

Федеральное агентство научных организаций

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

Институт вычислительного моделирования СО РАН – обособленное
подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

УДК 519.688

№ (ЦИТИС) АААА-А18-118011890028-3

ИНВ № 0728/2017

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ КНЦ СО РАН

_____ Волков Н.В.
_____ 2017 г.

ОТЧЕТ

О ВЫПОЛНЕННОМ В РАМКАХ

КОМПЛЕКСНОЙ ПРОГРАММЫ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

№ П.2П «ИНТЕГРАЦИЯ И РАЗВИТИЕ» ПРОЕКТЕ

«РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ

АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО

НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ В ПРИЛОЖЕНИИ К ЗАДАЧАМ

ГЕОМЕХАНИКИ И ГЕОДИНАМИКИ»

(заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ 0356-2016-0728

Приоритетное направление (номер и наименование) Информационно-телекоммуникационные системы

Программа ФНИ (номер и наименование) 36. Системы автоматизации, CALS-технологии, математические модели и методы исследования сложных управляющих систем и процессов

Протокол Ученого совета _____

№ _____ от «__» _____ 201__ г.

Руководитель проекта

_____ В.М. Садовский

д.ф.-м.н., профессор

"__" _____ 2017 г.

Красноярск, 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта
д.ф.-м.н., профессор

(подпись, дата)

В.М. Садовский

Исполнители:
с.н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

И.В. Киреев

с.н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

А.Д. Матвеев

с.н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

О.В. Садовская

н.с., к.ф.-м.н.

(подпись, дата)

М.П. Варьгина

м.н.с.

(подпись, дата)

Е.П. Ченцов

инженер

(подпись, дата)

И.В. Смолехо

инженер

(подпись, дата)

И.Е. Петраков

Нормоконтролер

(подпись, дата)

А.В. Вяткин

РЕФЕРАТ

Отчет 15 с., 6 рис., 3 прил.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, БЛОЧНАЯ СРЕДА, ДОМИНО–СТРУКТУРА, ТРЕЩИНА СДВИГА, ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ, ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

Проект направлен на алгоритмическую и программную реализацию новых математических моделей для анализа распространения сдвиговых разрывов в Земной коре на глубинах сейсмической активности. В этих моделях изучается дислокационный механизм распространения трещин сдвига в условиях сильного бокового сжатия с аномально низким трением. Механизм включает в себя этапы формирования и последующего движения со сверхсейсмической скоростью веерной домино-структуры в вершине трещины из фрагментов отслоившейся горной породы. Результаты исследований по теме проекта имеют фундаментальный характер и могут изменить современные представления о природе мощных сейсмических событий типа горных ударов и землетрясений.

При выполнении проекта разработаны вычислительные алгоритмы и компьютерные программы, имитирующие процесс распространения сдвиговых разрывов в тектонических разломах. На этой основе численно исследованы веерные волны, вызванные смещением блоков горной породы. Алгоритмы реализованы на суперкомпьютерах кластерной архитектуры с использованием библиотеки обмена сообщениями MPI.

Получены следующие новые результаты. Сформулированы граничные условия контактного взаимодействия блоков горной породы через прослойки, содержащие домино-структуры. Разработаны вычислительные алгоритмы и программы для расчета напряженно-деформированного состояния вокруг неподвижного и движущегося вееров, включая алгоритмы расчета скорости веерной волны в зависимости от действующего касательного напряжения в блоках.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Веерный механизм распространения сдвиговых трещин в прочных горных породах под высоким боковым давлением.....	6
2 Неявная разностная схема для численного моделирования динамики веера между упругими блоками	7
3 Параллельный вычислительный алгоритм. Программная реализация алгоритма для многопроцессорных ЭВМ кластерной архитектуры.....	9
4 Математическое моделирование веерных волн под действием статического поля касательных напряжений	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	13
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	14
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	15

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача проекта состоит в разработке новых математических моделей, вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, ориентированных на современные системы высокопроизводительных вычислений, для решения задач динамики структурно неоднородных блочных сред. Проект направлен на выработку эффективных методов решения с помощью технологии MPI. Целью проекта является создание алгоритмов и программ для научных и опытно-конструкторских работ при исследовании геодинамических процессов. Работы по проекту проводились совместно с Центром шельфовых инженерных систем университета Западной Австралии: Center for Offshore Foundation Systems of the University of Western Australia (COFS UWA).

