

Моделирование напряжённого состояния осадочного чехла над системой разломов в фундаменте

Мягков Д.С. 

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, dsm@ifz.ru

Аннотация. В работе рассматривается вопрос об особенностях напряжённо-деформированного состояния осадочного чехла над системой разломов различных типов (взрезы, взбросы, сбросы) в фундаменте. Исследование ведётся методом численного моделирования. Представлены различные модели, в которых аномальные напряжения осадочного чехла формируются над разломами с различными углами падения и амплитудой смещения по разлому. Показаны форма зон аномалий напряжений и деформаций в осадочном чехле. Результаты моделирования представлены для важнейших параметров напряжённо-деформированного состояния – давления, максимальных касательных напряжений и сдвиговых деформаций, кулоновых напряжений и отношения вертикальных и горизонтальных напряжений. Результаты сравниваются с данными физического и аналитического моделирования.

Ключевые слова: Разломы, геодинамика, математическое моделирование, геомеханика, тектонофизика.

Modeling the stress state of the sedimentary cover over the fault system in the basement

Myagkov D.S. 

Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, dsm@ifz.ru

Abstract. The article considers the issue of the features of the stress-strain state of the sedimentary cover above the system of faults of various types (cuts, reverse faults, normal faults) in the foundation. The study is carried out by numerical simulation. Various models are presented in which anomalous stresses of the sedimentary cover are formed over faults with different dip angles and displacement amplitudes along the fault. The shape of the zones of stress and strain anomalies in the sedimentary cover is shown. The simulation results are presented for the most important parameters of the stress-strain state - pressure, maximum shear stresses and shear strains, Coulomb stresses and the ratio of vertical and horizontal stresses. The results are compared with physical and analytical modeling data.

Key words: Faults, geodynamics, mathematical modeling, geomechanics, tectonophysics.

Введение

В данной работе методом численного моделирования рассматривается вопрос об особенностях напряжённого состояния, формирующегося в осадочном чехле над активными разломами в кристаллическом фундаменте. Ранее эта проблема изучалась, в том числе – методами физического и аналитического моделирования. (Григорьев, Михайлова, 1985; Григорьев и др., 1987, 1989). Анализ данных физических экспериментов, проведённых Михайловой, позволил детально изучить особенности деформации осадочного чехла, картины морфоструктур разрушения на разных этапах нагружения моделей, причём моделирование проводилось для разломов всех типов и для систем разломов. Однако физическое моделирование проводилось при несоблюдении условия подобия по силе тяжести, также используемый материал – бентонитовые глины, не полностью соответствует по коэффициенту Пуассона усреднённой породе осадочного чехла. Поэтому цель данного исследования заключается в воспроизведении этих результатов современными методами численного моделирования, адаптированными для применения в геомеханике, сопоставление с результатами моделирования, проводимого ранее и детальном изучении полученных зон аномальных напряжений и деформаций над разломами в фундаменте. В рамках данной работы основное внимание будет уделяться влиянию угла падения разлома на напряжённое состояние вышележащих пород. В качестве модели сознательно берётся максимально упрощённая модель осадочного чехла (фактически – однородная), для демонстрации эффекта влияния разлома как такового и сопоставления с физическими моделями. При этом берётся адаптированная для применения в геодинамике меха-

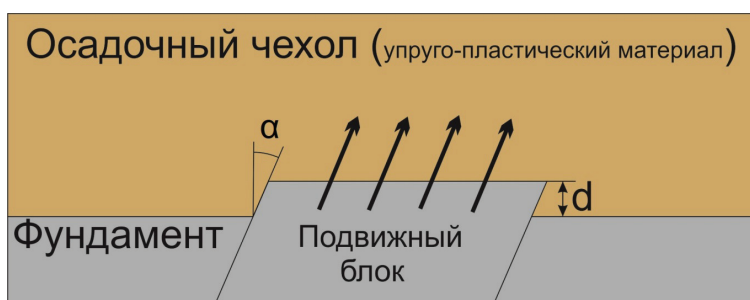


Рис. 1. Общая схема моделей серии численных экспериментов.

