

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

ГРНТИ 27.35.31

№ (ЦИТИС) АААА-А18-118011890022-1

ИНВ № 0724/2017

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ КНЦ СО РАН

_____ Волков Н.В.

_____ 201__ г.

ОТЧЕТ

О ВЫПОЛНЕНИИ ПРОЕКТА

«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ И
ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ НОВЫХ ПОКОЛЕНИЙ»

(промежуточный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0356-2016-0724

Приоритетное направление: Информационно-телекоммуникационные
системы

Программа ФНИ (номер и наименование): IV.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 темы д.ф.-м.н., профессор	_____ <i>(подпись, дата)</i>	В.М. Садовский
Исполнители:		
зав. отделом, к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	Е.Д. Каропова
г.н.с., д.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	Е.А. Новиков
в.н.с., д.т.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	В.А. Кочнев
в.н.с., д.т.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	К.В. Симонов
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	И.В. Киреев
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	Е.С. Кирик
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	А.А. Лукьянов
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	А.Д. Матвеев
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	А.Н. Рогалев
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	О.В. Садовская
н.с., к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	М.П. Варьгина
н.с., к.ф.-м.н.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	Е.В. Дементьева
м.н.с.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	Т.Б. Витова
м.н.с.	_____ <i>(подпись, дата)</i>	Е.П. Ченцов
инженер	_____ <i>(подпись, дата)</i>	И.В. Смолехо
инженер	_____ <i>(подпись, дата)</i>	А.Е. Королева
Нормоконтролер	_____ <i>(подпись, дата)</i>	А.В. Вяткин

РЕФЕРАТ

Отчет 23 с., 8 рис., 2 табл., 2 прил.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, ГИДРОДИНАМИКА, ДЕФОРМИРУЕМАЯ СРЕДА, БЛОЧНАЯ СТРУКТУРА, ГЕОМОНИТОРИНГ, ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Основная цель работы по проекту состоит в создании эффективных методов численной реализации сложных математических моделей природных и технологических процессов на высокопроизводительных ЭВМ кластерной архитектуры и на суперкомпьютерах с графическими ускорителями.

В результате проведенных исследований созданы вычислительные алгоритмы для анализа микроразрушений в прочной горной породе на глубинах сейсмической активности в рамках модели, имитирующей движение трещин сдвига со сверхсейсмической скоростью. Предложены новые вычислительные модели полых многослойных стержней и замкнутых оболочек вращения с учетом неидеального контакта между слоями для исследования напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности газо- и нефтепроводов. Для анализа трехмерного напряженно-деформированного состояния упругих композитных тел (пластин, балок, оболочек) предложены многосеточные конечные элементы, использование которых в расчетах элементов конструкций из композитов слоистого и волокнистого строения приводит к существенному понижению размерности дискретных моделей.

Для бикубического прямоугольного эрмитова элемента предложены и обоснованы два треугольных элемента (прямоугольный и с криволинейной стороной), использование которых вблизи границы области совместно с прямоугольными элементами обеспечивает межэлементную непрерывность решения. Разработан подход к дискретизации нелинейного оператора лагранжевой производной, основанный на выполнении локального балансового соотношения между соседними слоями по времени в пространстве L_2 . Подход позволил построить новый численный метод для решения начально-краевой задачи для уравнений Навье–Стокса, моделирующей движение вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале. Метод обеспечивает сходимость численного решения в среднеквадратичной норме.

В рамках базовой вычислительной технологии моделирования катастрофических геодинамических природных процессов разработано алгоритмическое и методическое обеспечение для решения прямых и обратных задач геомониторинга цунамигенных

землетрясений. Предложен способ решения прямой задачи геомониторинга для оценки параметров источника цунами на основе построения аппроксимационных функций по данным наблюдений системы геомониторинга процесса подготовки цунамигенного землетрясения (модель «прогностический клин»). Разработана вычислительная методика оценки параметров источника цунами (решение обратной задачи) на основе данных регистрации цунами и расчетных данных о цунами от модельных (эталонных) источников. Выполнен ряд численных экспериментов по моделированию данных геомониторинга катастрофических цунамигенных землетрясениях и цунами.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Математическое моделирование динамики геоматериалов за пределом устойчивости: построение модели, разработка вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, численное исследование процессов распространения волн микроразрушения в горных породах	7
2.1 Алгоритмическая и программная реализация модели полых многослойных стержней для анализа напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности газо- и нефтепроводов	9
2.2 Повышение эффективности вычислительных алгоритмов для решения алгебраических систем уравнений метода конечных элементов в расчетах пространственных и оболочечных элементов конструкций из композитов слоистого и волокнистого строения	10
3.1 Разработка, обоснование и численная реализация новых эрмитовых конечных элементов повышенной точности для эффективного решения краевых задач для эллиптических уравнений в областях с криволинейными границами	11
3.2 Исследование различных способов аппроксимации субстанциональной производной. Исследование эффективности параллельных и векторных реализаций полученных алгоритмов и методов	12
4 Разработка вычислительной технологии для решения прямых и обратных задач геомониторинга катастрофических геодинамических природных процессов	15
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	19
ПРИЛОЖЕНИЕ А	20
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	22

ВВЕДЕНИЕ

Проблема разработки вычислительных технологий для решения ресурсоемких научно-исследовательских и прикладных задач на суперкомпьютерах высокой производительности имеет большое научное и практическое значение. Это связано с постоянным совершенствованием применяемых математических моделей и определяется возрастающими требованиями к точности результатов моделирования. Необходимую техническую базу для реализации этого проекта обеспечивает ускоренный темп роста производительности суперкомпьютеров. В Институте вычислительного моделирования СО РАН – обособленном подразделении ФИЦ КНЦ СО РАН имеются все предпосылки для выполнения фундаментальных научных исследований, соответствующих мировому уровню в данном научном направлении. Имеются сложившиеся коллективы специалистов в области математического моделирования и разработчиков параллельных вычислительных алгоритмов и программ, а также необходимая техническая база – собственные многопроцессорные ЭВМ средней производительности, которые могут быть использованы при отладке и тестировании программ, и высокоскоростные сетевые средства доступа к удаленным Российским суперкомпьютерам.