1 Веерный механизм распространения сдвиговых трещин в прочных горных породах под высоким боковым давлением

Согласно современным представлениям, при сжатии горных пород под высоким боковым давлением макроскопические трещины сдвига продвигаются за счет формирования системы наклонных микротрещин отрыва, образуя фундаментальную структуру, включающую эшелон тонких пластин, так называемую “домино–структуру”. Экспериментально установлено, что при вращении домино–пластины разрушаются, создавая трение в голове трещины. Считается, что данный механизм реализуется также в прочных горных породах, запредельные свойства которых до сих пор не изучены из-за высокой динамики разрушения. Недавние исследования профессора Б.Г. Тарасова из университета Западной Австралии выявили принципиально иной механизм, в котором домино–пластины сохраняют целостность при вращении и образуют веер, движущийся как волна с высокой скоростью благодаря кардинальному снижению трения в голове бегущей трещины.

В прошлом году в рамках данного проекта была решена задача о равновесном веере, который формируется за счет внешних деформационных факторов между двумя напряженными блоками горной породы. Были также рассмотрены дислокационные механизмы образования веера. На рис. 1 приведена общая схема равновесного веера между упругими блоками, на рис. 2 – поверхности уровня напряжений и поле перемещений вокруг веера, полученные численно с помощью метода суперпозиции дислокаций.

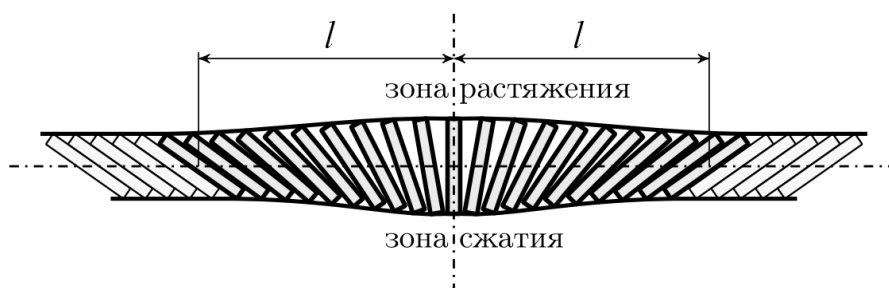


Рисунок 1 – Конфигурация равновесного веера в вершине глубинной трещины сдвига

Полученные поля напряжений служат для постановки начальных данных в задаче динамики веера, решение которой является основной целью этапа проекта отчетного года. Ранее планировалось при численной реализации уравнений теории упругости в блоках применить явную разностную схему С.К. Годунова с предельной реконструкцией решения (ENO–схему). Такая схема обладает хорошей работоспособностью при анализе разрывных решений с ударными волнами, вызванными импульсными и сосредоточенными

воздействиями. При исследовании непрерывных динамических процессов из-за ограничения на шаг по времени в виде условия устойчивости Куранта–Фридрихса–Леви метод, основанный на схеме С.К. Годунова, требует большого процессорного времени. В задачах с гладкими решениями более предпочтительным оказывается применение неявных безусловно устойчивых схем.

