

Тема работы:

Проведение численного геомеханического моделирования деформации горных пород для изучения особенностей строения земной коры на примере Байкальской впадины.

Состав коллектива (на момент выполнения работы):

Епонешникова Любовь Юрьевна, аспирант ГГФ НГУ, м.н.с. ИНГГ СО РАН

Плешков Владимир Игоревич, магистрант ФИТ НГУ

Дучков Антон Альбертович, к.ф.-м.н., зав.лаб. ИНГГ СО РАН, доцент НГУ

Аннотация

В рамках работы протестирован набор программных инструментов для выполнения численного моделирования деформации горных пород. Настоящая программа осуществляет итеративное численное моделирование процесса деформации горных пород напряженной под действием силы тяжести и при возникновении сдвига. Для тестирования программы проведен ряд тестов по моделированию напряженно-деформированного состояния предварительно недеформированного, но напряженного под действием силы тяжести однородного слоя среды (используя параметры среды, характерные для Байкальской впадины). Проверена правильность работы программы с помощью сравнения результатов расчетов, полученных аналитически и путем численного моделирования. Для сравнения использовались параметры горизонтальных и вертикального напряжений, а также значения глубины перехода из упругости в пластичность. В дальнейшем планируется работа с более сложными средами.

Научное содержание работы:**1. Постановка задачи.**

Тестирование программы для выполнения трехмерного численного моделирования формирования нарушений в слое геосреды под действием силы тяжести (используя параметры, характерные для Байкальской впадины).

2. Современное состояние проблемы (на момент начала работы).

Геодинамическое состояние и эволюция литосферы Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) были рассмотрены во множестве российских и зарубежных работ. Несмотря на это, однозначного мнения о глубинном строении земной коры и мантии, а также о причинах образования Байкальского рифта, до сих пор не сформировано. Региону свойственна высокая сейсмическая активность. Мониторинг локальной сейсмичности позволяет изучать тектонические процессы в активных разломных зонах, например, уточнять скоростные модели, проводить сопоставление с системой разломов и напряженно-деформированным состоянием. Располагая сейсмическими и плотностными данными появляется возможность проведения численного геомеханического моделирования среды. Двумерное моделирование структуры и напряженно-деформированного состояния литосферы БРЗ проводилось, например, в работах [Гольдин и др., 2006; Дядьков и др., 1996]. Для построения полной картины деформации и структуры сдвиговых зон проводились численные эксперименты, позволяющие проследить все стадии развития деформации и образования нарушений [Стефанов, Бакеев, 2012]. Нужно отметить работу [Стефанов, Бакеев, 2015], где в 3D-постановке выполнено численное моделирование формирования нарушений в произвольном слое геосреды при разрывном

горизонтальном сдвиге основания. Моделирование процесса деформации для района БРЗ и создание комплексной сейсмотектонической модели развития в этой области является актуальной задачей, решение которой необходимо для расширения системы представлений об особенностях строения земной коры в данном районе. Предполагается, что изучение полученных моделей позволит внести вклад в понимание современных тектонических процессов, происходящих в Байкальской впадине.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Для проведения численного геомеханического моделирования деформации горных пород была использована доработанная программа геомеханического моделирования (данная часть работы выполнялась В.И. Плешковым), а также разработанные скрипты подготовки входных данных и визуализации результатов. Для доработки программы моделирования в качестве основы использовалась программа численного моделирования деформации горных пород, реализованная авторами [Стефанов, Бакеев, 2012]. Реализованный набор программных инструментов был использован Епонешниковой Л.Ю. для дальнейшего проведения тестирования программы и вспомогательных скриптов на кластере НГУ.