Настоящий отчет является промежуточным отчетом 2017 года по теме «Математическое моделирование сложных систем и процессов с применением высокопроизводительных вычислительных комплексов новых поколений».

1 Математическое моделирование динамики геоматериалов за пределом устойчивости: построение модели, разработка вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, численное исследование процессов распространения волн микроразрушения в горных породах.

В отчетном году в рамках базового проекта были продолжены исследования веерного механизма распространения сдвиговых трещин в горных породах на глубинах сейсмической активности, на теоретическом уровне разработанного проф. Б.Г. Тарасовым из Университета Западной Австралии. Работа по математическому моделированию веерного механизма была начата в 2016 году в соответствии с планами научных исследований по проекту П.2П / IV.36-2 «Разработка высокопроизводительных вычислительных технологий для анализа деформационных процессов в структурно неоднородных средах в приложении к задачам геомеханики и геодинамики» Комплексной программы фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН № П.2П «Интеграция и развитие». В ходе выполнения проекта была создана лабораторная физическая модель, в которой наглядно демонстрируется процесс распространения веерных волн, представляющая собой точную копию лабораторной модели Тарасова. На основе уравнений Лагранжа была построена дискретная математическая модель вращательного движения системы пластин на плоском основании, соединенных упругими связями, как механической системы с конечным числом степеней свободы. Был предложен алгоритм численной реализации модели на основе метода Мерсона интегрирования жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающий контактное взаимодействие пластин. С помощью разработанной программы в системе Matlab выполнены расчеты процесса формирования и последующего движения веера за счет принудительного раскрытия.

В отчетном году предложенная ранее математическая модель была существенно развита и доработана. В ней учтены силы сухого трения, имитирующие трение скольжения между разделенными трещиной сдвига блоками, силы вязкого трения, обусловленные наличием в веере мелкодисперсных фрагментов микроразрушенной горной породы. Построены и реализованы численно две модели отрыва домино–пластин от монолитной породы. В первой из них механизм отрыва описывается на основе силового критерия: $N = N_s$, где N – сила реакции в головной части веера, а N_s – предельное значение силы сопротивления отрыву. Во второй модели используется нелинейная диаграмма деформирования упругой связи с участком в форме зуба, который учитывает высокую жесткость связи вплоть до момента отделения пластины, а также сброс жесткости в момент отделения. Характерная

диаграмма одноосного растяжения связи представлена на рисунок 1.1. На рисунках 1.2 и 1.3 приведены результаты расчетов, которые демонстрируют хорошее соответствие моделей.

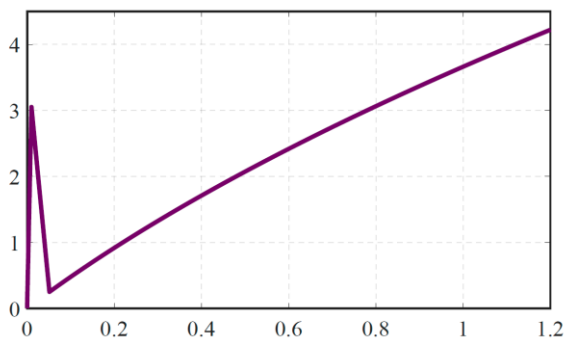


Рисунок 1.1 – Диаграмма зависимости силы реакции связи от деформации связи с участком высокой жесткости и неустойчивым переходом в податливое состояние.

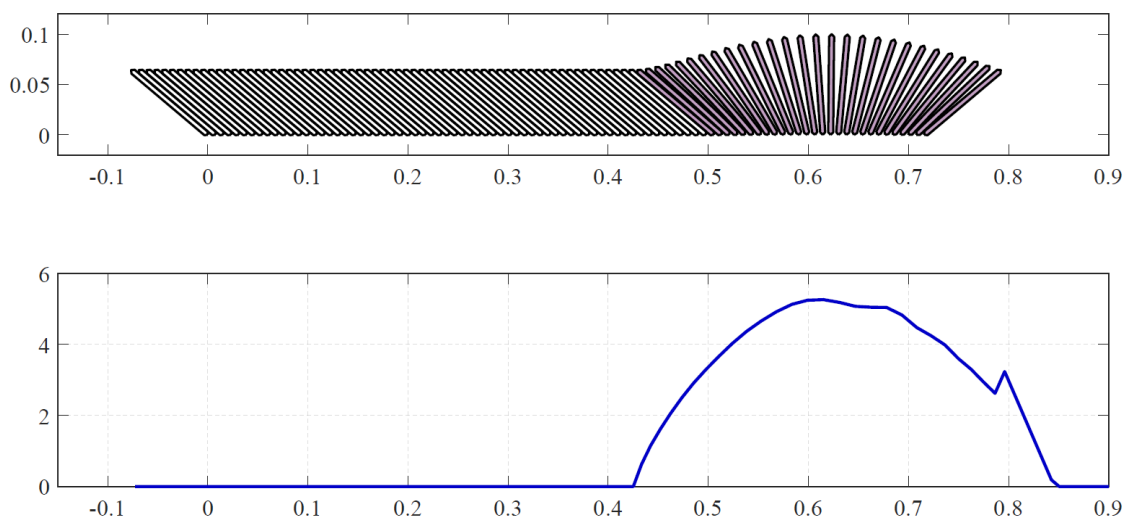


Рисунок 1.2 – Конфигурация веерной системы и распределение реакции связей в веере. Результаты расчетов по первой модели