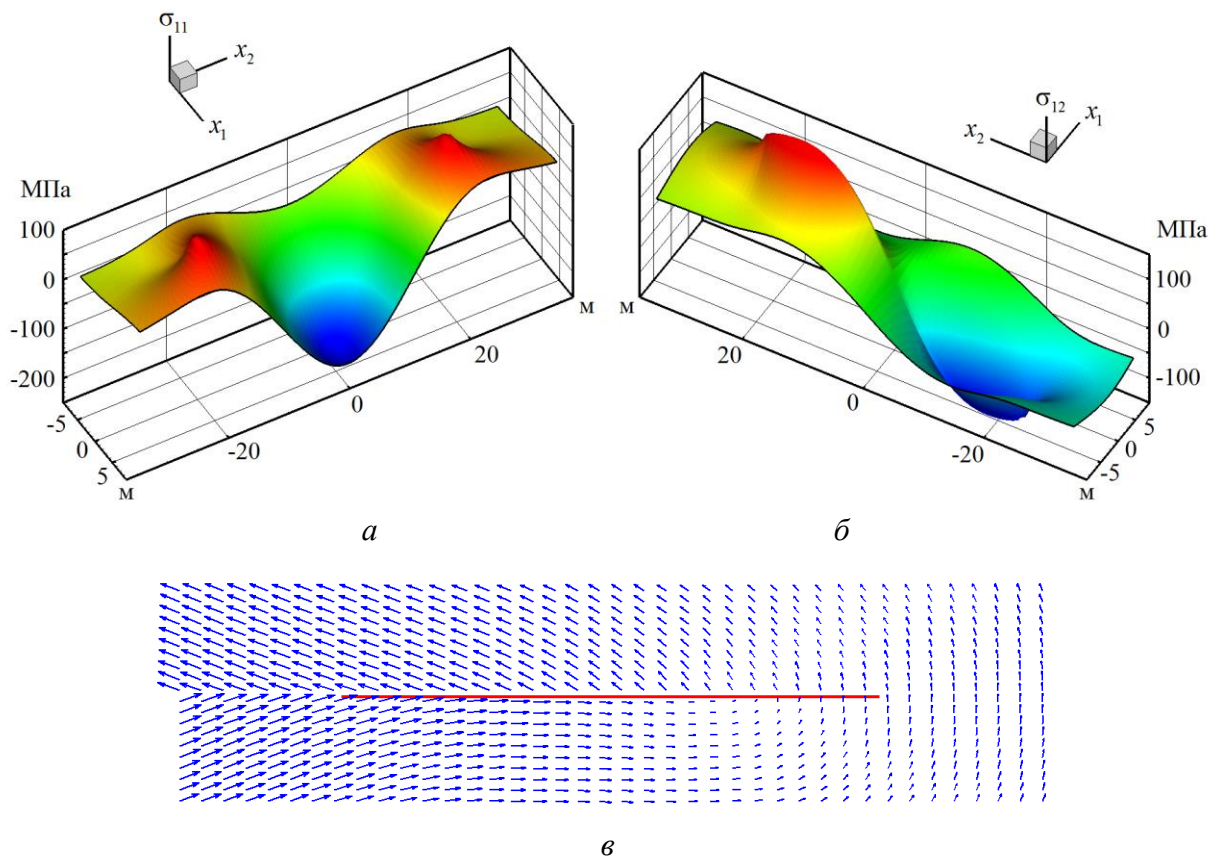


Рисунок 2 – Поверхности уровня нормального и касательного напряжений (а, б); поле перемещений (в) вокруг равновесного веера

Учитывая, что распределение напряжений в блоках не имеет вышеупомянутых особенностей решения, и что внешнее воздействие, которое приводит к страгиванию веера и дальнейшему движению с нарастающей скоростью, является квазистатическим, выбор был сделан в пользу неявных разностных схем.

2 Неявная разностная схема для численного моделирования динамики веера между упругими блоками

Для решения в рамках построенной модели краевой задачи с заданными начальными данными и граничными условиями был разработан вычислительный алгоритм, основанный на методе двуциклического расщепления по пространственным направлениям. Двуциклическое расщепление включает в себя три последовательно

выполняемых этапа, каждый из которых предполагает решение одномерной системы уравнений в блоках с внутренними граничными условиями на межблочных прослойках. В отличие от обычного расщепления такой метод сохраняет второй порядок точности, если при решении одномерных систем используются схемы второго порядка.

При расщеплении уравнения динамики блоков в совокупности с уравнениями в прослойке – веере записываются в символической форме:

$$U_t = A_1(U) + A_2(U),$$

где A_1 и A_2 – дифференциальные операторы, моделирующие одномерные движения блочной среды в направлении координатных осей x_1 и x_2 , U – вектор–функция, составленная из компонент вектора скорости и тензора напряжений в блоках. В U также входит угол поворота домино–пластин веерной системы и угловая скорость пластин в модели веера, учитывающей моменты инерции пластин.

