

Анализ сейсмических волн, генерируемых импульсным электромагнитным источником “Енисей”, с применением высокопроизводительных вычислений

В. М. Садовский и О. В. Садовская

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия
sadov@icm.krasn.ru, o_sadov@icm.krasn.ru

Аннотация Разработана вычислительная технология для моделирования волновых полей, генерируемых импульсным электромагнитным источником сейсмических колебаний “Енисей”, в блочно-слоистых геосредах с различными механическими характеристиками слоев. К описанию волновых процессов применяются математические модели динамики упругих и упругопластических сред, пористых и сыпучих материалов. На основе метода двуциклического расщепления по пространственным переменным построены алгоритмы численной реализации моделей. Вычислительные эксперименты на многопроцессорных системах кластерной архитектуры показали, что предлагаемая технология позволяет с высокой степенью детализации воспроизвести систему волн вблизи областей возбуждения сейсмических колебаний. Результаты расчетов могут быть использованы при отработке оптимальных режимов функционирования источника “Енисей”, когда механические характеристики слоев меняются в широком диапазоне от твердых и мерзлых грунтов с включениями горной породы до сыпучих и глинистых водонасыщенных сред. Численный анализ позволяет также получить усредненные данные, необходимые для адекватного моделирования локализованного импульсного воздействия от источника при использовании упрощенных математических моделей для расчета синтетических сейсмограмм отраженных волн на большом протяжении и глубине залегания разнородных слоев в сложнопостроенных геосредах.

Ключевые слова: Блочно-слоистая геосреда, электромагнитный источник сейсмических колебаний, упругие волны, параллельный вычислительный алгоритм, суперкомпьютерное моделирование

1 Введение

Северные территории Восточной Сибири характеризуются таежной вечномерзлотной структурой поверхностного слоя почвы, что снижает эффективность геологической разведки с использованием сейсмических источников

взрывного и вибрационного типов. Электромагнитный источник сейсмических колебаний «Енисей» представляет собой невзрывной поверхностный импульсный сейсмический источник с силовым электромагнитным приводом, который содержит один, два или четыре синхронно работающих короткоходных электромагнита с автономной системой питания от емкостного накопителя электрической энергии и устройства для заряда и разряда [1,2,3]. Источник существует в колесном, санном, мобильном и водном вариантах (см. рис. 1). Он вполне конкурентоспособен в сравнении с источниками взрывного и вибрационного типа по эффективности и качеству производства разведочных работ и имеет неоспоримые преимущества в экономическом и экологическом аспектах. Использование этого источника обходится несравнимо дешевле, и он является едва ли не единственным возможным средством при проведении работ вблизи зданий и сооружений, в водоохранных зонах и на площадях, где имеется большое количество рек и озер. Применяется также по ледовым покрытиям водоемов, на мелководье и на шельфах. В процессе создания, доработки и совершенствования эксплуатационных и технических характеристик электромагнитный импульсный источник «Енисей» был подвергнут тщательному экспериментальному анализу и тестированию [4,5].



Рисунок 1. «Сейсмоисточники серии «Енисей»: <http://gseis.ru/our-business/field-seismic-works/impulse-technique/>.

В настоящей работе представлена вычислительная технология, конечной целью которой является детальное математическое моделирование волновых полей, возбуждаемых источником «Енисей» в блочно-слоистых геосредах с различными механическими характеристиками блоков (глинистых и мерзлых грунтах, сыпучих, пористых и флюидонасыщенных средах). Результаты моделирования с использованием высокопроизводительных вычислений будут использоваться для оптимизации режимов функционирования источника при проведении сейсмических исследований.

2 Математическая модель

Для численного моделирования процессов распространения волн напряжений и деформаций в реологически сложных средах нами разработаны вычислительные алгоритмы и программные комплексы, ориентированные на

многопроцессорные вычислительные системы кластерной архитектуры. Применяются математические модели упругопластических, сыпучих и пористых сред с учетом разного сопротивления материалов растяжению и сжатию. Используются также уравнения динамики моментного континуума Коссера, описывающие волновые движения структурно-неоднородных сред, в которых наряду с поступательными степенями свободы реализуются независимые вращения материальных частиц.