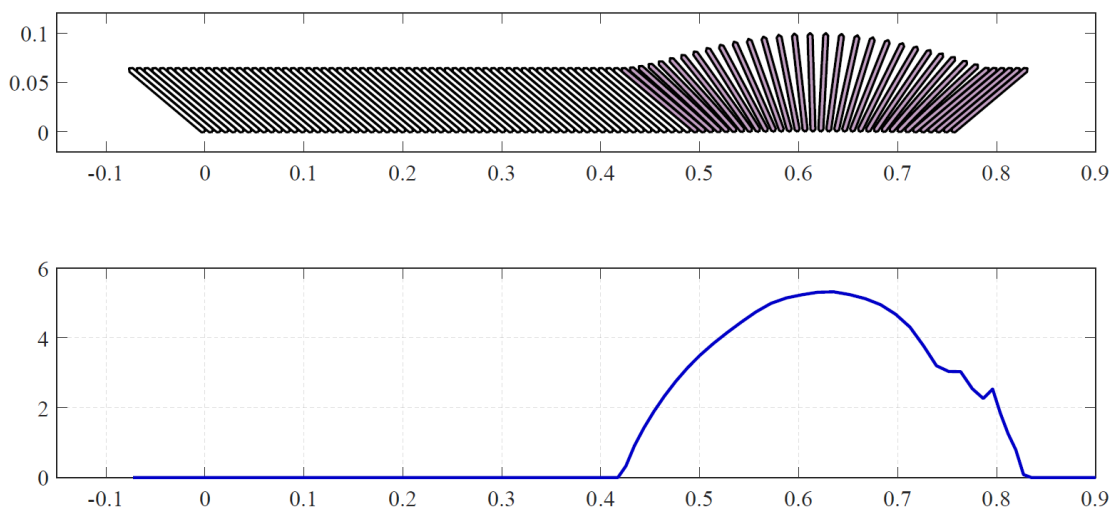


Рисунок 1.3 – Аналогичные результаты расчетов по второй модели

На основе развитой таким образом вычислительной методики проведен анализ влияния вязкого трения на конфигурацию веера и скорость его перемещения. Исследовано также влияние на эти факторы сухого трения, упругой податливости связей и величины активной силы, инициирующей движение веера.

Результаты исследований веерного механизма Тарасова в конечном итоге могут изменить современные представления о природе мощных сейсмических событий типа горных ударов и землетрясений. Они служат обоснованием гипотезы о том, что триггерным механизмом землетрясений служат вновь возникающие геологические разломы, которые зарождаются в областях локализации касательных напряжений в блоках горной породы на глубинах сейсмической активности, и распространяются как веерные волны с высокой скоростью, превышающей скорость поперечных волн. Работы по данному разделу проекта проводились совместно с Центром шельфовых инженерных систем Университета Западной Австралии: Center for Offshore Foundation Systems of the University of Western Australia (COFS UWA).

2.1 Алгоритмическая и программная реализация модели полых многослойных стержней для анализа напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности газо- и нефтепроводов.

Для решения задачи осесимметричного деформирования ортотропной многослойной оболочки вращения предложена аппроксимация вектора перемещений по толщине, для которой на межслойных границах выполняются все условия сопряжения слоев в рамках линейной трехмерной теории упругости. Сформулирован вариационный принцип в терминах неизвестных контактных напряжений, углов поворотов и перемещений. В частном случае полого многослойного стержня с упругими слоями постоянной толщины (труба газо-нефтепровода) число искомых полевых функций от осевой координаты в пять раз превосходит число поверхностей раздела, а порядок возникающей системы обыкновенных дифференциальных больше числа слоев в шесть раз. В случае однородных краевых условий на торцах полого стержня для уменьшения порядка разрешающей системы осуществлен переход к формату данных ТТФ. Для вычисления очередного ТТФ-слагаемого предложена итерационная процедура, сходимость которой к искомому решению доказана и проиллюстрирована на тестовых расчетах.

В случае неидеального межслойного контакта решение задачи осесимметричного деформирования многослойной оболочки эквивалентно минимизации квадратичного функционала при ограничениях на искомые функции. Методом множителей Лагранжа задача сводится для узловых значений искомых функций к решению системы линейных

алгебраических уравнений с симметричной не знакоопределенной матрицей. Для решения подобных систем уравнений предложена модификация неточного метода Узавы (Uzawa), базирующаяся на итерационном процессе Ричардсона (Richardson) с циклическим выбором параметра. Исследована сходимость итераций.

2.2 Повышение эффективности вычислительных алгоритмов для решения алгебраических систем уравнений метода конечных элементов в расчетах пространственных и оболочечных элементов конструкций из композитов слоистого и волокнистого строения.

