

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.8.014

<http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2017-40-4-42-56>

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНАХ НАКЛОННЫХ РАЗЛОМОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

© Р.М. Лобацкая<sup>а</sup>, И.П. Стрельченко<sup>б</sup>, Е.С. Долгих<sup>с</sup>

<sup>а-с</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ.** Цель. Одной из важных прикладных задач геологии является оценка изменений в областях динамического влияния разломов, которая, как известно, существенно отличается по структурно-вещественным характеристикам в висячих и лежащих крыльях разломов. Логично предположить асимметрию распределения напряженного состояния в зонах динамического влияния разломов и попытаться оценить ее количественно математическим моделированием методом конечных элементов. **Методы.** Построена трехмерная модель напряженного состояния среды, осложненная наклонной несквозной трещиной, имитирующей зону динамического влияния разлома. Использован метод конечно-элементного моделирования (программа ANSYS). При изменении длины разлома, угла наклона плоскости его сместителя, вещественного состава пород крыльев разлома, прилагаемых внешних нагрузок анализируются и количественно оцениваются зависимости ширины зоны аномального напряженного состояния от перечисленных параметров. **Результаты.** Моделирование напряженного состояния в областях динамического влияния наклонных разломов позволило установить, что ширина зоны аномального напряженного состояния в висячем крыле увеличивается с уменьшением угла наклона плоскости сместителя, а в лежащем остается практически неизменной. В то же время длина моделируемого разлома и характер внешних нагрузок оказывают влияние только на абсолютные значения максимумов напряжений, а на их асимметричном распределении по отношению к плоскости сместителя практически не сказываются. **Выводы.** Наиболее важным результатом моделирования является то, что при равных условиях нагружения и длины рассматриваемой трещины отношение ширины зон аномального напряженного состояния висячего крыла к лежащему обратно пропорционально углу наклона плоскости ее сместителя. Асимметричное распределение аномального напряженного состояния в зоне наклонной трещины, зависящее от угла наклона плоскости ее сместителя, дает повод пересмотреть при решении прикладных задач геологии ранее установленные количественные зависимости, в которых ширина зоны динамического влияния разломов условно принималась как симметричная.  
*Ключевые слова:* геоинформационное моделирование, САЕ-система, программа ANSYS, тектонофизическая задача, напряжения, разлом, асимметрия крыльев.

**Формат цитирования:** Лобацкая Р.М., Стрельченко И.П., Долгих Е.С. Математическое моделирование напряженного состояния в зонах наклонных разломов методом конечных элементов // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 4. С. 42–56. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-42-56

---

<sup>а</sup>Лобацкая Раиса Моисеевна, доктор геолого-минералогических наук, профессор, зав. кафедрой геммологии, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Raisa M. Lobatskaya, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Gemology, e-mail: lobatskaya@gmail.com

<sup>б</sup>Стрельченко Ирина Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, геофизик 1 категории, e-mail: ipstrel@gmail.com

Irina P. Strelchenko, Candidate of Geology and Mineralogy, 1<sup>st</sup> Category Geophysicist, e-mail: ipstrel@gmail.com

<sup>с</sup>Долгих Евгений Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, e-mail: dolgih.evgeny@yandex.ru

Evgeny S. Dolgikh, Candidate of technical sciences, Associate Professor, e-mail: dolgih.evgeny@yandex.ru

## MATHEMATICAL MODELING OF STRESS STATE IN INCLINED FAULT ZONES BY FINITE ELEMENT METHOD

R.M. Lobatskaya, I.P. Strelchenko, E.S. Dolgikh

Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. Purpose.** The structural and physical characteristics of the damage zone of faults are different in hanging and foot walls, therefore the estimation of changes in these areas is one of the key tasks of applied geology. It is logical to assume that there is the asymmetry of stress distribution in the damage zones of faults, for that reason the purpose of research is an attempt of asymmetry quantitative assessment through the mathematical simulation based on the finite-element method. **Methods.** Stresses in the block around a dipping fracture simulating a damage zone of a fault are reconstructed by ANSYS finite-element modeling. The width of the fault damage zone is analyzed and estimated quantitatively under varying fault lengths, different plane dipping angles, material composition of hanging and foot wall rocks, applied external loads (compression and shear). **Results.** Simulation of the stress state in the area of inclined fault damage has shown that as the dip angle decreases, the high-stress zone becomes wider in the hanging wall but its width changes negligibly in the foot wall. The length of the simulated fault and the nature of external loads affect only the magnitudes of maximum stresses, which remain asymmetrical relative to the fracture plane. **Conclusions.** The most important simulation result is as follows: the  $L_h/L_f$  ratio, where  $L_h$  and  $L_f$  are the widths of the high-stress zones in the hanging and foot walls of the fracture, respectively, is inversely proportional to the fracture plane dip under equal loading. The revealed distribution asymmetry of high stresses in the inclined fault zone strongly dependent on the fault plane dipping angle induces reconsideration of numerical dependences established earlier (which presumed the symmetry of the fault damage zone width) when solving applied geological problems.