В этих обозначениях метод расщепления на интервале по времени $(t, t + \Delta t)$ включает в себя следующие этапы, каждый из которых реализуется на минимально возможном подинтервале:

$$\begin{aligned} U_t' &= A_1(U'), & U'(t) &= U(t), \\ U_t'' &= A_2(U''), & U''(t) &= U'(t + \Delta t/2), \\ U_t''' &= A_1(U'''), & U'''(t + \Delta t/2) &= U''(t + \Delta t). \end{aligned}$$

Решение в момент времени $t + \Delta t$ определяется как $U(t + \Delta t) = U'''(t + \Delta t)$.

Численное решение уравнений одномерного движения основывается на дискретизации уравнений по методу Г.В. Иванова. В итоге получается разностная схема типа “предиктор–корректор”.

На шаге предиктор вычисляются скорости и напряжения, относящиеся к границам прослойки на промежуточном временном слое, через значения скоростей и напряжений предыдущего слоя. На шаге корректор определяются значения, отнесенные к новому слою. На примере гиперболической по Фридрихсу системы уравнений

$$A U_t = B U_x$$

с симметричными матрицами–коэффициентами разностная схема Г.В. Иванова сводится к решению систем уравнений

$$\begin{aligned} A(\bar{U} - U) / \Delta t &= B(U^+ - U^-) / h, \\ U^+ + U^- &= \bar{U} + U + D(\bar{U} - U), \end{aligned}$$

где h – шаг сетки по пространственной переменной, D – матрица, с помощью которой задается искусственная диссипация энергии в схеме, используемая при необходимости для подавления паразитных осцилляций на слабых разрывах решения. В случае $D = 0$ схема является бездиссипативной.

Численная реализация уравнений динамики упругой среды в блоках на основе схемы расщепления с решением одномерных систем по методу Г.В. Иванова осуществляется на основе экономичного метода трехточечной прогонки. Для решения уравнений вращательного движения домино–пластин веера разработаны оригинальные вычислительные алгоритмы, которые применяются в качестве корректирующих процедур при расчете граничных значений скоростей и напряжений в зоне веера для одномерных систем на этапах метода расщепления.

3 Параллельный вычислительный алгоритм. Программная реализация алгоритма для многопроцессорных ЭВМ кластерной архитектуры

Вычислительный алгоритм реализован в виде комплекса параллельных программ на языке Fortran с использованием библиотеки MPI по технологии SPMD (Single Program – Multiple Data) и зарегистрирован в Роспатенте [Садовский В.М., Садовская О.В., Ченцов Е.П. Программный комплекс для численного моделирования динамических процессов в многоблочных средах на кластерных системах (2Dyn_Blocks_MPI). Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016615178 от 17.05.2016 // Программы, зарегистрированные в реестре программ для ЭВМ Российской Федерации. RU ОБПБТ № 6(116) от 20.06.2016. М: ФИПС, 2016]. Распараллеливание выполнено на основе 1D разбиения области решения задачи, при котором каждый процессор рассчитывает цепочку блоков в направлении оси x_1 и обменивается данными с соседними процессорами по горизонтальным границам блоков, перпендикулярным направлению движения веера. Программный комплекс позволяет решать гораздо более широкий класс задач, проводить расчеты волновых и колебательных движений многоблочной среды, вызванных внешними механическими воздействиями.

Для демонстрации работоспособности комплекса и верификации программ были выполнены расчеты колебательных процессов в однородном и блочном массивах прочной горной породы. Расчеты проводились с шагом по времени $\Delta t = 2.5 \Delta t^*$, где Δt^* – предельное значение шага по условию устойчивости Куранта–Фридрихса–Леви для явных разностных схем, и сравнивались с расчетами по явной схеме С.К. Годунова. Неадекватное искажение результатов из-за погрешности аппроксимации для рассматриваемых задач начиналось с шага $\Delta t = 10 \Delta t^*$.

На рис. 3 изображены линии уровня касательного напряжения для задачи о прохождении высокочастотных акустических волн, генерируемых на части верхней границы, через однородный прямоугольный массив 5 м • 2.5 м, не имеющий блочной структуры. Иллюстрации относятся к моменту времени, который соответствует 12-

кратному отражению падающей упругой волны от нижней границы массива, как от жесткой стенки. Боковые границы также считаются жесткими стенками, на них задаются нулевые перемещения.