Fig. 1. General scheme of models for series of numerical experiments.

ника, осадочный чехол рассматривается как упрочняющееся упруго-пластическое тело для максимально корректного математического учёта всех механических эффектов, связанных с воздействием разломов.

Методика численного моделирования. Схемы моделей и характер нагружения

Опишем кратко методику моделирования. Применяется численный конечно-разностный метод, изначально разработанный Уилкинсом (Уилкинс, 1967) и, в дальнейшем, усовершенствованный Стефановым (Стефанов, 2005) специально для применения в задачах геодинамики и геомеханики. В рамках данного подхода для расчёта тела модели рассматриваются как упруго-пластические, с неассоциированным законом пластического течения Друкера-Прагера-Николаевского (Николаевский, 1972, 1983), адаптированного для горных пород. Моделирование ведётся в двумерной постановке на равномерной сетке 100×100 м, с точки зрения механики задача относится к классу типа – плоская деформация. Расчёт ведётся в программной среде fortran, моделирование состоит из двух этапов – первичное нагружение только гравитационными силами и второй – реализация смещения по разломам заданной амплитуды и последующая деформация осадочного чехла. Данная методика неоднократно применялась в геодинамическом моделировании, более подробное её описание дано в работе (Ребецкий и др., 2018).

Представленная в данном исследовании модель имеет прямоугольную геометрию с размерами 4×80 км. Модель, как таковая, состоит только из осадочного чехла, деформация, связанная со смещениями по разломам задаётся на её подошве и сам кристаллический фундамент в расчёте не участвует. Можно рассматривать эффект влияния изолированного разлома или системы, от двух и более разломов. В данной работе представлены результаты моделирования для системы из 2 разломов, обрамляющих единый жёсткий блок фундамента. Общая схема модели представлена на рисунке 1. Варьируемые параметры – мощность осадочного чехла, ширина блока фундамента, испытывающего подвижку, наклон разломов (соответствующий направлению движения блока), амплитуда его смещения (и, соответственно, смещения по разломам). В данной работе представлены результаты для различных значений угла α , который берётся равным 0° , 30° и 60° . При значении $\alpha = 0^\circ$, оба обрамляющих блок фундамента разлома будут взрезами, при ненулевом значении левый разлом будет сбросом, а правый – взбросом. Таким образом в работе рассмотрены разломы всех типов, кроме сдвигового. Упруго-пластические свойства слоя подобраны так, чтобы вещество слоя соответствовало породам осадочного чехла. Плотность $\rho = 2.7 \text{ кг/м}^3$, скорость р-волн $v_p = 6.2 \text{ км/с}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.25$. Когезия Y принималась равной 15 Бар, коэффициент угла внутреннего трения – 0.05, последнее значение было эффективно занижено для учёта влияния флюида, (см. Погорелов, Ребецкий, 2010). Амплитуда смещения по разломам бралась равной 50 м. Ширина блока принималась равной 40 км при общей ширине модели в 80 км.

Результаты моделирования. Выводы

Проведённая серия расчётов представлена на рисунках 2, 3 и 4 для значения угла α равного 0° , 30° и 60° соответственно. Для описания напряжённого состояния рассматривались инварианты напряжённого состояния – средние нормальные и максимальные касательные напряжения,

а также кулоновы напряжения и, представленный первым на рисунках, параметр σ_{yy}/σ_{xx} , то есть – отношение вертикального и горизонтального нормальных напряжений, которое в двумерном случае описывает структуру напряжённого состояния, а именно – значение параметра больше 1 соответствует геодинамическому типу напряжённого состояния – вертикальное сжатие, меньше 1 – горизонтальное сжатие, а равное 1 – гидростатическое напряжённое состояние. Для описания деформации осадочного чехла представлен второй инвариант тензора деформации (максимальные сдвиговые деформации). Начнём описание напряжённого состояния для случая взреза (рис. 2).