Предполагается, что структура среды известна и представлена набором из разнородных блоков с криволинейными границами. Каждый блок характеризуется своим однородным материалом с соответствующими определяющими уравнениями. В простейшем случае упругого материала выполняется система уравнений линейной динамической теории упругости, записанная для вектора скорости v и тензора напряжений σ :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \rho(c_1^2 - 2c_2^2)(\nabla \cdot v)I + \rho c_2^2(\nabla v + \nabla v^*). \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность, c_1 и c_2 – скорости продольных и поперечных упругих волн, ∇ – градиент по пространственным координатам, I – единичный тензор. Точка над символом означает производную по времени, используются общепринятые обозначения тензорного анализа.

Начальные скорости и напряжения считаются равными нулю. На части границы задаются внешние напряжения от сосредоточенного импульсного воздействия. На плоскостях симметрии, если такие имеются, формулируются условия симметрии. Часть границы может быть неотражающей поверхностью, на ней моделируются условия прохождения волн без заметного отражения. На внутренних границах раздела ставятся условия непрерывности векторов скоростей и напряжений на площадках контакта блоков.

При численной реализации модели в блоках строятся независимые (несогласованные) расчетные сетки. Применяется алгебраический метод, состоящий в нахождении взаимно-однозначного отображения вычислительной области в виде единичного куба с равномерной сеткой на физическую область.

Исходная система уравнений (1) при построении конечно-разностной схемы записывается в матричной форме:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 A_i \frac{\partial U}{\partial x_i}, \quad (2)$$

где U – вектор-функция, составленная из компонент вектора скорости и тензора напряжений, A_i – матрицы-коэффициенты уравнений. Для решения системы (2) применяется схема интегрирования на основе метода двучиклического расщепления [6]. При этом расщепление производится не в физическом, а в параметрическом пространстве. Система преобразуется к следующему виду:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \tilde{A}_i \frac{\partial U}{\partial \xi_i}, \quad \tilde{A}_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} A_j. \quad (3)$$

Метод расщепления приводит к серии из шести одномерных задач, три из которых решаются на временном интервале $[t_n, t_n + \tau/2]$, а остальные три – на интервале $[t_n + \tau/2, t_n + \tau]$ (τ – шаг сетки по времени):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U^{(1)}}{\partial t} &= \tilde{A}_1 \frac{\partial U^{(1)}}{\partial \xi_1}, \quad U^{(1)}(t_n) = U(t_n), \\
\frac{\partial U^{(2)}}{\partial t} &= \tilde{A}_2 \frac{\partial U^{(2)}}{\partial \xi_2}, \quad U^{(2)}(t_n) = U^{(1)}(t_n + \tau/2), \\
\frac{\partial U^{(3)}}{\partial t} &= \tilde{A}_3 \frac{\partial U^{(3)}}{\partial \xi_3}, \quad U^{(3)}(t_n) = U^{(2)}(t_n + \tau/2), \\
\frac{\partial U^{(4)}}{\partial t} &= \tilde{A}_3 \frac{\partial U^{(4)}}{\partial \xi_3}, \quad U^{(4)}(t_n + \tau/2) = U^{(3)}(t_n + \tau/2), \\
\frac{\partial U^{(5)}}{\partial t} &= \tilde{A}_2 \frac{\partial U^{(5)}}{\partial \xi_2}, \quad U^{(5)}(t_n + \tau/2) = U^{(4)}(t_n + \tau), \\
\frac{\partial U^{(6)}}{\partial t} &= \tilde{A}_1 \frac{\partial U^{(6)}}{\partial \xi_1}, \quad U^{(6)}(t_n + \tau/2) = U^{(5)}(t_n + \tau).
\end{aligned} \tag{4}$$