*Keywords:* GIS-simulation, CAE-system, ANSYS, the problem of tectonophysics, stress, fault, wall asymmetry

**For citation:** Lobatskaya R.M., Strelchenko I.P., Dolgikh E.S. Mathematical modeling of stress state in inclined fault zones by finite element method. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2017, vol. 40, no. 4, pp. 42–56. (In Russian). DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-42-56

### Введение

Хорошо известно, что решение большого числа прикладных задач геологии невозможно без данных о структурно-тектоническом строении любого региона в целом и без анализа разломных зон в частности. Различным аспектам, связанным со спецификой структурной организации разломов, посвящено большое количество исследований [1–5 и др.]. Далеко не последнюю роль среди них играют работы, связанные с объемным моделированием разломов и разломно-блоковых структур, дающие существенное увеличение объемов информации в связи с решением конкретных прикладных задач сейсмогеологии, устойчивости геологической среды, инженерной геологии, гидрогеологии, рудной и нефтяной геологии [3, 6–8 и др.].

Обычно при моделировании разломных структур, несмотря на разнообразие

решаемых с его помощью задач и применяемых для этого методов, за пределами внимания исследователей остается такой важный параметр, как наклон плоскости сместителя. Этим параметром обычно пренебрегают, считая его несущественным, и полагают вполне приемлемым допущение о близвертикальном положении плоскости сместителя, прежде всего у сбросов и сдвигов.

В то же время общеизвестны полевые данные о том, что структурно-вещественная характеристика висячих и лежачих крыльев разломов различного генетического и кинематического типа может в подавляющем большинстве случаев принципиально отличаться. Эти отличия нередко в значительной степени обусловлены разным напряженно-деформированным состоянием геологической среды, возникающим в процессе формирования разлома. Максимально кон-

трастное строение имеют крылья пологих надвиговых и шарьяжных структур, существенно влияющее на распределение сопутствующих разломообразованию процессов, но не являются исключением сдвиги, сбросы и взбросы, что свидетельствует о важности учета наклона плоскости сместителя при моделировании разломных структур, прежде всего при решении прикладных задач. Методические возможности объемного моделирования разломов с учетом угла наклона плоскости сместителя были показаны авторами ранее [9].

Для обоснования необходимости учета углов падения плоскостей сместителей разломов могут быть использованы программы конечно-элементного моделирования (CAE-системы), реализующие методы численного математического моделирования и предлагающие инструментарий для изучения неоднородных геологических сред со сложной геометрией при больших деформациях [10–12].

В представленной работе обсуждаются результаты исследования, направленного на выявление распределения напряжений в противоположных крыльях разломов и реализованного методом 3D-моделирования с использованием CAE-системы ANSYS.

#### Материал и методы исследования

Моделирование напряженного состояния среды с наклонной трещиной является тектонофизической задачей. Решением тектонофизических задач, связанных с разрывными нарушениями, в течение многих лет начиная с М.В. Гзовского (1954) и В.Н. Даниловича (1961) вплотную занимаются коллективы лабораторий тектонофизики ИЗК СО РАН и ИФЗ РАН [2, 6, 10, 13]. В процессе тектонофизических исследований в зависимости от конкретной ориентации объекта исследований используется несколько концепций. Обобщенно это либо описа-

ние разлома как зоны скалывания бесконечной длины, отвечающей натурным данным, экспериментам и механической модели, задаваемой протяженной зоной конечной ширины, деформируемой за счет движения жестких блоков в разных условиях нагружения [2 и др.], либо описание разрыва как трещины скола конечной длины, основанного на анализе натуральных данных, теоретических расчетов и экспериментов [13 и др.].