Настоящая программа осуществляет итеративное численное моделирование процесса деформации горных пород напряженной под действием силы тяжести и при возникновении сдвига. Моделирование осуществляется в трехмерной сетке заданного размера. В программе прописываются граничные условия, условие завершения вычислений, условия сохранения промежуточных результатов моделирования. Моделирование осуществляется для материалов с заданными свойствами. Обновленная версия программы позволила считывать свойства материалов ячеек сетки из бинарного файла, который может быть задан пользователем произвольным образом. Добавлено сохранение свойств сетки моделирования через заданное количество итераций для возможности возобновления моделирования в случае сбоя. Добавлены новые граничные условия, условия завершения, условия сохранения результатов для решения задачи установления. Добавлен признак ячеек, позволяющий исключить их из процесса моделирования — это позволяет осуществлять меньше вычислений в случае, например, наличия слоя воздуха в модели.

Для тестирования программы на первом этапе рассматривалась задача о деформировании однородного слоя среды, который находится под действием силы тяжести. Предполагается, что в начальном состоянии горизонтальная деформация отсутствует. Тогда аналитически можно определить начальное напряженное состояние слоя в случае упругости и при отсутствии дополнительных сил, задав значения коэффициента Пуассона и плотности среды. При этом параметры среды выбирались согласно известной априорной геологической и геомеханической информации о Байкальской впадине, а также на основе собственных вычислений скоростных аномалий исследуемого района. Параметры материалов среды включали следующие свойства: плотность, упругие модули (сжатия и объемного сдвига), начальная когезия, коэффициент внутреннего трения, коэффициент дилатансии и др. Сравнивая результаты расчетов для случая однородной среды, полученные аналитически и путем моделирования, можно проверить правильность работы программы. Для сравнения используются параметры горизонтального и вертикального напряжений. Близкие значения этих параметров в обоих случаях (аналитика/моделирование) указывают на правильность работы программы.

На втором этапе рассматривалась задача о расчете глубины перехода из упругости в пластичность. Переход в неупругое состояние на стадии начального нагружения приводит к

изменению горизонтальных компонент напряжений. Они будут рассчитываться в соответствии с законом, описывающим поведение среды за пределом упругости. Вертикальные напряжения останутся прежними, т.к. они определяются весом вышележащей породы. Глубину перехода в пластичность можно также оценить и аналитически и с помощью моделирования. Для этого рассматриваются параметры эффективной прочности и интенсивности касательных напряжений в зависимости от свойств используемого материала (свойства тестируемых параметров материалов соответствуют значениям, наблюдаемым в БРЗ). Интенсивность касательных напряжений не должна превышать некую допустимую величину, которая определяется эффективной прочностью (в противном случае слой переходит из упругости в пластичность).

4. Полученные результаты. Иллюстрации, визуализация результатов.

В рамках работы программа и разработанные скрипты задания конфигурационных файлов запуска основной программы на кластере постоянно тестировалась и претерпевала изменения. Также были созданы скрипты, которые облегчают визуальный анализ результатов моделирования. Вместе эти инструменты облегчают проведение геомеханического моделирования специалистам-геологами.

Для изучения характера развития деформации были рассмотрены варианты с различными упругими и прочностными параметрами слоя среды. В качестве примера, параметры модели, описывающие свойства среды, которые соответствуют песчанику, приведены ниже (рис. 1). Расчеты проводились на сетках с пространственным шагом 500 и 1000 м.

```
'Sandstone', # название материала,
0.0,        # is_air
2.2,        # rho, плотность
0.128,      # Kv, модуль объемного сжатия
0.0534,     # Mu, модуль сдвига
0.00001,    # c0, начальная когезия
0.3,        # sigma_l, минимальное значение когезии от начального (с/c0)
0.325,      # Alpha, коэффициент внутреннего трения
0.08,       # beta, коэффициент дилатансии
0.01,       # Nc, параметр Nc в кривой упрочнения-разупрочнения для когезии
0.01,       # pLc0, параметр гамма*(критическая пл. деф.) в кривой упрочнения-разупрочнения для когезии
0.0         # среднее напряжение в критерии разрушения (не используется)
```

Рис. 1. Задание параметров материала в конфигурационном файле.