Вектор–функция $U^{(6)}(t_n + \tau)$ представляет собой искомое решение на временном слое $t_n + \tau$. Для сохранения свойства консервативности схемы на криволинейных сетках, когда матрицы–коэффициенты \tilde{A}_i зависят от координат, аппроксимация одномерных систем уравнений на шаге “корректор” производится с помощью интегро-интерполяционного метода. В результате интегрирования системы (4) по криволинейной ячейке в физической области с последующим применением формулы Грина получается следующее равенство:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} = \frac{1}{\omega} \sum_{k=1}^6 \gamma^k (n_1^k A_1 + n_2^k A_2 + n_3^k A_3) U^k, \tag{5}$$

в котором n_i – направляющие косинусы внешней нормали, ω – объем ячейки, \bar{U} – среднее интегральное значение вектора–решения, а индекс k относится к граням ячейки, в частности γ^k – площадь соответствующей грани. Далее сумма в правой части (5) разбивается на три пары слагаемых по противоположным граням, каждая из которых отвечает аппроксимации производных по пространственным переменным в одномерных системах (4).

Применяемая схема решения одномерных задач является гибридным вариантом сеточно-характеристической схемы второго порядка точности на монотонных решениях. Метод двуциклического расщепления сохраняет второй порядок точности. Кроме того, двойной пересчет одной и той же системы уравнений на третьем и четвертом этапах расщепления гарантирует устойчивость метода при выполнении одномерного условия Куранта–Фридрихса–Леви.

Описанный алгоритм обобщен на случай сыпучей среды [7], пористого материала [8], моментного континуума Коссера и многоблочной среды [7,9]. Разработанный метод решения реализован в виде программного комплекса

на алгоритмическом языке Fortran с использованием библиотеки обмена сообщениями MPI (Message Passing Interface). Технология распараллеливания основана на равномерном распределении расчетной области между узлами кластера. Верификация программного комплекса выполнена на точных решениях – формулах геометрической сейсмологии для географов отраженных и преломленных волн. Комплекс параллельных программ зарегистрирован в Роспатенте [10].

3 Результаты расчетов

Предварительная серия расчетов проводилась с целью валидации программного комплекса по основным параметрам сейсмических волн от источника – частотам и амплитудам колебаний. Сопоставление численных результатов с имеющимися экспериментальными данными показало удовлетворительное количественное соответствие.

Задача решалась для двухслойного массива упругой среды $60 \times 40 \times 40 \text{ м}^3$, в двух вариантах, когда верхний 10-метровый слой является более податливым и, наоборот, более жестким по сравнению с нижним 50-метровым основным слоем. Для демонстрации возможностей программы граница раздела между слоями была искривлена, как это показано на рис. 2, где расчетная область равномерно распределена между 96 процессорами: 16 в верхнем слое и 80 – в нижнем.

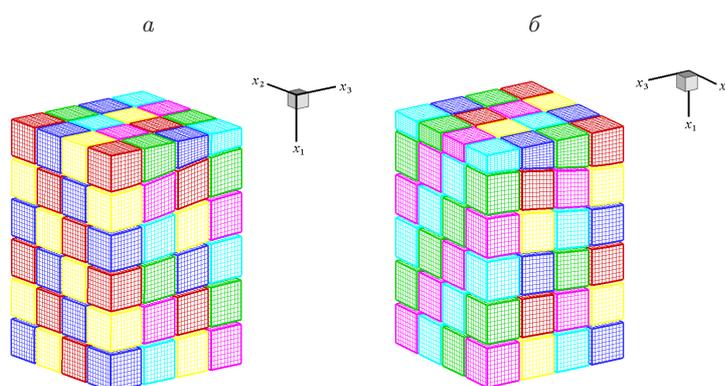


Рисунок 2. Двухслойная расчетная область с криволинейной границей (виды с разных сторон). Равномерное распределение вычислительной нагрузки между 96 узлами кластера.