Над поднятым крылом взреза формируется положительная аномалия давления около 100 Бар, причём над опущенным крылом отрицательная аномалия давления меньше по амплитуде и в целом они не симметричны. Примечательно, что близ дневной поверхности существует уровень, где аномалия давления меняет знак. Асимметрия аномалий над крыльями – явное отличие от результатов аналитического моделирования. Сдвиговые деформации сосредоточены в относительно узком секторе, направленном к дневной поверхности, их амплитуда падает от значения примерно от 0.13 до 0.01 и меньше к дневной поверхности. Примечательно, что у дневной поверхности максимум деформации разбивается на 2 отдельных, а строго над максимумом близ фундамента у дневной поверхности расположен локальный минимум. Узость сектора деформации – отличие от резуль-

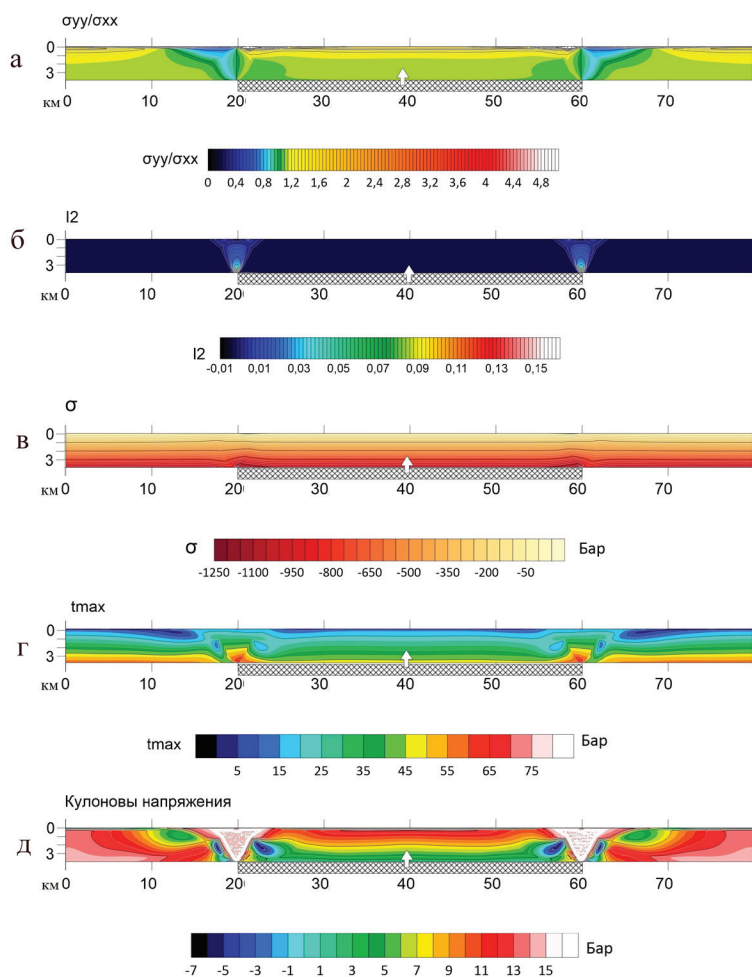


Рис. 2. Результаты моделирования (блок с разломами взрезного типа, высота поднятия блока – 50 м): а – отношение вертикального нормального напряжения к горизонтальному, б – второй инвариант тензора деформации, в – шаровая часть тензора напряжения, г – максимальные касательные напряжения, д – кулоновы напряжения.

Fig. 2. Results of modeling (block with vertical faults, block height – 50 m): а – ratio of vertical normal stress to horizontal, б – second invariant of the strain tensor, в – spherical part of the stress tensor, г – maximum shear stresses, д – Coulomb stress.

