

6. Пат. 2477513 РФ. МПК G06F7/72. Ячейка однородной вычислительной среды, однородная вычислительная среда и устройство для конвейерных арифметических вычислений по заданному модулю / И. П. Осинин, В. С. Князьков опубли. 10.03.2013, Бюл. № 7.

7. Осинин И. П., Князьков В. С. Организация параллельно-конвейерной СБИС-структуры с реконфигурируемой микроядерной архитектурой // Известия высших учебных заведений. Серия: Технические науки. 2013, № 3. С. 74–83.

8. Пат. 2491612 РФ. Способ организации вычислений суммы  $n$   $m$ -разрядных чисел / И. П. Осинин, В. С. Князьков опубли. 27.08.2013, Бюл. № 24.

9. Осинин И. П., Князьков В. С. Концепция разрядно-параллельного арифметико-логического устройства на базе СБИС-структур // XIV Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. докл. Саров, 1–5 октября 2012. С. 449–458.

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НЕОДНОРОДНЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕД НА СУПЕР-ЭВМ

*И. Б. Петров<sup>1,2</sup>, В. И. Голубев<sup>1,2</sup>, Н. И. Хохлов<sup>1,2</sup>, А. В. Фаворская<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Федеральный научный центр НИИ системных исследований РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Москва

### 1. Введение

В настоящее время сейсморазведка является наиболее распространенным методом поиска и разведки месторождений полезных ископаемых нефти и газа. Несмотря на то, что основной ее задачей является определение структуры подповерхностного пространства, важной составляющей решения данной обратной задачи является детальное описание процесса распространения сейсмических волн от сейсмического источника вглубь геологической среды и формирования сейсмических откликов от различных неоднородностей. Решение прямых задач сейсморазведки может быть использовано, например, для уточнения запасов углеводородов в районах с большим числом эксплуатируемых скважин, построения синтетических сейсмограмм для нужд региональной сейсморазведки, уточнения наличия углеводородов и их характеристик в известной геологической структуре.

В настоящей работе на основе прямых численных расчетов продемонстрировано преимущество явного выделения контактных границ по сравнению с методом сквозного счета для задач наземной сейсмической разведки. На примере Арктической задачи проведено сопоставление результатов моделирования, полученных решением полных акустических и упругих задач.

### 2. Математическая модель и используемый численный метод

Для математического моделирования волновых процессов в деформируемом твердом теле использовалась система динамических уравнений, объединяющая уравнения движения и реологические соотношения в виде:

$$\begin{aligned}\rho \dot{v}_i &= \nabla_j \sigma_{ij}, \\ \dot{\sigma}_{ij} &= q_{ijkl} \varepsilon_{kl} + F_{ij}.\end{aligned}$$

Здесь  $\rho$  – плотность среды,  $\dot{v}_i$  – компоненты скорости смещения,  $\dot{\sigma}_{ij}$ ,  $\varepsilon_{kl}$  – компоненты тензоров напряжения и деформаций,  $\nabla_j$  – ковариантная производная по  $j$ -й координате,  $F_{ij}$  – добавочная правая часть.

Вид компонент тензора 4-го порядка  $q_{ijkl}$  определяется реологией среды. Для линейно-упругого тела

$$q_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}).$$

Вторая группа уравнений представляет собой продифференцированный по времени закон Гука:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda (\dot{\epsilon}_{11} + \dot{\epsilon}_{22} + \dot{\epsilon}_{33}) \delta_{ij} + 2\mu \dot{\epsilon}_{ij}$$

В этом соотношении  $\lambda$  и  $\mu$  – упругие постоянные Ляме,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Для численного решения динамических уравнений механики деформированного твердого тела использовался сеточно-характеристический метод, подробнее с которым можно ознакомиться в [1, 2].

### 3. Сравнение двух подходов для моделирования наземной сейсморазведки

В работе проведено сравнение двух подходов для моделирования распространения сейсмических волн в геологическом массиве с криволинейными границами: сквозной счет и их явное выделение. Модель состояла из восьми трехмерных слоев. Упругие параметры всех геологических слоев представлены в табл. 1 (номер слоя возрастает с глубиной его залегания). Размеры модели составляли 3000 м × 3000 м × 2100 м.