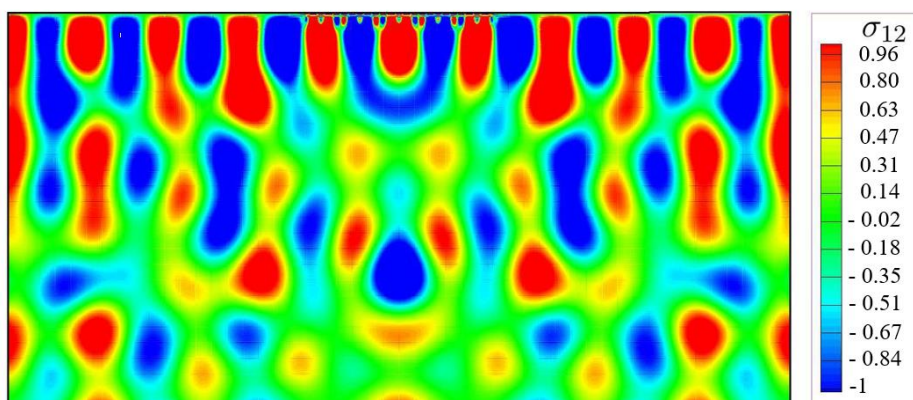


Рисунок 3 – Изолинии касательного напряжения при коротковолновом возмущении однородной среды

Расчеты проводились на разных сетках и на разном количестве процессоров. В данном случае конечно-разностная сетка состояла из $1000 \cdot 500$ ячеек, использовалось 25 процессоров кластера.

Для сравнения на рис. 4 приведены аналогичные результаты для блочного массива с размером блоков $0.1 \text{ м} \cdot 0.1 \text{ м}$ (50 и 25 блоков по горизонтали и по вертикали, соответственно) с прослойками толщиной 5 мм из микроразрушенной горной породы низкой плотности. Использовалась конечно-разностная сетка $20 \cdot 20$ ячеек в каждом из 1250 блоков расчетной области.

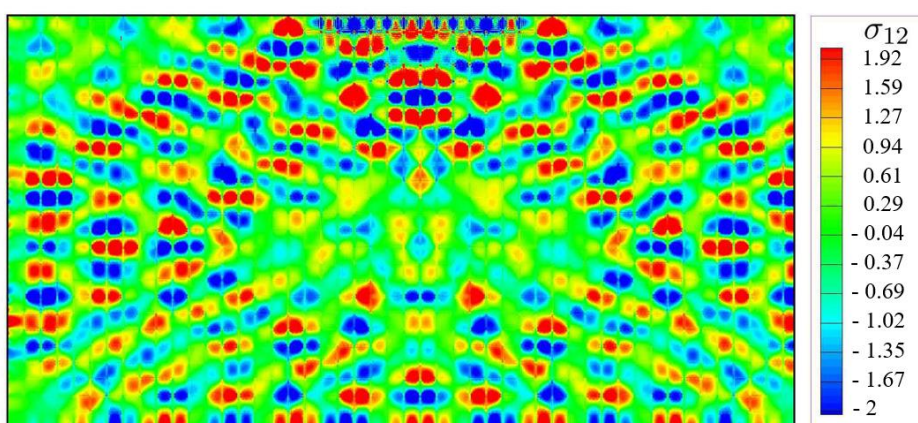


Рисунок 4 – Изолинии касательного напряжения при коротковолновом возмущении блочной среды

Внешнее возмущение во всех вариантах расчетов задавалось в форме периодического воздействия нормальным напряжением на части верхней границы

массива. Вдоль границ блоков напряжение распределялось по закону, имитирующему возбуждение блоков с заданной частотой при равном нулю главном векторе действующих сил. Поэтому воздействие на каждый блок в пределах области приложения напряжения эквивалентно периодическому по времени действию момента сил при равной нулю результирующей силе. В представленных расчетах область приложения нагрузки составляла 12 блоков по центру верхней границы.