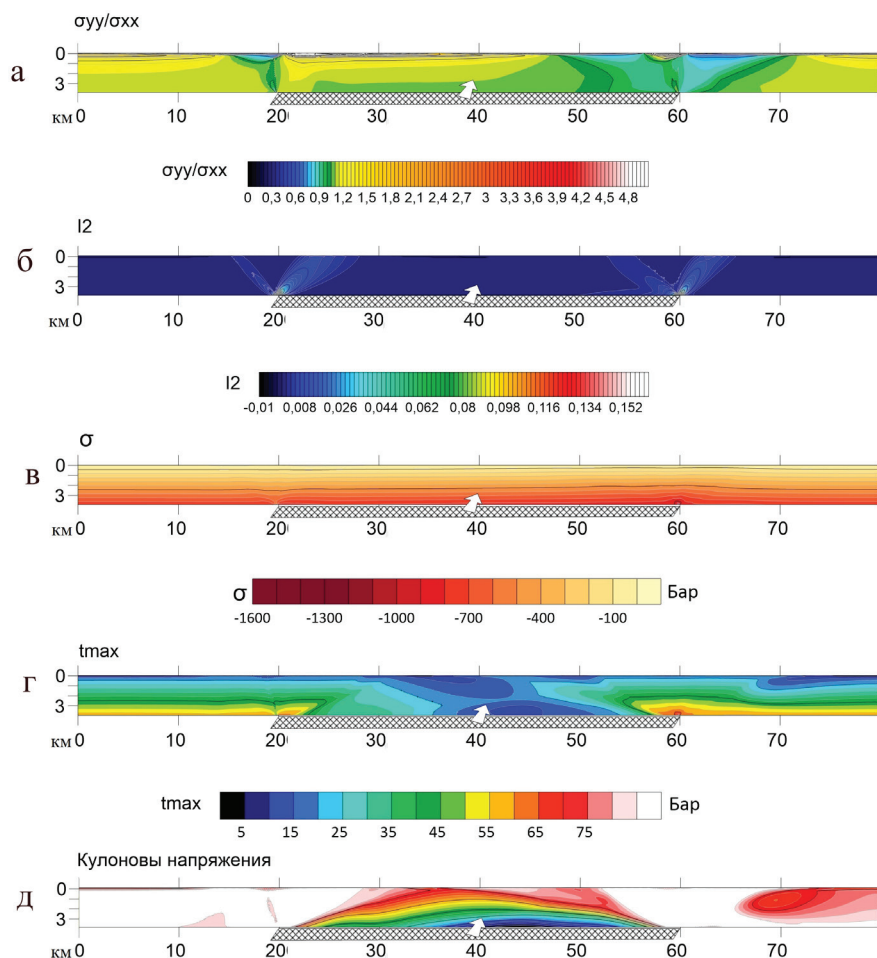


Рис. 3. Результаты моделирования (блок с наклонными разломами, угол падения – 30° , высота поднятия блока – 50 м): а – отношение вертикального нормального напряжения к горизонтальному, б – второй инвариант тензора деформации, в – шаровая часть тензора напряжения, г – максимальные касательные напряжения, д – кулоновы напряжения.

Fig. 3. Results of modeling (block with oblique faults, dip angle – 30° , block height – 50 m): a – ratio of vertical normal stress to horizontal, b – second invariant of the strain tensor, c – spherical part of the stress tensor, d – maximum shear stresses, e – Coulomb stress.

татов физического моделирования, там область сдвиговых деформаций была достаточно широка и близ фундамента. Максимальные касательные напряжения дают более сложную аномалию: над разломом формируется сильный максимум (более 20 Бар), который разделяется на два секторальных максимума как в сторону поднятого, так и опущенного блока, оба этих максимума обрамлены минимумами аномалии, причём минимумы также несимметричны и больший расположен над опущенным блоком. Максимум кулоновых напряжений в целом располагается в секторе по геометрии схожем с таковым для второго инварианта тензора деформации, хотя минимумы имеют более сложную геометрию. В целом структура напряжённого состояния такова: над опущенными блоками в узком секторе от фундамента располагается зона горизонтального сжатия, а над поднятым блоком – вертикального сжатия, близкого к гидростатике. Причём на поверхности расположены области выраженного горизонтального/вертикального сжатия над соответствующими блокам их геометрия совершенно отлична от таковой для области близ фундамента (см. рис. 2). Наличие таких приповерхностных аномалий, отметим, прослеживалось по данным физического моделирования.