Для анализа трехмерного напряженно-деформированного состояния упругих композитных тел (пластин, балок, оболочек) предложены однородные и композитные многосеточные конечные элементы (МнКЭ). При построении n – сеточного конечного элемента (КЭ) используются n вложенных сеток. Мелкая сетка порождена базовым разбиением МнКЭ, которое учитывает его неоднородную и микрон неоднородную структуру, сложную форму, сложный характер нагружения и закрепления. Остальные сетки применяются для понижения размерности базового разбиения МнКЭ. Предлагаемые КЭ порождают многосеточные дискретные модели малой размерности и позволяют получить численные решения с малой погрешностью. Реализация метода конечных элементов для многосеточных моделей требует значительно меньшего объема памяти ЭВМ и меньших временных затрат, чем для базовых моделей. Проектирование МнКЭ проводится с применением известных степенных и Лагранжевых полиномов различных порядков, уравнений трехмерной теории упругости на основе выполнения принципа минимума полной потенциальной энергии для каждого МнКЭ и для многосеточных дискретных моделей тел. Такой подход обеспечивает сходимость приближенных решений при уменьшении размеров МнКЭ к точным решениям, что подтверждается тестовыми расчетами и верификацией результатов. Предложены полиномы Лагранжа, представленные в локальных криволинейных системах координат, которые эффективно используются при построении МнКЭ оболочечного типа. Численно исследованы МнКЭ, разработанные для анализа трехмерного напряженного состояния композитных пластин, балок и цилиндрических оболочек.

На основе традиционных условий прочности разработаны скорректированные условия, которые учитывают погрешность приближенных решений, полученных на основе МнКЭ моделей.

3.1 Разработка, обоснование и численная реализация новых эрмитовых конечных элементов повышенной точности для эффективного решения краевых задач для эллиптических уравнений в областях с криволинейными границами.

Использование эрмитовых конечных элементов (КЭ) на прямоугольниках позволяет уменьшить размерность системы уравнений метода конечных элементов (МКЭ) по сравнению с лагранжевыми элементами такой же степени. Однако применение таких КЭ ограничено случаем области, составленной из прямоугольников. Разрабатываемый подход позволяет расширить область применения прямоугольных эрмитовых элементов на случай многоугольной области и области с криволинейными участками границы. Для этого предлагается вблизи границы использовать треугольные эрмитовы элементы (возможно, с криволинейной стороной) того же класса гладкости, что и прямоугольный элемент.

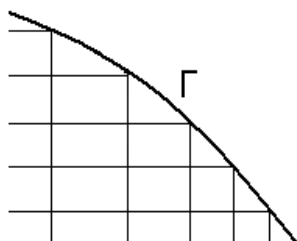


Рисунок 3.1 –
Разбиение области
с использованием
прямоугольных
и треугольных
элементов

Для бикубического прямоугольного эрмитова элемента предложены два треугольных элемента (прямоугольный и с криволинейной стороной), использование которых вблизи границы области совместно с прямоугольными элементами обеспечивает межэлементную непрерывность решения. Фрагмент разбиения области возле криволинейного участка границы показан на рисунок 3.1. Базисные функции предложенного треугольного элемента с криволинейной стороной являются полиномами в отличие от известных изопараметрических и криволинейных КЭ, базисные функции которых имеют более сложный вид.

Однако предлагаемые элементы с криволинейной стороной являются неконформными в смысле главного краевого условия. В этом случае конечноэлементное пространство не является подпространством $H_0^1(\Omega)$. В результате билинейная форма в формулировке МКЭ содержит интеграл по границе области, и в оценке погрешности появляется дополнительное слагаемое (погрешность согласования), что существенно затрудняет обоснование сходимости по сравнению с конформными конечными элементами.

Для уравнения Пуассона с использованием подхода, предложенного И. Нитше и известного как слабое усиление краевого условия Дирихле (weak enforcement of the Dirichlet boundary condition), построена аппроксимирующая билинейная форма, обеспечивающая существование и единственность решения. Доказано, что для области с

криволинейной границей при использовании неконформных КЭ оценка сходимости в энергетической норме имеет порядок $O(h^{3-\varepsilon})$ для сколь угодно малого ε , тогда как для конформных элементов мы имеем оценку порядка $O(h^3)$. Таким образом, использование неконформных элементов практически не нарушает порядок сходимости. Выбор узлов на криволинейной стороне треугольных элементов и использование квадратурной формулы Гаусса–Лобатто для вычисления интегралов по границе области позволяет существенно упростить аппроксимирующую билинейную форму и избежать ухудшения обусловленности системы алгебраических уравнений.

3.2 Исследование различных способов аппроксимации субстанциональной производной. Исследование эффективности параллельных и векторных реализаций полученных алгоритмов и методов.

Рассматривается начально-краевая задача для уравнений Навье–Стокса, моделирующая движение вязкой несжимаемой жидкости в плоском канале. На входной границе задаются скорости потока, на жестких стенках поставлено условие прилипания, на выходной границе используется модифицированное граничное условие “do nothing”.

Для построения дискретного аналога использован полулагранжев подход. На первом этапе, рассматривая член, соответствующий лагранжевой производной, как правую часть, на основе конечных элементов Тейлора–Худа построен устойчивый метод для задачи Стокса. Затем выполнена аппроксимация лагранжевой производной.