Таблица 1

*Упругие характеристики геологических слоев*

Номер слоя	$V_p$ , м/с	$V_s$ , м/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
1	2170	674	2000
2	2130	795	2300
3	2500	1090	2200
4	2680	1220	2300
5	3000	1385	2400
6	5550	3144	2700
7	6000	1250	2800
8	6000	1550	2850

В качестве источника возбуждения использовалась точечная вертикальная нагрузка дневной поверхности в ее центре со временной зависимостью в виде импульса Риккера с частотой 30 Гц. Время физического эксперимента составляло 2 с и было достаточным для того, чтобы зарегистрировать на поверхности несколько первых откликов от контактных границ. Использовалась система измерений, состоящая из двух наборов трехкомпонентных сейсмоприемников, расположенных вдоль осей  $OX$  и  $OY$ , соответственно, с расстоянием 10 м между ближайшими. Центр системы наблюдения совпадал с местом установки источника.

В работе использовались два различных подхода к моделированию динамических процессов в слоистых геологических средах: описание всей области одной кубической расчетной сеткой (сквозной счет), в которой материал среды является функцией пространственных координат, и явное выделение границ неоднородностей [3] с генерацией восьми криволинейных расчетных сеток с различными упругими параметрами и использованием дополнительных контактных условий. Отметим, что в первом случае криволинейные границы получаются «шероховатыми» с погрешностью в один шаг сетки, и отсутствует возможность расчета корректной нормали к ним в каждой точке. Использовалась монотонизированная сеточно-характеристическая схема третьего порядка точности по пространству. Каждый расчет содержал порядка 100–150 миллионов узлов, и шаг сетки составлял 5 м. Пример гексаэдральной расчетной сетки представлен на рис. 1 (слева), а распределение модуля скорости по расчетной области на рис. 1 (справа).

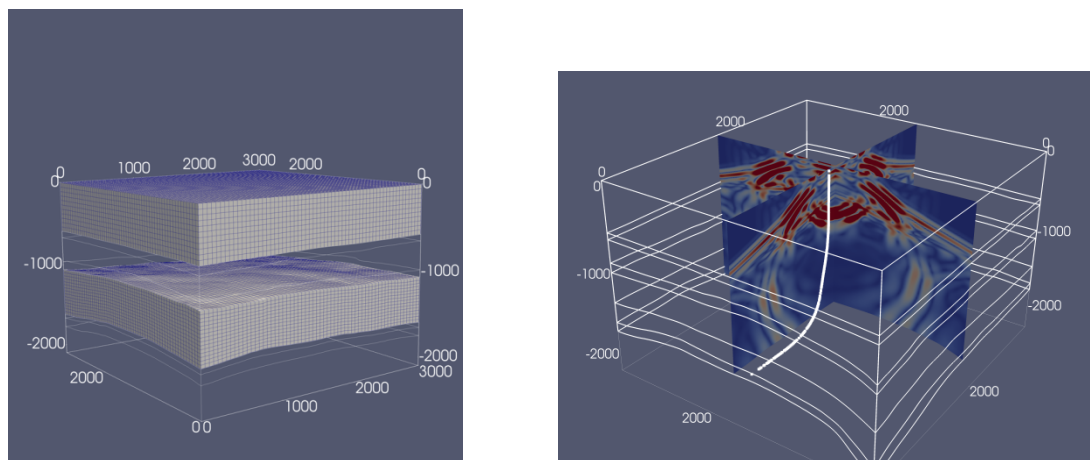


Рис. 1. Гексаэдральные сетки, покрывающие отдельные геологические слои (слева), и волновая картина (явное выделение границ) в фиксированный момент времени (справа)

В ходе работы были проанализированы результаты расчетов указанными методами. Хотя на качественном уровне как трехмерные волновые картины, так и трехкомпонентные синтетические сейсмограммы совпадают, наблюдается существенное отличие в интенсивности откликов по амплитуде. Время расчета методом сквозного счета примерно в 9 раз меньше времени расчета с явным выделением границ, хотя и остается приемлемым для современных высокопроизводительных вычислительных систем. Потребление оперативной памяти алгоритмом увеличилось более чем в два раза, но тоже осталось на приемлемом уровне. В то время как времена прихода сейсмических откликов совпадают с хорошей степенью точности, разница в регистрируемой амплитуде сигнала ( $\Delta_i$  – отличие в процентах для  $i$ -го отклика) может достигать 30 % (см. табл. 2).

Таблица 2

*Сопоставление результатов расчетов и затраченных вычислительных ресурсов*

	Сквозной счет	Выделение границ
Время расчета, с	815	7415
Объем памяти, Гб	21,7	47,5
$\Delta_1$		22 %
$\Delta_2$		26 %
$\Delta_3$		30 %

Ввиду того, что современные методы миграции и инверсии (решения обратной задачи сейсмической разведки) оперируют с полным сейсмическим сигналом, а не только со временами прихода сейсмических откликов, использование метода, описанного в работе [3], на этапе расчета прямой задачи может повысить точность построения геологических моделей в целом.