В случае слабонаклонного (30°) сброса (левый разлом на рис. 3), область максимальной деформации также становится наклонной (в сторону лежачего крыла), хотя по амплитудам она похожа на предыдущий случай. Также прослеживается побочная зона в секторе, направленном

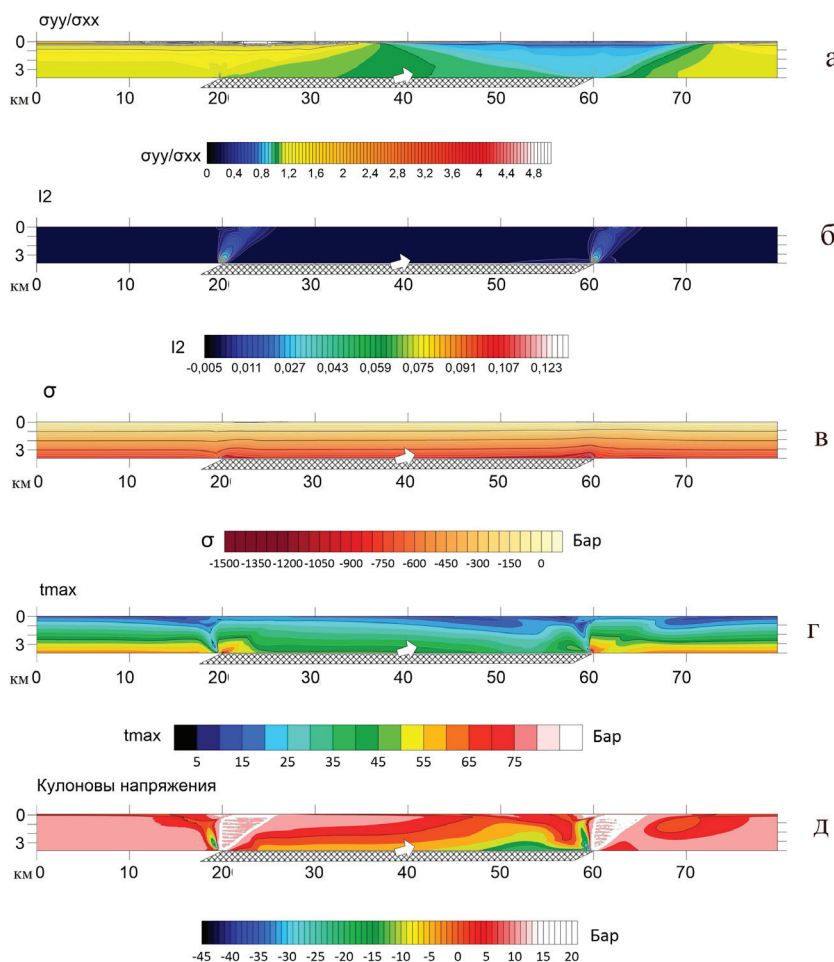


Рис. 4. Результаты моделирования (блок с наклонными разломами, угол падения – 60° , высота поднятия блока – 50 м): а – отношение вертикального нормального напряжения к горизонтальному, б – второй инвариант тензора деформации, в – шаровая часть тензора напряжения, г – максимальные касательные напряжения, д – кулоновы напряжения.

Fig. 4. Results of modeling (block with oblique faults, dip angle – 60° , block height – 50 m): а – ratio of vertical normal stress to horizontal, б – second invariant of the strain tensor, в – spherical part of the stress tensor, г – maximum shear stresses, е – Coulomb stress.