Задача данного исследования требовала рассмотрения разлома как объемного тела конечной длины и ширины, характеризующегося аномальным по сравнению с сопредельным пространством напряженно-деформированным состоянием. Такого рода аномальный объем земной коры, связанный с формированием разлома и движениями по нему, именуется зоной (Р.М. Лобацкая) или областью (С.И. Шерман) динамического влияния разлома. Пренебрегая объемным строением, представим разлом в виде плоскости. Тогда в геометрическом аспекте решение этой задачи сводится к созданию наклонной поверхности разрушения конечной длины и ширины, окруженной конечным трехмерным объемом, в котором в результате смещения крыльев разрыва возникает неоднородное локальное напряженно-деформированное состояние [9].

Напряженное состояние в висячих и лежащих крыльях разлома исследовалось посредством построения объемной модели с наклонной трещиной в условиях переменных нагрузок и параметров трещины. Подобие единичной трещины и разлома базировалось на представлениях об автомодельности [14] или фрактальности физических систем в разных масштабах, обоснованных в ряде работ о подобии разрывных нарушений от мелких природных трещин в однородных по составу горных породах до крупных разломных зон в разнородных геологических

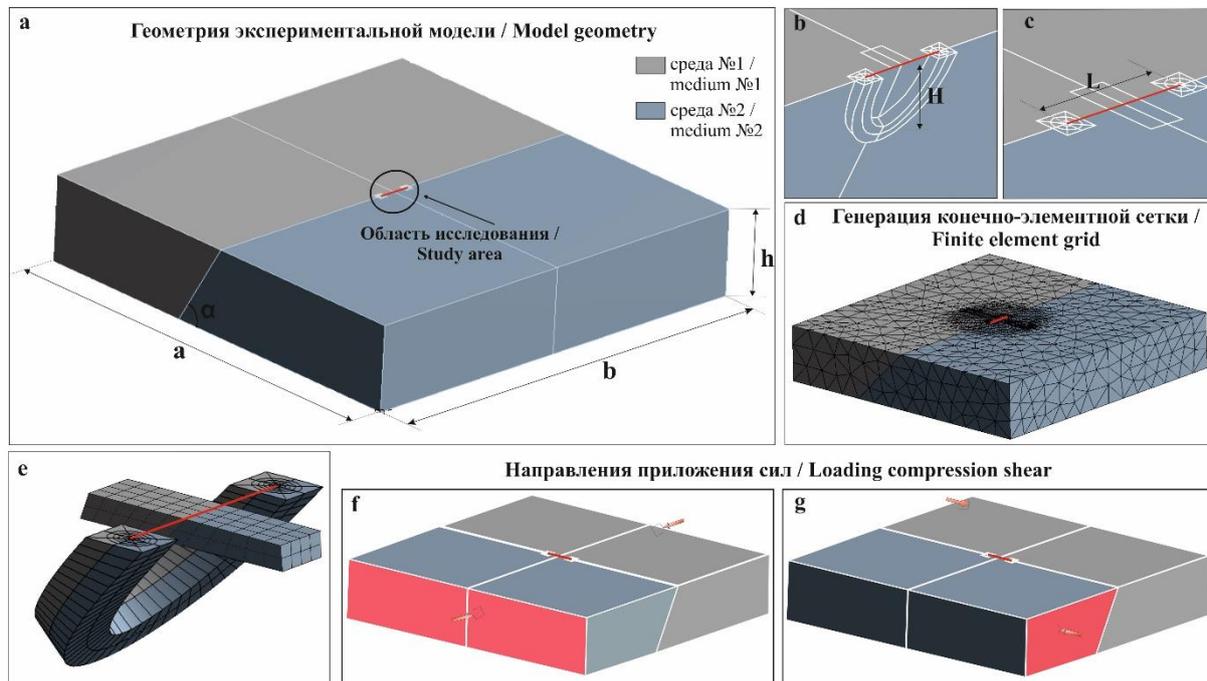
средах [1, 2]. Проведенные ранее исследования позволили доказать, что различный энергетический потенциал формирования разломов и трещин отражается в масштабе проявления тех и других, но почти не сказывается на их структурной организации согласно фрактальной природе процессов разрушения.

Моделирование осуществлялось на примере единичной наклонной трещины конечной длины и ширины, окруженной конечным объемом, в котором в результате смещения вдоль плоскости трещины изменяется локальное напряженно-деформированное состояние среды в ее крыльях. При анализе результатов оценивался только характер напряжений, деформации во внимание не принимались.

При моделировании среды с наклонной трещиной, имитирующей разлом, авторами последовательно выпол-

нены следующие процедуры: а) построение геометрии трехмерной модели наклонного разлома; б) задание механических свойств элементам модели; в) генерирование конечно-элементной сетки; г) задание параметров симуляции; д) выполнение результирующих расчетов. Основные этапы подготовки модели отражены на рис. 1.