По замыслу такое воздействие инициирует вращательное движение блоков, которое на определенной частоте может приводить к резонансному возбуждению среды. Определение резонансной частоты, а также анализ ее зависимости от размеров блоков, толщины прослоек и от параметров упругости материала в блоках и прослойках требует массовых расчетов и выходит за рамки данного проекта.

Расчеты проводились на кластерах МВС–1000 Института вычислительного моделирования СО РАН (г. Красноярск) и МВС–100k Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (г. Москва).

4 Математическое моделирование веерных волн под действием статического поля касательных напряжений

На рис. 5 изображены линии уровня касательного напряжения вокруг веера в начальный момент времени перед нагружением путем приложения дополнительных напряжений, вызванных квазистатическим сдвигом блоков. Прямоугольниками на рисунке выделены расчетные области 24-х процессоров, используемых для решения задачи. Из рисунка следует, что веер высотой 0.1 м существенно меняет напряженное состояние окружающей его горной породы вглубь и по направлению к дневной поверхности на характерном расстоянии 5 – 10 м. Поэтому при численном моделировании динамики веерной системы необходимо в качестве расчетной области брать протяженную полосу шириной 10 – 20 м. Длина такой полосы должна быть не менее 100 м, чтобы в результате расчета можно было достоверно определить скорость веера.

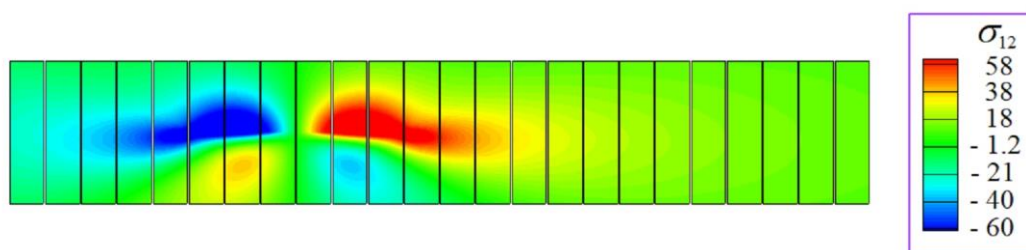


Рисунок 5 – Изолинии касательного напряжения в задаче динамики веера между блоками горной породы

Рассматриваемая задача является вычислительно сложной, требует большого количества процессоров и значительного времени счета, так как размер ячеек разностной сетки в блоках должен быть на порядок меньше высоты веера. Таким образом, минимальная вычислительная область составляет $1000 \cdot 10000 = 10^7$ ячеек. Такую задачу планируется решить в течение будущего года. В отчетном году была рассмотрена задача существенно меньшей размерности, в которой моделируется динамика не всего веера в целом, а только центральной его части вблизи максимальной точки подъема. На рис. 6 представлены поля линий уровня касательного напряжения в начальный момент времени (вверху) и в момент страгивания веера (внизу) в результате квазистатического сдвига окружающих его блоков горной породы. Расчеты выполнены на 44-х процессорах кластера.

