$  – поглощение. Если придерживаться линейного закона зависимости поглощения от частоты  $\beta = \beta_0\omega$ , тогда  $\beta_0 = 1/(2VQ)$ . Вместе с тем в инженерной геологии принято обозначать коэффициент поглощения как  $D = 1/2Q = \beta_0V$  или в процентах  $D\% = D \cdot 100$ .

Таким образом, во всем диапазоне деформаций на рис. 8 значения  $D$  лежат в пределах 0.03–0.06. В то же время в рамках идеально упругого тела  $V_s = (G/\rho)^{1/2}$  для рис. 4 скорость поперечных волн  $V_s$  лежит в пределах 250–170 м/с. Тогда значения параметра поглощения  $\beta_0 = D/V_s$  оказываются в пределах  $(1.2\text{--}3.5) \cdot 10^{-4}$  с/м. Однако многочисленные измерения в сейсмическом и ультразвуковом диапазоне частот [Mikhaltsevitch et al., 2012] указывают на значения скоростей распространения волн для влажных глин в среднем для поперечных волн  $V_s = 100\text{--}400$  м/с соответственно.

Ультразвуковые измерения на образцах влажных глин ( $J_3$ ) дают значение 230 м/с. При этом параметр поглощения, определенный по этим же измерениям методом деления спектров [Владов и др., 2003; Sams, Goldberg, 1990],  $\beta_0 = 2.8 \cdot 10^{-3}$  с/м в полосе частот 8–18 кГц. С этими значениями можно сравнить значение параметра поглощения, полученное по данным сейсмоакустического каротажа скважин,  $\beta_0 = 3.3 \cdot 10^{-3}$  для поперечных волн при скорости распространения  $V_s = 300$  м/с в полосе частот 200–300 Гц.

С одной стороны, можно говорить о небольшой, с учетом возможных различий, связанных со свойствами конкретных глин, разнице в значениях ско-

ростей поперечных волн, а с другой стороны, определенные разными способами в лаборатории параметры поглощения отличаются на порядок. В то же время весьма близки параметры поглощения, определенные по данным сейсмоакустики, хотя частотные диапазоны измерений отличаются почти в 100 раз.

Можно было бы говорить о различии в величинах деформаций при разных способах измерения в данном примере, но в соответствии с известной закономерностью роста поглощения с ростом деформаций, отраженной на рис. 4, значения параметра поглощения должны быть выше в случае лабораторных измерений, где реализуются очевидно более высокие уровни деформации, чем при сейсмоакустических измерениях в десятках метров от источника колебаний и при ультразвуковых измерениях в лаборатории.

В настоящее время повышение точности измерительной аппаратуры и возможность проведения наблюдений в более широком, чем прежде, частотном диапазоне позволяют производить наблюдения, на основании которых можно усложнять модель среды и вовлекать в анализ недоступные ранее параметры волнового поля. Например, созданы лабораторные установки, позволяющие на небольших образцах проводить измерения со строго контролируемыми напряжениями и деформациями в практически неограниченном диапазоне частот и широком диапазоне деформаций (рис. 9) [Mikhaltsevitch et al., 2011].

В заключение, не претендуя на общность результата рассмотрения вышеизложенного и указание всех путей развития инженерной (малоглубинной) сейсморазведки, наметим следующие основные направления ее развития:

1. Изучение проявлений нелинейных эффектов при малоглубинных, инженерных сейсмических исследованиях как физически обоснованной необходимой информации для оценки состояния грунтов, вещественного состава, структурных связей, анизотропии, текстуры и т. п.

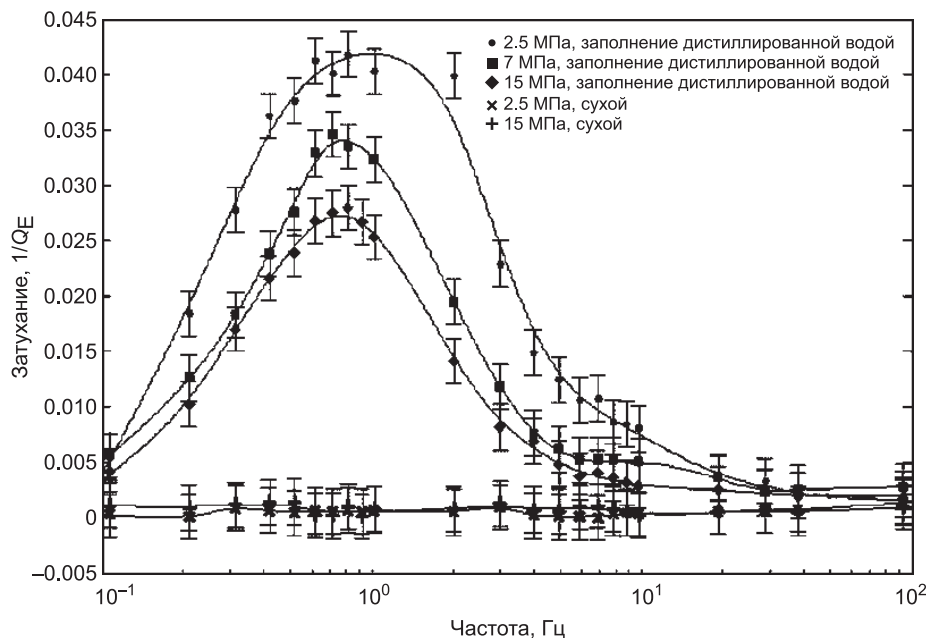


Рис. 9. Внешний вид образца песчаника, подготовленного к измерениям, и пример полученных зависимостей поглощения от частоты [Mikhaltsevitch et al., 2011].