Далее сравнивались полученные в результате моделирования параметры двух горизонтальных и вертикального напряжения (t_{yy} , t_{zz} , t_{xx}), а также рассчитанные по формулам напряжения (σ_{hor} , σ_{vert}). При этом полученные путем моделирования значения двух горизонтальных напряжений (t_{yy} и t_{zz}) должны совпадать. А значения вертикальных (t_{xx} и σ_{vert}) и горизонтальных (t_{yy} , t_{zz} и σ_{hor}) напряжений, полученные с помощью моделирования и рассчитанные аналитически должны совпадать или быть достаточно близки. На рис. 2 проиллюстрирован пример расчетов для песчаника, в котором выполняются все эти условия.

Второй шаг в решении задачи заключается в расчете начального состояния. Для этого удобно выполнить оценку напряжений, возникающих под действием силы тяжести. Это можно сделать, построив для заданных параметров среды графики изменения эффективной прочности и интенсивности касательных напряжений с глубиной, определив тем самым глубину перехода в пластичность. На рис. 3 представлен результат, полученный аналитически. Видно, что пластичность для данных параметров материала наступает на глубине ~447 м. Таким образом, напряжения, рассчитанные на основании упругого закона, будут начальными лишь для случаев, когда состояние пластичности при заданной толщине среды не достигается. По данным

моделирования для этого материала получена глубина перехода в пластичность ~ 442 м, что довольно близко к аналитическому решению.

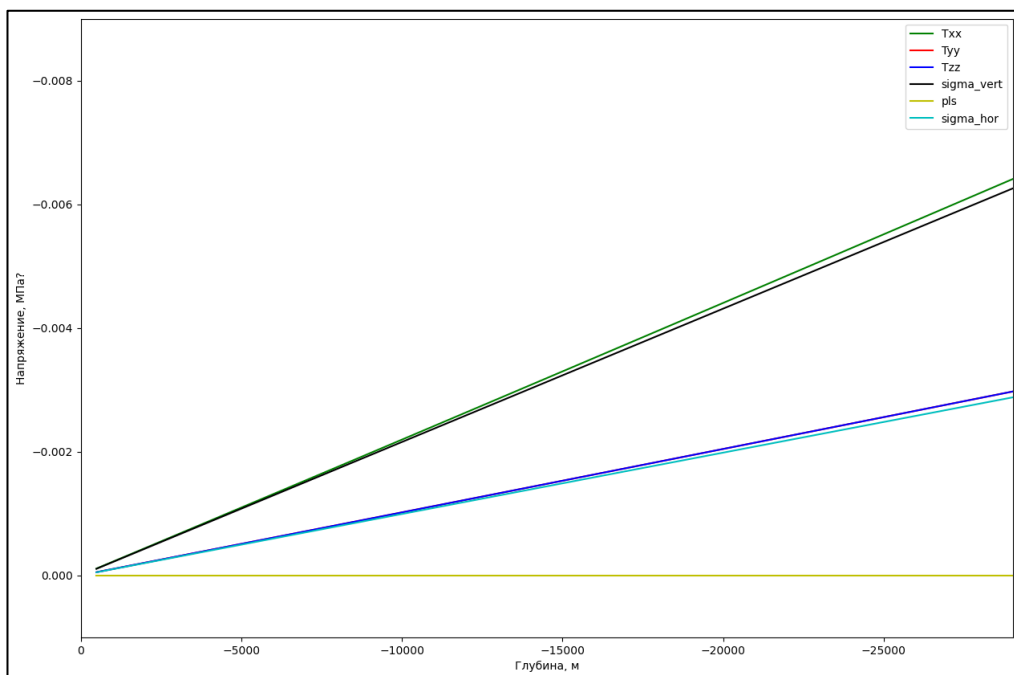


Рис.2. Сравнение значения напряжений, полученных в ходе моделирования и аналитически.