в сторону опущенного блока. В поле давления начинает доминировать единственный минимум над разломом, для касательных напряжений прослеживается как слабый максимум, так и минимум. Структура напряжённого состояния напоминает таковую для взреза, но область горизонтального сжатия становится меньше и ближе к гидростатике, а область вертикального сжатия, напротив, больше и выраженнее. Для взреза (правый разлом на рис. 3) ситуация обратная – зона горизонтального сжатия становится больше по площади, причём из-за общего горизонтального смещения блока она начинает формироваться и над поднятым блоком, правда область вертикального сжатия ещё существует. При этом область максимальных сдвиговых деформаций весьма похожа на таковую для сброса. Аномалия давления же имеет обратный знак, хотя по амплитуде также около 100 Бар. Для касательных напряжений формируется единый максимум около 15 Бар.

Для сильнонаклонённого сброса и взброса (60° , рис. 4) картина напряжённо-деформированного состояния похожа на предыдущий случай, но есть свои особенности. Над сбросом уже в принципе отсутствует область горизонтального сжатия, а над взбросом – растяжения. Максимум давления над взбросом становится несимметричным с большими давлениями над поднятым блоком, а над сбросом формируется положительная аномалия давления также над поднятым блоком (но для сброса это лежащее крыло). Эти положительные аномалии соответствуют положительным аномалиям касательных напряжений также над поднятым блоком, причём непосредственно над блоком

как таковым формируется слабая общая положительная аномалия касательных напряжений. Кулоновы напряжения достигают максимума в направлении лежащего крыла в обоих случаях.

Полученные закономерности позволили уточнить данные физического моделирования и более корректно описать геометрию аномальных зон напряжённо-деформированного состояния в осадочном чехле над разломами различных типов. Полученные результаты также позволяют сопоставить напряжённо-деформированное состояние на поверхности с типом разлома в фундаменте. Отдельно отметим сложную геометрию приповерхностных аномалий, закономерности распределения которых могут быть использованы при решении обратных задач геодинамики.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФ 22-27-00591.

Литература

1. Григорьев А.С., Волович И.М., Михайлова А.В., Ребецкий Ю.Л., Шахмурадова З.Е. Исследование напряженного состояния, кинематики и развития нарушений сплошности осадочного чехла над активными разломами фундамента // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука. 1987. С. 5–31.
2. Григорьев А.С., Волович И.М., Ребецкий Ю.Л. Задача о кинематике и напряжённом состоянии слоя при смешанных краевых условиях в связи с интерпретацией современных движений в платформенных областях // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1989. № 7. С. 38–54.
3. Григорьев А.С., Михайлова А.В. Сочетание теоретического и экспериментального методов при исследовании процессов образования тектонических структур // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука. 1985. С. 131–147.
4. Николаевский В.Н. Механические свойства грунтов и теория пластичности // Итоги науки и техники. Серия: Механика твёрдых деформируемых тел. Т. 6. М.: ВИНТИ АН СССР, 1972. С. 5–81.
5. Николаевский В.Н. Механика геоматериалов и землетрясения // Итоги науки и техники. Серия: Механика твёрдых деформируемых тел. Т. 15. М.: ВИНТИ АН СССР, 1983. С. 817–821.
6. Погорелов В.В., Конешов В.Н., Ребецкий Ю.Л. Проблемы численного моделирования в тектонофизике. Модель напряженного состояния западного фланга Зондской субдукционной области // Проблемы сейсмологии в Узбекистане. № 7. Материалы международной конференции: Современные проблемы сейсмологии, гидрогеологии и инженерной геологии (посвященной 100-летию академика Г.А. Мавлянова). ИС АН РУз Ташкент, 2010. С. 249–254.
7. Ребецкий Ю.Л., Погорелов В.В., Мягков Д.С., Ермаков В.А. О генезисе напряжений в коре островной дуги по результатам численного моделирования // Вестник КРАУНЦ. 2018. № 3. С. 54–73.
8. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупко-пластичных материалов // Физ. мезомех. 2005. Т. 8. № 3. С. 1290142.
9. Уилкинс М.Л. Расчёт упруго-пластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. 1967. М.: Мир. С. 212–263.