В результате на каждом шаге по времени решалась следующая система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\left(\frac{1}{\tau} I + A_h \right) \mathbf{U}_h^k + B_h^T P_h^k = \mathbf{F}_h^k + \frac{1}{\tau} \hat{\mathbf{U}}_h^{k-1}, \quad (1)$$

$$B_h \mathbf{U}_h^k = 0, \quad (2)$$

где I – единичная матрица, $A_h \mathbf{U}_h^k$ – дискретизация вязких членов, $B_h \mathbf{U}_h^k$ – дискретизация дивергенции вектора скорости \mathbf{U}_h^k , $B_h^T P_h^k$ – дискретизация градиента давления. Вклад в вектор правой части дает аппроксимация объемных сил и граничного условия “do nothing”, а также $\hat{\mathbf{U}}_h^{k-1}$ дискретизация нелинейного оператора лагранжевой производной.

В отчетный период разработан подход к дискретизации нелинейного оператора лагранжевой производной. В отличие от большинства консервативных полулагранжевых методов, основанных на аппроксимации балансового соотношения между соседними слоями по времени в пространстве L_1 (Mass Conservative semi-Lagrangian Methods) предлагаемый подход является естественным для применения совместно с МКЭ и основан

на выполнении локального балансового соотношения между соседними слоями по времени в пространстве L_2 . Для реализации подхода разработан метод приближенного вычисления интеграла по криволинейным четырехугольникам на предыдущем слое по времени. Метод использует два отображения единичного квадрата на криволинейные четырехугольники, отдельно для проекции базисной функции МКЭ и собственно для приближенного решения. Основная идея метода изображена на рисунок 3.2.

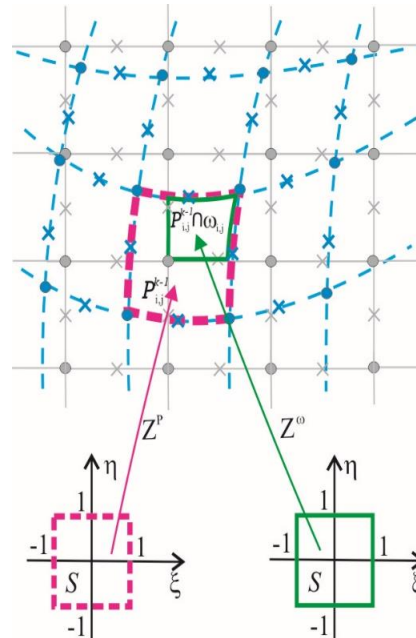


Рисунок 3.2 – Отображения Z^p и Z^v , используемые для аппроксимации интеграла по криволинейному четырехугольнику на предыдущем слое по времени

В результате построенный метод обеспечивает сходимость численного решения в среднеквадратичной норме. Более того, нелинейность присутствует только в диагональных членах, что существенно уменьшает количество итераций по нелинейности и позволяет обойтись без специальных приемов линеаризации.

Проведены численные эксперименты, подтверждающие сходимость численного решения (u_n, v_n, p_n) к точному (u_{ex}, v_{ex}, p_{ex}) на модельных задачах с известным точным решением. В табл. 3.2.1 приведены L_2 -норма (дискретный аналог) ошибки по каждой компоненте вектора решения и порядок сходимости на последовательности сеток для двух способов аппроксимации нелинейного оператора лагранжевой производной. Из результатов расчетов видно, что предлагаемый подход имеет даже больший порядок сходимости, чем первый.

В отчетный период проводился анализ возможности совместного использования технологий векторизации и параллелизации программного кода для сопроцессора Intel® Xeon Phi™. Вычислительные эксперименты выполнялись на высокопроизводи-

тельном сервере ИВМ СО РАН, в состав которого входит сопроцессор Intel® Xeon Phi™ 5110P, имеющий 60 ядер, доступных для вычислений, каждое из которых может поддерживать до 4-х потоков и имеет векторные регистры SIMD (Single Instruction Multiple Data) размерностью 512 бит. Сопроцессор позволяет использовать технологии распараллеливания и векторизацию вычислений. Численные эксперименты показали, что автовекторизация кода с помощью встроенных средств компилятора Си/Си++ от Intel ухудшает время выполнения основного кода программы. Начаты исследования по увеличению эффективности векторизации.

Таблица 3.2.1 Дискретный аналог L_2 -нормы численной ошибки и порядок сходимости при двух способах аппроксимации нелинейного оператора лагранжевой производной.

K	$N_x \times N_y$	$\ u_n - u_{ex}\ _{2,n}$	$\ v_n - v_{ex}\ _{2,n}$	$\ p_n - p_{ex}\ _{2,n}$	Порядок сходимости	
					u/v	p
Неконсервативная аппроксимация вдоль траектории (точка)						
2	8×8	$3.3E-03$	$1.4E-03$	$8.3E-02$		
4	16×16	$1.6E-03$	$3.7E-04$	$4.0E-02$	1 / 1	1
8	32×32	$8.4E-04$	$9.4E-05$	$2.0E-02$	1 / 1	1
16	64×64	$3.9E-04$	$2.4E-05$	$9.9E-03$	1 / 1	1
Консервативная аппроксимация (ячейка)						
2	8×8	$8.5E-06$	$3.1E-06$	$1.3E-01$		
4	16×16	$3.1E-06$	$9.3E-07$	$2.4E-02$	1.5 / 2	2
8	32×32	$1.1E-06$	$2.3E-07$	$8.9E-03$	1.5 / 2	1.5
16	64×64	$5.3E-07$	$5.7E-08$	$2.3E-03$	1.1 / 2	2

Поскольку в основе разработанного метода решения получающихся СЛАУ лежат метод простой итерации и метод сопряженных градиентов, то в качестве тестов рассмотрены эти методы. Для распараллеливания внешних циклов использовалась технология OpenMP. Внутренние циклы векторизовались с помощью директив оптимизирующего компилятора Си/Си++ от Intel. Вычисления проводились с двойной точностью. Результаты численных экспериментов по ручной векторизации кода приведены в табл. 3.2.2. Намечены пути дальнейшего повышения эффективности векторизации.