Каждый процессор кластера производит вычисления в параллельном режиме. Разностная сетка в верхнем слое массива – $50 \times 200 \times 200$ ячеек, а в нижнем слое – $250 \times 200 \times 200$ ячеек, т.е. каждым узлом кластера выполняются расчеты на сетке из $50 \times 50 \times 50$ ячеек. Для наглядности разностная сетка на рис. 2 прорежена в 5 раз в каждом направлении.

На верхней границе расчетной области задавалось локализованное воздействие от колесного источника с четырьмя электромагнитами. С учетом симметрии расчеты проводились для четверти массива, ограниченной вертикальными координатными плоскостями. На левой и правой границах области решения (см. рис. 2б) ставились условия симметрии, тыльные границы и нижнее основание рассматривались как неотражающие поверхности. На этапе решения одномерных систем метода расщепления на этих поверхностях полагались нулевыми граничные значения инвариантов Римана, соответствующих уходящим характеристикам, что эквивалентно отсутствию отраженных волн в одномерных задачах.

На рис. 3 приведен график зависимости от времени давления от источника в зоне локализации, круге площадью 1 м^2 , расположенном на удалении 2.5 м и 1.25 м от левой и правой границ симметрии. Давление в таком виде задавалось на основе экспериментальных измерений ускорения реактивной массы электромагнита. Плотности в слоях и скорости упругих волн приведены в таблице 1.

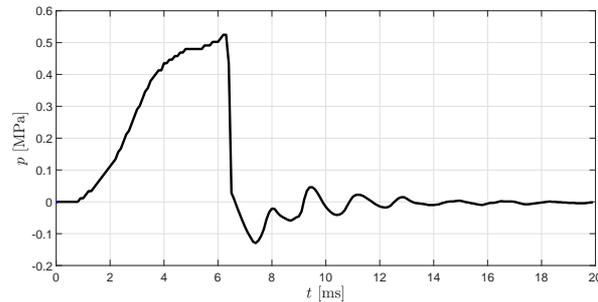


Рисунок 3. Зависимость от времени давления от источника в зоне локализации.

Выполнены расчеты для двухслойного и трехслойного массивов упругой среды. На рис. 4 а изображены характерные поверхности уровня касательного напряжения σ_{23} в случае податливого верхнего слоя (глина), а на рис. 4 б – в случае жесткого верхнего слоя (твердый грунт). Верхний слой – вода на рис. 4 в. Верхний слой – лед, средний слой – вода на рис. 4 г. В качестве нижнего слоя всюду взят грунт с параметрами из таблицы 1. Толщина ледового покрова в расчетах – 3.5 м, что характерно для арктического шельфа.

Таблица 1. Механические параметры материалов.

	ρ [кг/м ³]	c_p [м/с]	c_s [м/с]
лед	900	3000	1800
вода	1000	1450	0
глина	2100	1800	1100
грунт	2400	4500	2700
твердый грунт	2600	6000	3500