#### 4. Сравнение акустического и полного упругого приближения на задаче Арктической сейсморазведки

Рассматривалась многослойная геологическая среда, схема расположения слоев приведена на рис. 2. Ширина области интегрирования – 12 000 м, глубина десятого слоя – 2 601 м. По бокам области интегрирования ставились неотражающие граничные условия, на дневной поверхности ставилось условие заданного давления, равного нулю. Источник располагался на глубине 6 м и задавался импульсом Рикера с частотой 40 Гц.



Рис. 2. Расположение десяти слоев в рассматриваемой задаче

Приемники также были заглублены на 6 м и удалены от источника на расстояние 4 500 м в каждую сторону и располагались через каждые 24 м. Шаг по времени брался равным 0,00037 с, проводился 5 001 шаг по времени, сетка в 9 слое состояла из квадратов со стороной 3 м, сетка в остальных слоях состояла из прямоугольников 3 м на 2 м.

При этом численное моделирование было проведено в двух постановках. В первой постановке первый слой представляет собою воду, параметры всех слоев приведены в табл. 3, в первом слое решалась система, описывающая акустическое поле, в остальных – система, описывающая состояние линейно-упругой среды, на границе между первым и вторым слоем ставилось соответствующее контактное условие, а на границе между остальными слоями – условие полного сцепления. Во второй постановке во всех слоях решалась система, описывающая акустическое поле, за скорость  $c$  бралась скорость продольных волн в соответствующем слое, на границе между всеми слоями ставилось контактное условие. В обеих постановках седьмой слой соответствовал углеводородному резервуару.

Таблица 3

*Сейсмические характеристики десяти слоев*

Номер слоя	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с	Глубина слоя, м
1	1000	1500	–	60
2	2300	3200	1960	70
3	2300	3700	2260	150
4	2400	4000	2450	340
5	2500	4300	2630	360
6	2600	4500	2750	270
7	2300	3200	1700	60
8	2600	4600	2820	80
9	2700	4800	2940	70
10	2800	5400	3300	2601

На рис. 3 и 4 приведены волновые картины в моменты времени 0,4514 с и 0,6438 с соответственно. Градацией серого показан модуль скорости, на левой половине рисунков показывается регион из левой части области интегрирования для второй постановки, на правой половине – из правой части для первой постановки, регионы имеют различный размер для различных рисунков.

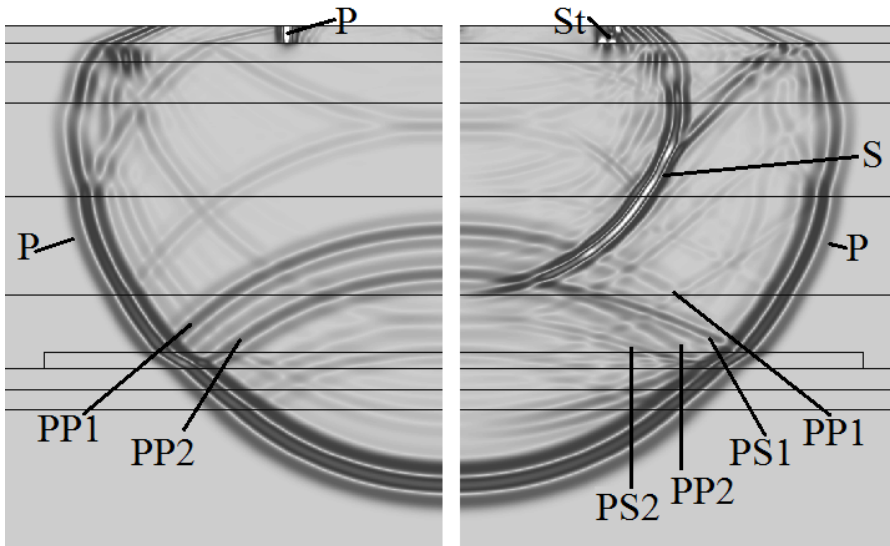


Рис. 3. Волновые картины в момент времени 0,4514 с. Отражение продольной волны от резервуара. Слева – акустика, справа – упругость