Работа в программе ANSYS по расчету поля напряжений в среде с наклонной трещиной проводилась при варьировании условиями моделирования. Изменялись: 1) внешняя нагрузка (сжатие, сдвиг), а следовательно, в сочетании с углом наклона плоскости сместителя кинематический тип моделируемых разломов; 2) угол наклона плоскости сместителя ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ ); 3) длина моделируемого разлома (10, 15, 20, 50 км); 4) вещественный состав пород на крыльях.



**Рис. 1. Основные этапы подготовки модели, имитирующей среду с наклонной трещиной:**

*a, b, c – построение геометрии экспериментальной модели;*

*d, e – генерация конечно-элементной сетки; f, g – направления приложения сил*

**Fig. 1. Main preparation stages of the model simulating a medium with an inclined fault:**

*a, b, c – model geometry creation; d, e – finite element grid configuration;*

*f, g – loading compression shear*

В описание модели были заложены следующие ограничения: 1) линейные параметры задавались в километрах; 2) наличие неоднородностей, обычно имеющих место в геологической среде, не учитывалось; 3) форма плоскости трещины на глубину принята как полуэллиптическая, приближенная к природной; 4) геометрия модели представлена параллелепипедом с несквозной центральной полуэллиптической трещиной, лежащей на границе раздела двух сред с разными вещественным составом (см. рис. 1, а); 5) постоянные параметры модели: длина  $a$ , ширина  $b$  и высота  $h$  параллелепипеда, имитирующего геологическую среду; 6) переменные параметры модели: длина трещины  $L$ , ее глубина  $H$ , угол наклона плоскости сместителя  $\alpha$ , позволяющие рассмотреть несколько вариантов моделирования; 7) рассматривалась упругая модель, а свойства моделируемых горных пород (гнейс, гранит, мрамор) задавались через модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

При моделировании в расчет принимался контакт таких сред, как диоритовый гнейс (модуль Юнга  $0,68 \times 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона – 0,08), крупнозернистый гранит (модуль Юнга  $0,568 \times 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона – 0,198) и мрамор (модуль Юнга  $0,55 \times 10^{11}$  Па; коэффициент Пуассона – 0,27), для которых усредненные значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона приняты согласно справочнику физических констант горных пород С.П. Кларка [15].

Математическим представлением геометрии модели является конечно-элементная сетка (КЭ-сетка), выраженная в разбиении подобластей модели на конечные элементы (см. рис. 1, d, e), а точность расчетов определяется ее плотностью и формой элементов. Сетка на объемных телах создается с помощью тетраэдрических или гексаэдрических элементов. Для получения более точных результатов в ANSYS обычно рекомендуется

генерировать КЭ-сеть из гексаэдрических элементов с оптимальной плотностью, поскольку низкая плотность сетки снижает точность расчетов, а увеличение плотности может привести к существенному увеличению времени расчетов.

В ANSYS возможно соединять в одной модели несколько разнородных элементов, поэтому для повышения точности расчетов без особого увеличения времени на их реализацию автоматически была построена фоновая тетраэдрическая сетка высокой плотности (см. рис. 1, d), на которой затем была генерирована гексаэдрическая КЭ-сеть непосредственно для области динамического влияния трещины (см. рис. 1, e).

Задание параметров моделирования и подготовка модели к вычислению связаны с «закреплением» границ модели и определением характера внешней нагрузки. Закрепление границ модели в ANSYS подразумевает ограничение перемещений и вращений в структурном анализе. Так как модель представляет некий блок (участок) земной коры, то были заданы условия скольжения этого блока по мантийному веществу. Этот этап конечно-элементного анализа выполняется в модуле симуляции.

Под нагрузкой в ANSYS понимается воздействие на модель сосредоточенных или распределенных внешних сил. Хорошо известно, что численное исследование процессов деформации геологических сред затрудняется множеством неоднородностей, к которым относится неоднородность моделируемой среды, ее геометрия, механические характеристики, условия нагружения. Все эти параметры обычно принимаются усреднено и с большой погрешностью.

Несмотря на то, что в работе не обсуждаются условия и причины формирования заданных условий нагружения, полученные результаты показали, что используемые значения и направленность внешних сил достаточны для выявления

общих закономерностей изменения напряженного состояния в области динамического влияния моделируемого разлома. При моделировании поочередно имитировались условия сжатия и сдвига, а нагрузки прикладывались на разные грани модели (см. рис. 1, *f, g*).