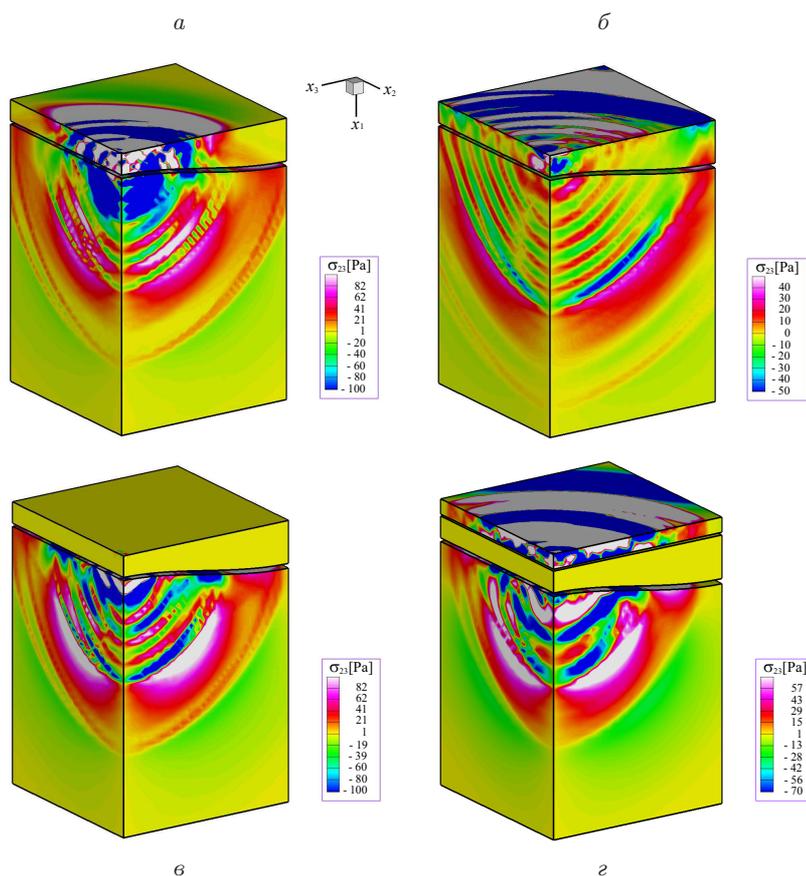


Рисунок 4. Поверхности уровня касательного напряжения σ_{23} ($t = 18$ мс). Нижний слой – грунт; верхний слой – глина (а), твердый грунт (б), вода (в), и верхний слой – лед, средний слой – вода (г).

На рис. 5 приведены амплитудно-частотные зависимости для скорости v_1 частиц среды на глубине 30 м в системе точек под трассой, проходящей в направлении оси x_2 вблизи плоскости симметрии. Красная линия относится к точке, находящейся под источником, зеленая линия – к срединной точке влево, а синяя линия – к угловой левой точке.

Фурье-анализ сейсмограмм ускорений показал, что основная частота, которая слабо зависит от точки регистрации упругих колебаний, находится около 50–100 Гц. Вместе с тем, в принимаемом сигнале содержатся высокочастотные колебания, степень затухания которых по мере прохождения волн за счет диссипации механической энергии может быть исследована с применением более общих уравнений вязкоупругих сред.