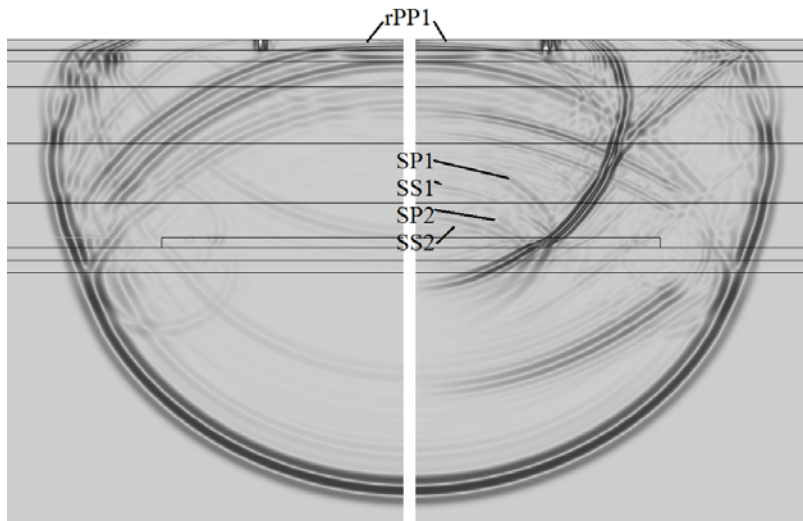


Рис. 4. Волновые картины в момент времени 0,6438 с. Отражение поперечной волны от резервуара. Слева – акустика, справа – упругость

На рис. 3 буквой P отмечены продольные волны от источника, St – волны Стоунли в воде, S – поперечные волны, возникающие при распространении продольных волн P в геологических породах. На рис. 3 буквами PP1 отмечены отраженные от верхней границы резервуара PP-волны, PP2 – отраженные от нижней границы резервуара PP-волны, PS1 – отраженная от верхней границы резервуара обменная PS-волна, PS2 – отраженная от нижней границы резервуара обменная PS волна. На рис. 4 буквами SP1 отмечена отраженная от верхней границы резервуара обменная SP-волна, SP2 – отраженная от нижней границы резервуара обменная SP-волна, SS1, SS2 – отраженные от верхней и нижней границ резервуара SS-волны, rPP1 – отклики от PP1 волн в толще воды.

Анализ результатов показывает, что при моделировании геологических сред путем решения системы, описывающей акустическое поле, отсутствуют волны Стоунли (St), поперечные волны в геологических породах от источника (S), отраженные от верхней и нижней границы резервуара обменные PS-волны (PS1, PS2), отраженные от верхней и нижней границы резервуара SS-волны (SS1, SS2), отраженные от верхней и нижней границы резервуара обменные SP-волны (SP1, SP2)

## Литература

1. Магомедов К. М., Холодов А. С. Сеточно-характеристические численные методы. М.: Наука, 1988.
2. Петров И. Б., Холодов А. С. Численное исследование некоторых динамических задач механики деформируемого твердого тела сеточно-характеристическим методом // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1984. Т. 24, № 5. С. 722–739.
3. Голубев В. И., Петров И. Б., Хохлов Н. И. Моделирование волновых процессов внутри планеты с помощью гибридного сеточно-характеристического метода // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 2. С. 139–148.

## СИСТЕМА МОНИТОРИНГА АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ КОМПОНЕНТ MONDIAG

*И. А. Пищулин, Д. И. Липов, А. М. Бармин, А. Н. Петрик, П. С. Лобанов, Ю. А. Юлин, Е. К. Баканов, Р. В. Модянов, В. Ю. Симаков, А. И. Чайка*

Российский Федеральный Ядерный Центр –  
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

## Введение

Система мониторинга на сегодня является составной частью системного программного обеспечения современного многопроцессорного вычислительного комплекса (МВК), поскольку в его состав входят тысячи вычислительных единиц, на которых необходимо выполнять контроль большого количества различных параметров. В докладе рассказывается о распределенной системе мониторинга аппаратно-программных компонент MonDiag.

## Решения, лежащие в основе системы

При разработке системы мониторинга для многопроцессорного вычислительного комплекса на начальном этапе мы столкнулись с типичными задачами:

- распределенность, т. е. реализовать сетевое взаимодействие компонент;
- масштабируемость (т. к. современные МВК включают тысячи узлов);
- расширяемость, т. е. возможность добавлять/изменять функциональность системы без изменения основного кода;
- легковесность, т. е. система не должна требовать дополнительного оборудования для своей работы и по минимуму использовать ресурсы операционной системы на мониторируемых узлах.