Таблица 3.2.2 Время (с) выполнения последовательного и векторизованного кода.

N	Метод сопряженных градиентов		Метод простой итерации	
	последовательный	векторный	последовательный	векторный
1024	593,364	330,83	101,307	57,692
2048	2527,749	1398,07	808,701	455,236
4096	10923,519	6149,98	739915,008	420359,865
8192	43310,022	24224,64	727963,534	413557,952

4 Разработка вычислительной технологии для решения прямых и обратных задач геомониторинга катастрофических геодинамических природных процессов.

Разработан способ решения прямой задачи на основе построения аппроксимационных функций по данным наблюдений системы геомониторинга процесса подготовки цунамигенного землетрясения (модель «прогностический клин»), который позволяет оценить время возникновения, интенсивность и местоположение ожидаемого события. Оценка параметров источника производится на основе анализа данных о форшоковой активности выделенной области подготовки сильного цунамигенного землетрясения и построения аппроксимационной модели «прогностический клин» с применением разработанного алгоритма выполнения быстрой нелинейной регрессии. На примере анализа данных геомониторинга, полученных в районе Средних Курильских островов (в период 01.10.2006 – 15.01.2007) показана эффективность работы предлагаемого способа. На рисунке 4.1 приведен пример построения аппроксимирующих функций для верхнего и нижнего наборов точек из данных наблюдений для области подготовки этого сильнейшего цунамигенного землетрясения (с магнитудой $M = 8.3$).

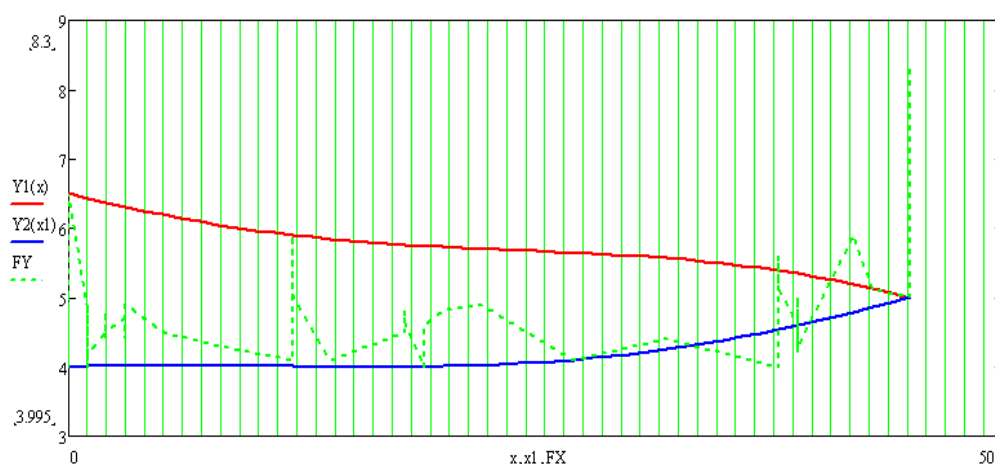


Рисунок 4.1 – Оценка параметров ожидаемого сильного цунамигенного землетрясения

В результате специальной обработки данных наблюдений выделяется местоположение источника вероятного цунами и оцениваются по известным соотношениям его основные характеристики: начальная высота и размеры области возмущения. В качестве примера ниже приведены результаты анализа пространственно-временного распределения форшоковой последовательности (в период 2003 – 2004 гг.) в очаговой области землетрясения 26 декабря 2004 г. в районе Суматры (рисунок 4.2). По диаграмме развития форшокового процесса в координатах «магнитуда–время» для сейсмических событий выделяется прогностический клин для оценки основных параметров ожидаемого сильного землетрясения и вероятного цунами (рисунок 4.3).

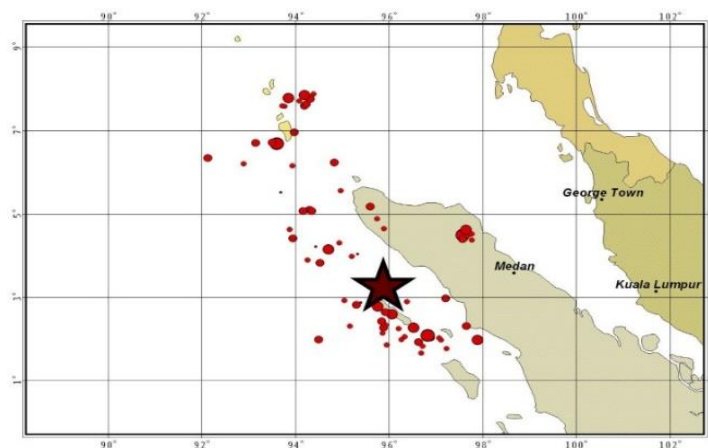


Рисунок 4.2 – Область подготовки землетрясения 26 декабря 2004 г.; звездой обозначен эпицентр основного землетрясения, красным показаны его форшоки