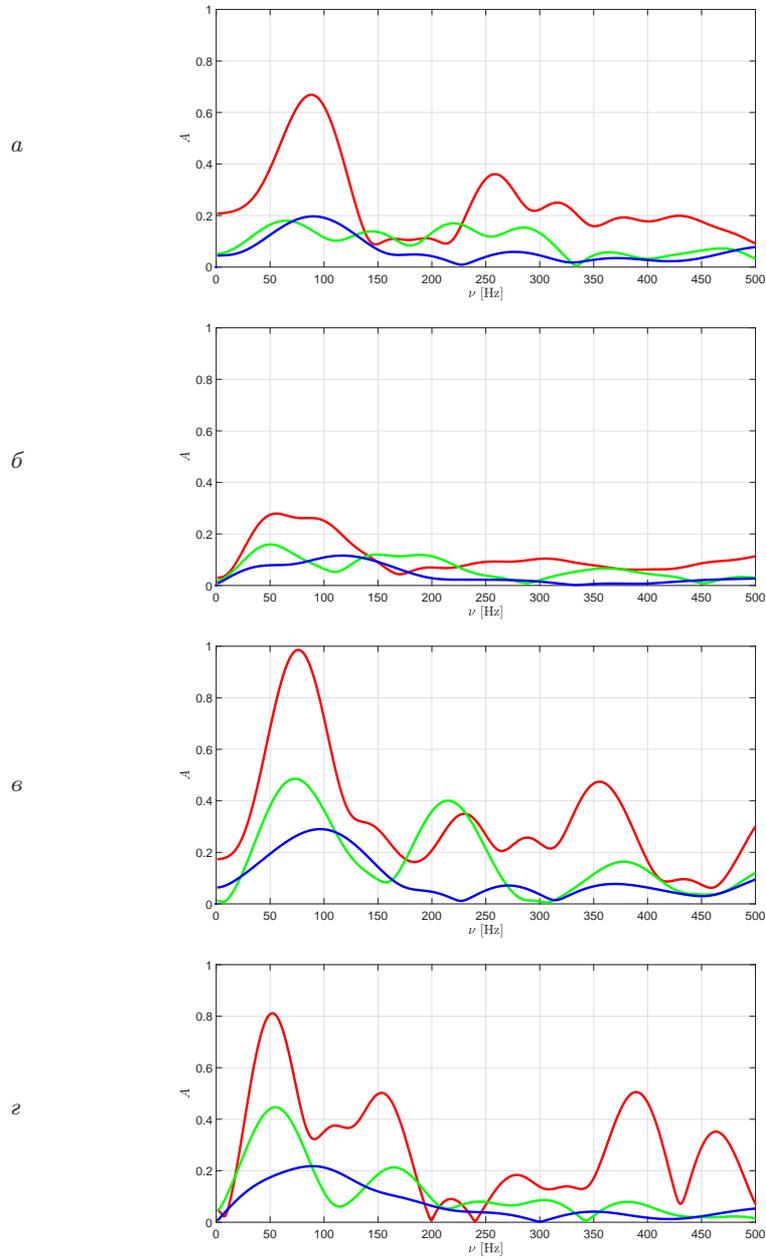


Рисунок 5. Амплитудно-частотные зависимости для скорости v_1 частиц среды на глубине 30 м. Нижний слой – грунт; верхний слой – глина (*a*), твердый грунт (*б*), вода (*в*), и верхний слой – лед, средний слой – вода (*г*).

Список литературы

1. Смирнов В.П.: Электромагнитные источники сейсмических колебаний ряда “Енисей СЭМ, КЭМ”. Приборы и системы разведочной геофизики **3**(1), 21–25 (2003)
2. Детков В.А., Щадин П.Ю., Ивашин В.В.: Импульсные электромагнитные сейсмоисточники “Енисей”: особенности технического решения и применения. Приборы и системы разведочной геофизики **22**(4), 30–33 (2007)
3. Детков В.А.: Возбуждение сейсмических волн импульсными невзрывными источниками. Журнал СФУ: Сер. Математика и физика **2**(3), 298–304 (2009)
4. Смирнов В.П.: Технические средства и содержание проверки источников ряда “Енисей” в цикле накопления одиночных и групповых воздействий. Приборы и системы разведочной геофизики **12**(2), 45–48 (2005)
5. Щадин П.Ю.: Характеристики волнового сейсмического поля, возбуждаемого импульсными источниками “Енисей”. Технологии сейсморазведки **10**(4), 74–80 (2013)
6. Садовская О.В., Садовский В.М.: Параллельная реализация алгоритма для расчета упругопластических волн в сыпучей среде. Вычислительные методы и программирование **6**(2), 86–93 (2005)
7. Sadovskaya O., Sadovskii V.: Mathematical Modeling in Mechanics of Granular Materials. Vol. 21 of Advanced Structured Materials. Springer, Heidelberg – New York – Dordrecht – London (2012)
8. Садовский В.М., Садовская О.В.: Анализ деформации пористой среды с учетом схлопывания пор. Прикладная механика и техническая физика **57**(5), 53–65 (2016)
9. Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V.: Modeling of elastic waves in a blocky medium based on equations of the Cosserat continuum. Wave Motion **52**, 138–150 (2015)
10. Садовский В.М., Садовская О.В.: Программный комплекс для решения трехмерных упругопластических задач динамики сыпучих сред (3Dyn_Granular). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012613990 от 28.04.2012 (Роспатент). RU ОБПБТ **3**(80), 209 (2012)