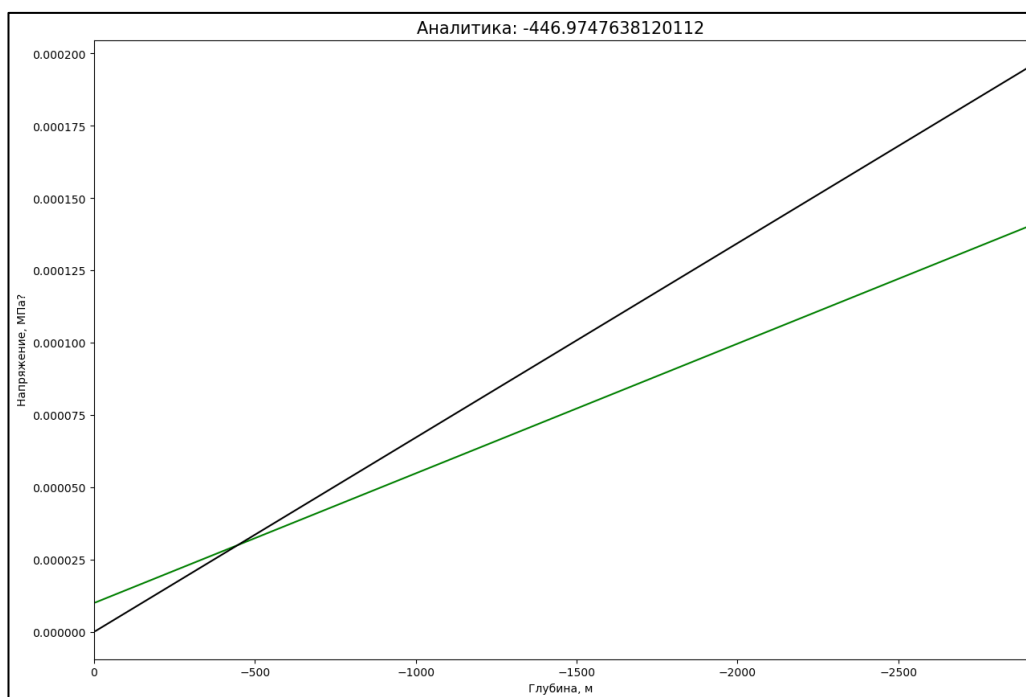


Рис.3. Оценка глубины перехода в пластичность. На графике представлена эффективная прочность (зеленый) и интенсивность касательных напряжений (черный). Пересечение графиков дает оценку глубины перехода в пластичность.

Для дальнейших расчетов использовалась более сложные модели среды: двухслойные модели, а также неоднородные модели, которые имитируют Байкальскую впадину. Во втором

случае, полученные ранее автором исследования скорости распространения упругих волн в горных породах были пересчитаны в упругие модули. На данный момент эти результаты еще не готовы к общедоступной публикации.

Представленные результаты имеют модельный характер, и соответствуют конкретным, упрощенным условиям деформирования и свойствам среды.

5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование кластера позволило выполнить тестирование программы на большем числе ядер ЦПУ, чем доступно на обычных рабочих станциях, а также провести тестирование на нескольких узлах кластера при использовании MPI для распараллеливания вычислений в распределенной памяти.

Список литературы:

1. Гольдин С.В., Суворов В.Д., Макаров П.В., Стефанов Ю.П. Структура и напряженно-деформированное состояние литосферы Байкальской рифтовой зоны в модели гравитационной неустойчивости // Геология и геофизика – том 47 – № 10 – С. 1094-1105 – 2006.
2. Дядьков П.Г., Назаров Л.А., Назарова Л.А. Моделирование напряженного состояния земной коры в окрестности сейсмогенного разлома в центральной части Байкальского рифта // Геология и геофизика – том 37 – № 9 – С. 77-86 – 1996.
3. Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А. Формирование цветковых структур нарушений в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // Физика Земли – № 4 – С. 81-93 – 2015.
4. Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А. Формирование полос локализованного сдвига в слое геосреды при разрывном сдвиге основания // Физическая мезомеханика. – 2012. – Т. 15. – № 2. – С. 77-84