Определение и построение геометрии модели и задание параметров для моделирования напряженно-деформированного состояния в области наклонной трещины позволило перейти к выполнению расчетов и их последующему анализу.

#### **Моделирование напряженного состояния среды в зоне наклонной трещины при сжатии и сдвиге**

Первым шагом моделирования напряженного состояния геологической среды в зоне наклонной трещины является решение системы уравнений методом конечных элементов на базе описанных выше постоянных и переменных параметров. Поочередно исследовалось распределение напряжений в зоне динамического влияния трещины, имитирующей разлом, в условиях сжатия и сдвига. Данные в том и другом случае анализировались вначале в приповерхностной части модели вкрест простирания трещины, а затем на глубину.

В приповерхностной части данные снимались вдоль предварительно построенной «линии взятия проб», представляющей собой перпендикуляр, пересекающий всю зону динамического влияния трещины и проведенный в горизонтальной плоскости через ее центр (см. рис. 1, *e*).

При анализе напряженного состояния на глубину анализировались значения коэффициентов интенсивности напряжений  $K_{1-3}$ , распределенных вдоль нижней кромки плоскости разлома, имеющей, как указывалось выше, полуэллиптическую форму.

Как уже упоминалось выше, геометрия модели построена таким образом,

что трещина проходит по границе двух сред. Для полного анализа рассматривались среды с близким и различным составом: гнейс – гранит и мрамор – гранит.

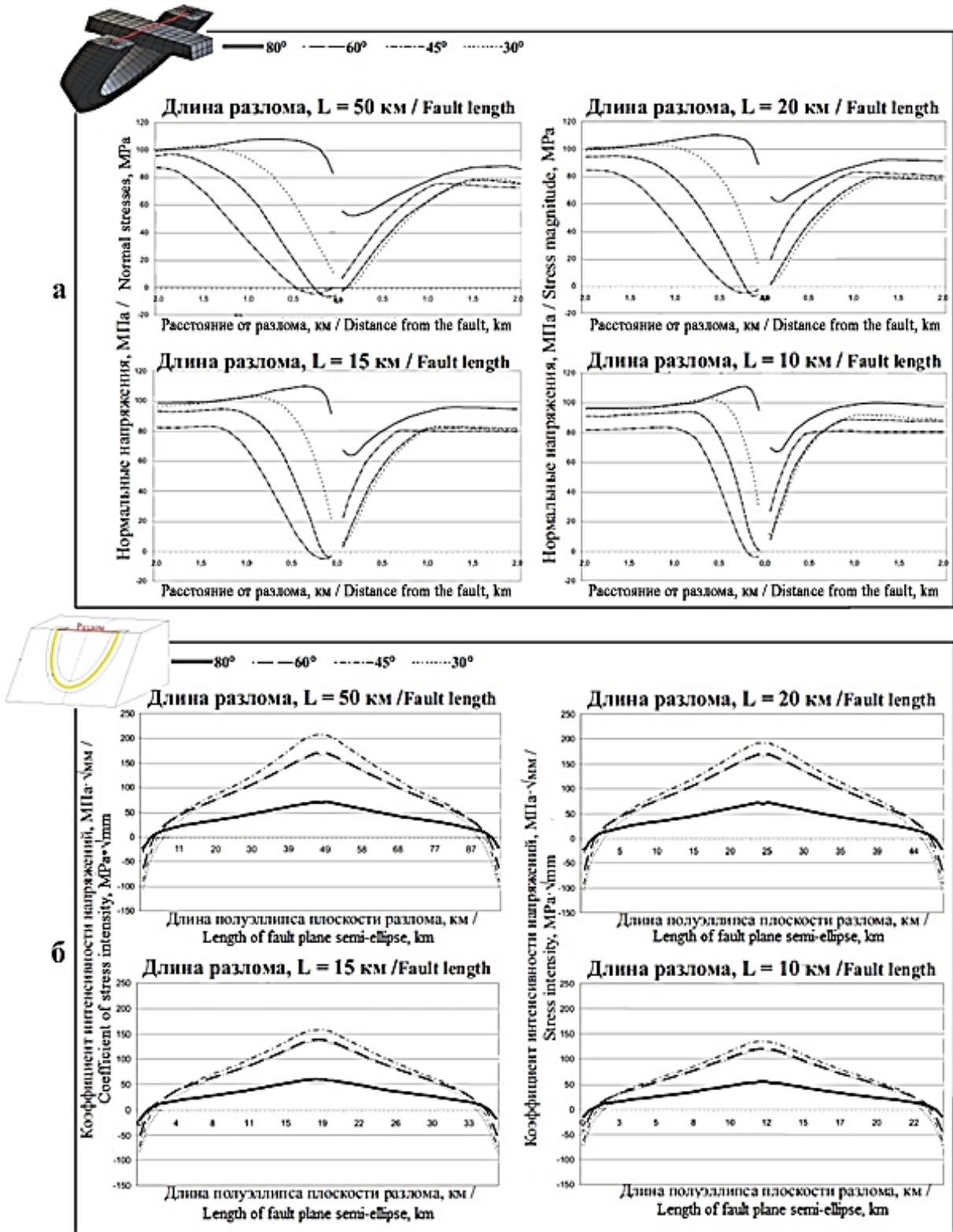
В результате моделирования существенных различий в закономерностях напряженного состояния в обоих случаях не выявлено. Имеет место лишь незначительная разница в величинах напряженно-деформированного состояния среды. Поэтому далее обсуждаются результаты моделирования среды гнейс – гранит.