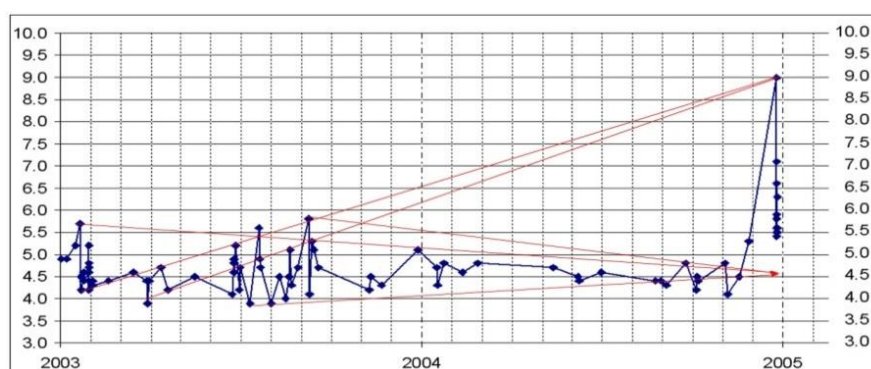


Рисунок 4.3 – Выделение «прогностического клина» по форшоковой последовательности ожидаемого катастрофического цунамигенного землетрясения ($M = 9.0$).

Таким образом, если имеется оперативная информация о форшоковом процессе в форме зависимости магнитуды слабых и сильных сейсмических событий от времени в прогностической области, которая включает сейсмический очаг сильного подводного землетрясения, то существует возможность оценки степени цунамигенности ожидаемого землетрясения. Время возникновения, магнитуда и параметры сейсмического очага цунамигенного землетрясения позволяют оценить время, интенсивность и параметры источника цунами.

Разработана вычислительная методика для решения обратной задачи геомониторинга катастрофических геодинамических природных процессов на основе численного анализа расчетных и натурных данных изучаемого явления. Решение обратной задачи по оценке местоположения источников цунами, возникающих от сильнейших подводных землетрясений в Тихом океане, также основывается на разработанных алгоритмах нелинейной регрессии и спектральной декомпозиции записей цунами, которые регистрируются глубоководными гидрофизическими датчиками.

Для оценки местоположения источника реального цунами используются расчетные мареограммы, полученные в результате численного моделирования распространения цунами от ряда модельных (эталонных) источников. Для обеспечения процедуры решения обратной задачи фиксируется местоположение ряда мареографных пунктов, для которых имеется записи цунами. Для каждого пункта наблюдения также имеется набор расчетных мареограмм цунами от каждого из модельных источников, полученных в рамках применения разработанной вычислительной технологии моделирования процесса распространения цунами. С помощью регрессионного анализа расчетных и натуральных данных оценивается местоположение реального источника относительно указанных модельных (эталонных) источников, т.е. выполняется сравнительный численный анализ расчетных и натурной мареограмм для каждого мареографного пункта и соответствующего набора модельных источников.

В процессе регрессионного анализа данных с помощью разработанного алгоритмического и программного обеспечения выполняются следующие операции. Синтезируется регрессионная модель натурной мареограммы (для каждого датчика) в зависимости от времени. Затем по набору расчетных мареограмм от каждого эталонного источника строится регрессионная модель натурной мареограммы для каждого датчика и соответствующего эталонного источника. Следующий этап моделирования данных – сравнительный анализ результатов регрессионного анализа с целью поиска наилучшего соответствия реального источника определенному набору эталонных источников и конструирование их нелинейной комбинации для получения адекватных оценок параметров исследуемого реального источника, т.е. решение обратной задачи. В результате регрессионного анализа расчетных и натуральных данных о цунами выявляется наиболее вероятное местоположение источника цунами – район вблизи определенных модельных источников, поскольку здесь наблюдается максимальное совпадение по периоду и времени вступления волны цунами на соответствующих мареограммах.

Таким образом, разработана методика для оперативного решения обратной задачи и восстановления данных о параметрах источника цунами на основе нелинейного регрессионного анализа соответствующих расчетных и натуральных данных:

– на первом этапе строятся регрессионные модели для каждого датчика, отражающие зависимости характеристик цунами на натурной мареограмме от набора характеристик волн цунами на расчетных мареограммах, полученных в результате моделирования от эталонных источников;

– на втором этапе строятся регрессионные модели, отражающие зависимость координат центров модельных источников от различий в основных характеристиках волн цунами на натурной и расчетных мареограммах.

В итоге разработана вычислительная технология, которая включает способ анализа форшокового процесса для построения аппроксимационных функций при помощи нелинейной регрессии, а также методику восстановления источника цунами на основе регрессионного анализа натурных и расчетных мареограмм. Следует отметить, что надежность своевременного и достоверного прогноза опасности цунамигенных землетрясений и цунами определяется не только выявленными закономерностями структуры энергетических процессов в очаговой зоне, но и надежностью исходных данных наблюдений геомониторинга изучаемых природных процессов. Поскольку для сейсмоактивных и цунамигенных регионов мирового океана к настоящему времени накоплена обширная информация об особенностях проявления цунамигенных землетрясений и цунами, а современные сейсмологические сети глобального геомониторинга позволяют оперативно контролировать геодинамическую ситуацию в этих регионах, то изложенные принципы оценки параметров ожидаемых цунамигенных землетрясений и источников вероятных цунами могут быть реализованы с учетом региональных особенностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За период 2017 г. выполнен полный цикл исследований, запланированных по данному проекту. В ходе его выполнения получены результаты, приоритет которых подтверждается рейтинговыми публикациями коллектива исполнителей проекта в ведущих Российских и зарубежных научных журналах.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