2. Необходимость поиска обоснованного перехода от оценки свойств грунтов при малых и быстрых деформациях с помощью инженерной сейсморазведки к таким же оценкам при конечных и долговременных воздействиях. Для сейсморазведки это означает инструментальный и методический переход в ближнюю зону хотя бы при наблюдениях во внутренних точках среды (САИС и др.), а также массовые пассивные измерения в зонах воздействия волн напряжения конечных амплитуд и циклических нагрузок, например, на железных дорогах, плотинах и т. д.

3. Заполнение междисциплинарного разрыва в частотном диапазоне, а также в диапазонах напряжений и деформаций при изучении физико-механических свойств грунтов. Спектр современных лабораторных исследований твердых тел разной степени консолидации позволяет двигаться в этом направлении.

4. При оценке состояния и физических свойств грунтов необходима возможность максимально подробного изучения динамических характеристик сейсмических записей, в том числе в абсолютных значениях. Последнее обстоятельство требует проведения калибровок источников и сейсмических каналов сбора информации.

5. Необходимость перехода в описании физических моделей к математическим моделям, построенным на основе нелинейной теории упругости [Новожилов, 1948].

За рамками рассмотрения осталось множество вопросов и направлений исследований в инженерной сейсморазведке для развития теоретических и практических возможностей изучения с ее помощью свойств и состояния грунтов. Например, вопросы применения в этой области сейсмической теории эффективных сред, где как раз и развивается междисциплинарный подход к описанию свойств и состояния геологической среды [Баюк, 2011].

## Литература

- Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. М.: Наука, 1982. 320 с.
- Баюк И.О. Междисциплинарный подход к определению эффективных физических свойств коллекторов // Технологии сейсморазведки. 2011. № 4. С. 75–82.
- Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В. Сопоставление упругих свойств горных пород // Вестн. Перм. политех. ун-та. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2010. № 5. С. 82–85.
- Ватолин Е.С. Некоторые динамические свойства и природа деформирования горных пород. М.: Наука, 1966.
- Владов М.Л., Мозганова А.В., Шалаева Н.В. Определение параметров поглощения сейсмических волн в породах

верхней части разреза // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2003. № 5. С. 65–68.

Вознесенский Е.А., Владов М.Л., Кушнарера Е.С., Коваленко В.Г. Использование данных сейсмоакустических исследований для оценки динамической устойчивости грунтов в массиве // Разведка и охрана недр. 2005. № 12. С. 41–46.

Вознесенский Е.А., Кушнарера Е.С., Фуникова В.В. Природа и закономерности затухания волн напряжений в грунтах. М.: Наука, 2013.

Вознесенский Е.А., Сидорова А.Ю. Оценка динамических свойств песчаных грунтов с помощью малоамплитудных динамических испытаний в различных условиях нагружения // Инженерная геология. 2009. № 3. С. 18–25.

Логинов К.И., Жуков А.П., Шнеерсон М.Б., Логинов И.В. Нелинейные волновые поля в акустическом каротаже и вибрационной сейсморазведке. Тверь: ГЕРС, 2012.

Николаев А.В. Сейсмические свойства рыхлой среды // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1967. С. 23–31.

Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. М.; Л.: Гостехиздат, 1948.

Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1992.

Савич А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Яценко З.Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М.: Недра, 1966. 239 с.

Степанов Г.В., Зубов В.И., Майстренко А.Л. и др. Влияние способа нагружения на прочность керамических материалов на основе самосвязного карбида кремния // Проблемы прочности. 2010. № 3.

Столл Р.Д. Акустические волны в водонасыщенных осадках // Акустика морских осадков / Под ред. Л. Хэмптона. М.: Мир, 1977. С. 28–46.

Gianluca M.A. Nonlinear elastic model for isotropic materials with different behavior in tension and compression // Transactions of the ASME. 1982. N. 104. P. 26–28.

Mikhailovitch V., Lebedev M., Gurevich B. A low-frequency laboratory apparatus for measuring elastic and anelastic properties of rocks // SEG San Antonio, 2011. Annual Meeting. P. 256.

Mikhailovitch V., Lebedev M., Gurevich B. Low-frequency measurements of the mechanical parameters of sandstone with low permeability // 22nd Int. Geophysical Conf. and Exhibition, 26–29 February 2012. Brisbane, Australia.

Rigbi Z. Some thoughts concerning the existence or otherwise of an isotropic bimodulus material // ASME Journal of Engineering Materials and technology. 1980. N. 102. P. 183–384.

Sams M., Goldberg D. The validity of  $Q$  estimates from borehole data using spectral ratios // Geophysics. 1990. V. 55. N. 1. P. 97–101.

*Поступила в редакцию 8 ноября 2013 г.,  
в окончательном варианте – 24 апреля 2014 г.*

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*ВЛАДОВ Михаил Львович* – профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой сейсмологии и геоакустики МГУ им. М.В. Ломоносова.

*КАПУСТИН Владимир Викторович* – кандидат физико-математических наук, технический директор ООО “НИИ GEOTECH”.