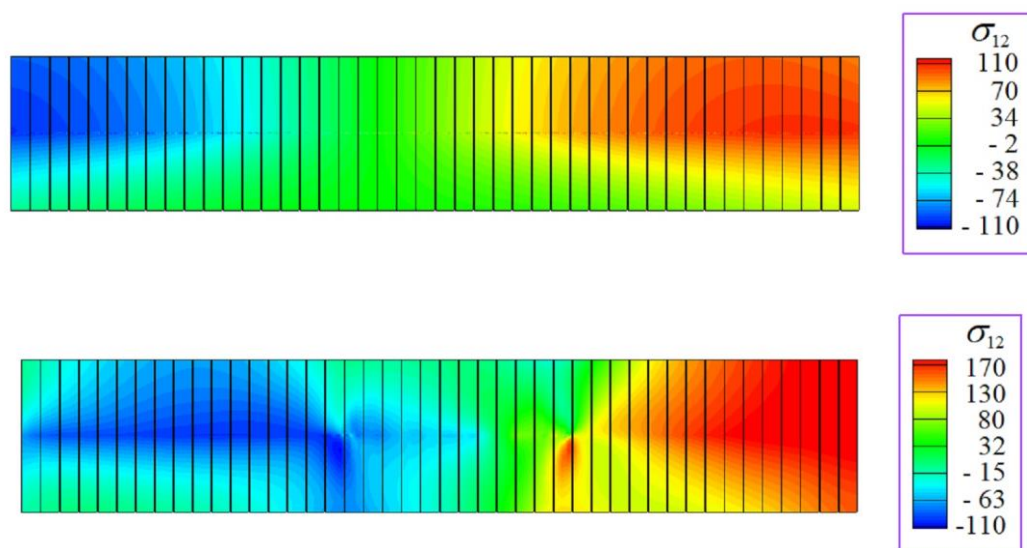


Рисунок 6 – Перераспределение изолиний касательного напряжения вокруг движущегося веера

Расчеты показали, что вызванное сдвигом движение веера возникает в первую очередь из-за перераспределения отрицательных напряжений в хвостовой части веера, которой на приведенных рисунках соответствует синяя окраска. Повышение уровня положительных напряжений в головной части является вторичным механизмом вплоть до перехода домино–пластин веерной структуры через максимальную точку подъема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчетном году была разработана неявная безусловно устойчивая разностная схема для численного моделирования процессов распространения волн напряжений и деформаций в блочных средах из упругих блоков, взаимодействующих между собой через тонкие податливые прослойки, с контролируемой диссипацией энергии, служащей для подавления паразитных осцилляций решения на слабых разрывах. Разработаны вычислительные технологии для моделирования процесса формирования и распространения веерных волн разрушения в горных породах на больших глубинах. Полученные результаты могут служить для анализа волновых процессов, протекающих в глубинных тектонических разломах Земной коры под действием сейсмических возмущений.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Научные публикации в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования

1. Sadovskii V.M., Chentsov E.P. Discrete modeling of oscillatory processes in a blocky medium // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10187 LNCS. – P. 583-590. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0_66.
2. Tarasov B.G., Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. On the numerical analysis of fan-shaped waves // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10187 LNCS. – P. 657-664. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0_75
3. Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V., Lukyanov A.A. Modeling of wave processes in blocky media with porous and fluid-saturated interlayers // Journal of Computational Physics. – V. 345. – P. 834-855. DOI: 10.1016/j.jcp.2017.06.001.
4. Smolekho I., Sadovskaya O., Sadovskii V. Numerical analysis of acoustic waves in a liquid crystal taking into account couple-stress interaction // CEUR Workshop Proceedings, 2017. – Vol. 1839. – P. 473-486. DOI: 2-s2.0-85020510374
5. Salmin V., Morgun A., Khilazheva E., Pisareva N., Boitsova E., Lavrentiev P., Sadovsky M., Salmina A. Secret life of tiny blood vessels: Lactate, scaffold and beyond // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10208 LNCS. – P. 591-601. DOI: 10.1007/978-3-319-56148-6_53.
6. Tarasov B.G., Guzev M.A., Sadovskii V.M., Cassidy M.J. Modelling the mechanical structure of extreme shear ruptures with friction approaching zero generated in brittle materials // International Journal of Fracture. – V. 207 (1). – P. 87-97. – DOI: 10.1007/s10704-017-0223-1.
7. Chentsov E.P., Sadovskii V.M., Sadovskaya O.V. Modeling of wave processes in a blocky medium with fluid-saturated porous interlayers // AIP Conference Proceedings. – V. 1895. – P. 80002. – DOI: 10.1063/1.5007396

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Выписка из плана научно-исследовательской работы на 2017 год

Содержание работы	Планируемый результат выполнения работы
<p>Математическое моделирование веерного механизма распространения сдвиговых разрывов в тектонических разломах на глубинах сейсмической активности. Разработка параллельных вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, реализующих предлагаемые модели на многопроцессорных ЭВМ. Численное исследование веерных волн, вызванных смещением блоков горной породы.</p>	<p>Формулировка граничных условий контактного взаимодействия блоков горной породы через прослойки, содержащие домино-структуры веерного типа. Параллельные вычислительные алгоритмы и программы для расчета напряженно-деформированного состояния вокруг неподвижного и движущегося вееров. Расчетные зависимости скорости веерной волны от действующего касательного напряжения в блоках.</p>