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

1. Sadovskii V. On thermodynamically consistent form of nonlinear equations of the cosserat theory // Engineering Transactions. – 2017. – Vol.65, Is.1. – P.201-208. DOI: 2-s2.0-85015913001
2. Efremov A., Karepova E., Shaidurov V. A conservative semi-lagrangian method for the advection problem // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10187 LNCS. – P. 325-333. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0_35
3. Dementyeva E., Karepova E. A comparison of numerical techniques for the FEM for the stokes problem for incompressible flow // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10187 LNCS. – P. 286-293. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0_30
4. Tarasov B.G., Sadovskii V.M. Mathematical modeling of fan-structure shear ruptures generated in hard rocks // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10187 LNCS. – P. 648-656. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0_74
5. Varygina M. Numerical modeling of micropolar thin elastic plates // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). – V. 10187 LNCS. – P. 690-697. DOI: 10.1007/978-3-319-57099-0_79
6. Bodyakin E., Peretokin S., Simonov K. Evaluation of seismic hazard using seismic microzonation techniques // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1839. – P. 16-25. DOI: 2-s2.0-85020527287
7. Kochnev V.A. Dynamo models created on the planets under the influence of tidal forces of the satellite and the sun // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – V. 17 (62). – P. 899-906. – DOI: 10.5593/sgem2017/62/S28.115
8. Матвеев А.Д. Расчет упругих конструкций с применением скорректированных условий прочности // Известия Алтайского государственного университета. – Барнаул: Алтайский государственный университет, 2017. – № 4. – С. 116-119 DOI: 10.14258/izvasu(2017)4-21

9. Матвеев А.Д., Гришанов А.Н. Трехмерные композитные многосеточные конечные элементы оболочечного типа // Известия Алтайского государственного университета. – Барнаул: Алтайский государственный университет, 2017. – № 4. – С. 120-125 DOI: 10.14258/izvasu(2017)4-22
10. Varygina M. Numerical modeling of micropolar cylindrical shells on supercomputers with GPUs // AIP Conference Proceedings. – V. 1895. – P. 80005. – DOI: 10.1063/1.5007399
11. Suvorov V.D., Stefanov Y.P., Pavlov E.V., Melnik E.A., Tataurova A.A., Kochnev V.A. Geomechanical conditions of the Tien Shan and Altai Orogeny // Doklady Earth Sciences. – 2017. – Vol. 476, Is.2. – P.1195-1199. DOI: 10.1134/S1028334X17100191
12. Tarasov B., Guzev M., Sadovskiy V., Losev A. Fan-hinged shear as a unique mechanism of dynamic shear ruptures // Solid State Phenomena. – V. 258 SSP. – P. 165-168. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.258.165
13. Matveev A.D. Strength conditions for the elastic structures with a stress error // AIP Conference Proceedings. – V. 1893. – P. 30110. DOI: 10.1063/1.5007568.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Выписка из плана научно-исследовательской работы на 2017 год

Содержание работы	Планируемый результат выполнения работы
<p>1. Математическое моделирование динамики геоматериалов за пределом устойчивости: построение модели, разработка вычислительных алгоритмов и компьютерных программ, численное исследование процессов распространения волн микроразрушения в горных породах.</p>	<p>1. Математические модели неустойчивого деформирования геоматериалов с учетом их многофазности; алгоритмы и программы, реализующие модели на многопроцессорных ЭВМ. Результаты анализа процессов распространения сдвиговых трещин в горных массивах.</p>
<p>2. Алгоритмическая и программная реализация модели полых многослойных стержней для анализа напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности газо- и нефтепроводов. Повышение эффективности вычислительных алгоритмов для решения алгебраических систем уравнений метода конечных элементов в расчетах пространственных и оболочечных элементов конструкций из композитов слоистого и волокнистого строения.</p>	<p>2. Модели полых, нагруженных внутренним и внешним давлением, многослойных стержней для анализа напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности газо- и нефтепроводов. Алгоритмическая и программная реализация моделей методом конечных элементов, обеспечивающим выполнение на граничных поверхностях условий согласования как по перемещениям, так и по усилиям. Вычислительные алгоритмы, учитывающие особенности схем нагружения, позволяющие понизить размерность алгебраических систем уравнений метода конечных элементов в расчетах пространственных и оболочечных элементов конструкций из композитов слоистого и волокнистого строения.</p>
<p>3. Разработка, обоснование и численная реализация новых эрмитовых конечных элементов повышенной точности для эффективного решения краевых задач для эллиптических уравнений в областях с криволинейными границами. Исследование различных способов</p>	<p>3. Обоснованные новые методы решения краевых задач для эллиптических уравнений, в том числе в областях с криволинейной границей. Новые методы численного решения двумерного уравнения адвекции с помощью полу-лагранжевого подхода.</p>

<p>аппроксимации субстанциональной производной. Исследование эффективности параллельных и векторных реализаций полученных алгоритмов и методов.</p>	
<p>4. Разработка вычислительной технологии для решения прямых и обратных задач геомониторинга катастрофических геодинамических природных процессов.</p>	<p>4. Вычислительная технология для решения прямых и обратных задач геомониторинга катастрофических геодинамических природных процессов.</p>