

Никитин И.С., Бураго Н.Г., Голубев В.И., Екименко А.В., Аносова М.Б., Взаимодействие упругих волн с заглубленными слоистыми геоструктурами В сборнике: Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ2020), 6-13 сентября 2020 г., Алушта, Изд-во МАИ (М., 2020), с. 546-548. ISBN 978-5-4316-0699-1

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УПРУГИХ ВОЛН С ЗАГЛУБЛЕННЫМИ СЛОИСТЫМИ ГЕОСТРУКТУРАМИ

Никитин И.С.¹, Бураго Н.Г.², Голубев В.И.^{1,3}, Екименко А.В.¹, Аносова М.Б.¹

¹Институт автоматизации проектирования РАН

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

³Московский Физико-Технический Институт (НИУ)

В работе исследован процесс распространения сейсмических волн в гетерогенной геологической среде. Использовалась модель линейно-упругой среды, позволяющая в явном виде рассчитать все типы возникающих сейсмических волн. Рассматривалась модель баженовской свиты. Для описания динамического поведения входящего в неё тонкослоистого массива аргиллитов использована континуальная модель слоистой среды с учетом межслойного проскальзывания и отслоения. Она учитывает, в том числе, и наличие статического горного давления в геологическом массиве.

В предлагаемой в работе модели тонкослоистого массива аргиллитов составляющие его слои деформируются линейно упруго. Используются уравнения движения и реологические соотношения между тензорами напряжений и скорости деформаций. Таким образом, определяющая система уравнения является гиперболической системой в частных производных первого порядка. Также вводятся две дополнительные переменные – скорость проскальзывания границ слоёв γ и скорость расслоения ω , перпендикулярная к ней. Если нормальное напряжение на межслойной контактной границе $\sigma_n < 0$, то реализуется режим скольжения с трением

$$\gamma = \tau \langle |\tau| / (q|\sigma_n|) - 1 \rangle / (\eta|\tau|), \quad \omega = 0 \quad (1)$$

где τ - касательное напряжение на контактной границе, q - коэффициент сухого трения, η - контактная вязкость, $\langle F \rangle = FH(F)$, $H(x)$ – функция Хэвисайда. В противном случае, реализуется режим расслоения, когда $\Omega > 0$, $\tau = \sigma_n = 0$, где Ω - скачок смещения (отслоение) по нормали к границам слоёв, $\dot{\Omega} = \omega$.

Для того чтобы перейти к континуальной модели среды, содержащей систему таких плоскостей скольжения-отслоения с нормалью \mathbf{n} , переменные γ и ω рассматриваются как непрерывные функции координат и времени. Используются соотношения теории скольжения, которые позволяют учитывать вклад скоростей

скольжений γ и отслоений ω в тензоры скоростей неупругой деформации \mathbf{e}^γ и \mathbf{e}^ω соответственно [1]:

$$\mathbf{e}^\gamma = (\mathbf{n} \otimes \gamma + \gamma \otimes \mathbf{n}) / 2, \quad \mathbf{e}^\omega = (\mathbf{n} \otimes \omega + \omega \otimes \mathbf{n}) / 2 = \omega \mathbf{n} \otimes \mathbf{n}, \quad \omega = \omega \mathbf{n}$$

Полный тензор скоростей деформации \mathbf{e} получается сложением всех упругих и неупругих составляющих и равен:

$$\mathbf{e} = \mathbf{e}^e + \mathbf{e}^\gamma + \mathbf{e}^\omega, \quad \mathbf{e} = (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) / 2$$

Здесь \mathbf{v} – «макроскопическая» скорость частиц среды, \mathbf{e}^e – тензор скоростей упругой деформации, который связан с тензором напряжений законом Гука.

Описанная модель справедлива для случая предварительно ненагруженной среды. Однако на глубинах залегания 2-3 км статическое горное давление велико и должно учитываться в модели. Если ввести угол α , характеризующий отклонение плоскости слоев в аргиллитовом массиве от горизонтали в двумерном случае, то касательное и нормальное напряжение от статического горного давления на глубине y , на фоне которого развиваются волновые процессы, имеют вид:

$$\tau_n^0 = \rho g y \cdot \sin 2\alpha \cdot \mu / (\lambda + 2\mu), \quad \sigma_n^0 = \rho g y (\sin^2 \alpha \cdot \lambda / (\lambda + \mu) + \cos^2 \alpha)$$

Контактное условие (1) с учетом предварительного напряженного состояния, при условии поджатой границы $\sigma_{nn} + \sigma_n^0 < 0$ модифицируется следующим образом

$$\gamma = (\sigma_{n\tau} + \tau_n^0) \left\langle \left| \sigma_{n\tau} + \tau_n^0 \right| / (q \left| \sigma_{nn} + \sigma_n^0 \right|) - 1 \right\rangle / (\eta \left| \sigma_{n\tau} + \tau_n^0 \right|)$$

Соответствующее дифференциальное уравнение модели для компоненты касательного напряжения $\sigma_{n\tau}$ на межслойных границах, в котором учитывается преднапряжение массива аргиллитов на глубине, выглядит следующим образом:

$$\dot{\sigma}_{n\tau} = \mu (v_{n,\tau} + v_{\tau,n}) - \mu (\sigma_{n\tau} + \tau_n^0) \left\langle \left| \sigma_{n\tau} + \tau_n^0 \right| / (q \left| \sigma_{nn} + \sigma_n^0 \right|) - 1 \right\rangle / (\eta \left| \sigma_{n\tau} + \tau_n^0 \right|)$$

Было проведено компьютерное моделирование распространения сейсмических волн в модели баженовской свиты. Рассматривалась 2D постановка задачи. Для расчета упругого шага по времени использовался сеточно-характеристический метод [2]. Для учета эффектов проскальзывания на межслойных границах заглубленного аргиллитового массива применялась процедура корректировки напряжений, полученных при расчете упругого шага [3]. Параметры расчётов подбирались для получения результатов, наиболее схожих с теми, какие используются при выполнении геологоразведочных работ.

Для описания динамического поведения тонкослоистого массива аргиллитов использовалась предложенная континуальная модель. В качестве источника возмущения использовалась изначально заглублённая продольная волна, чтобы снизить время расчётов. Временная зависимость сигнала источника задавалась в виде импульса Рикера с частотой 30 Гц (частота, преобладающая на материалах наземной сейсморазведки). Был проведён анализ сигнала, регистрируемого на дневной поверхности при различных расстановках приемников. Для точечного источника получены типичные сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ) (Рис. 1). На сейсмограммах выделяются основные типы волн: прямая продольная волна, прямая поперечная волна от источника, последовательность отражённых волн от геологических границ. Интерес представляет отрицательное отражение (отмечено кружками) - это отражение от кровли баженовской свиты.

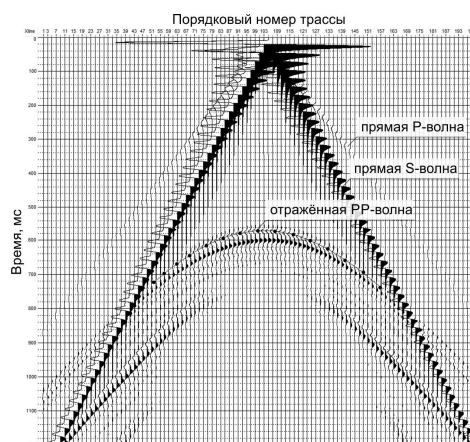


Рис. 1. Сейсмограмма ОПВ, рассчитанная для случая линейно-упругой среды.

Таким образом, регистрируемое волновое поле отражает эффекты, связанные со слоистостью заглубленного массива горных пород. Предложенная математическая модель может использоваться для решения интерпретационных геологических задач.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10060).

Литература

1. Nikitin I.S. Dynamic models of layered and block media with slip, friction and separation // *Mechanics of Solids*. 2008. Vol. 43. № 4. Pp. 652-661.
2. Golubev V.I. The Usage of Grid-Characteristic Method in Seismic Migration Problems // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2019. V. 133. P. 143–155.
3. Nikitin I.S., Burago N.G., Golubev V.I., Nikitin A.D. Mathematical modeling of the dynamics of layered and block media with nonlinear contact conditions on supercomputers // *Journal of Physics: Conference Series* 1392 (2019) 012057.