Обратимся прежде всего к результатам моделирования напряженно-деформированного состояния среды в зоне наклонной трещины при сжатии. При анализе состояния среды в приповерхностной части трещины нагрузка на модель прилагалась перпендикулярно плоскости ее сместителя (см. рис. 1, *f*), а относительные значения напряжений снимались вкрест зоны динамического влияния вдоль линии взятия проб (см. рис. 1, *e*), перпендикулярной трещине, имитирующей разлом длиной от 50 до 10 км (рис. 2, *a*).

Графики на рис. 2, *a* отражают несколько отчетливо проявленных закономерностей. Главной из них является устойчивая асимметрия в распределении напряжений в противоположных крыльях трещины.

Асимметричный характер напряженного состояния в зоне динамического влияния трещины, имитирующей разлом, проявляется в распределении максимальных значений интенсивности напряжений в противоположных крыльях. При прочих равных условиях, таких как длина моделируемого разлома и угол падения плоскости сместителя (морфокинематический тип), висячем крыле максимальное значение нормальных напряжений всегда выше, чем в лежащем.

Асимметричное расположение максимумов напряжений не зависит от длины моделируемого разлома



**Рис. 2. Напряженное состояние в зоне наклонной трещины при сжимающих нагрузках:**  
 а – значения нормальных напряжений; б – значения коэффициентов интенсивности напряжений  
**Fig. 2. Stresses in the inclined fault zone in response to compression:**  
 а – normal stress values; б – stress coefficient values

(см. рис. 2, а). Тем не менее при уменьшении длины трещины значения максимумов интенсивности напряжений в висячем крыле практически не изменяются, а в лежащем крыле немного возрастают.

Анализ полученных при моделировании значений нормальных напряжений показал, что они существенно зависят от угла падения плоскости сместителя. Так, в условиях одинаковой нагрузки при равной длине моделируемого разлома, но при разных углах падения плоскости сместителя значения максимумов нормальных напряжений варьируют: чем круче угол падения трещины, тем выше их относительные значения как в висячем, так и в лежащем крыле.

При этом максимумы интенсивности напряжений существенно меняют местоположение по отношению к трещине в пределах зоны ее динамического влияния. При сжимающих нагрузках наклон плоскости сместителя, как известно, хорошо координируется с морфокинематическим типом моделируемого разлома от крутопадающего взброса ( $80-60^\circ$ ) до пологого надвига или шарьяжа ( $45-30^\circ$ ). Чем положе угол падения плоскости сместителя, тем дальше от трещины максимум интенсивности напряжений в висячем крыле и тем ближе к ней в лежащем. Относительно симметричное положение максимумов интенсивности напряжений обретают только при моделировании пологих структур типа шарьяжа ( $30^\circ$ ). Расстояние между максимальными значениями интенсивности напряжений также изменяется: при крутых углах наклона ( $80^\circ$ ) оно минимально, при пологих ( $30^\circ$ ) – максимально.

Для моделирования и анализа напряженного состояния вокруг трещины на глубину снимались значения коэффициентов интенсивности напряжений. Снятие значений осуществлялось уже не вкрест, как в предыдущем случае, а вдоль падения плоскости сместителя по всей длине линии полуэллипса, условно

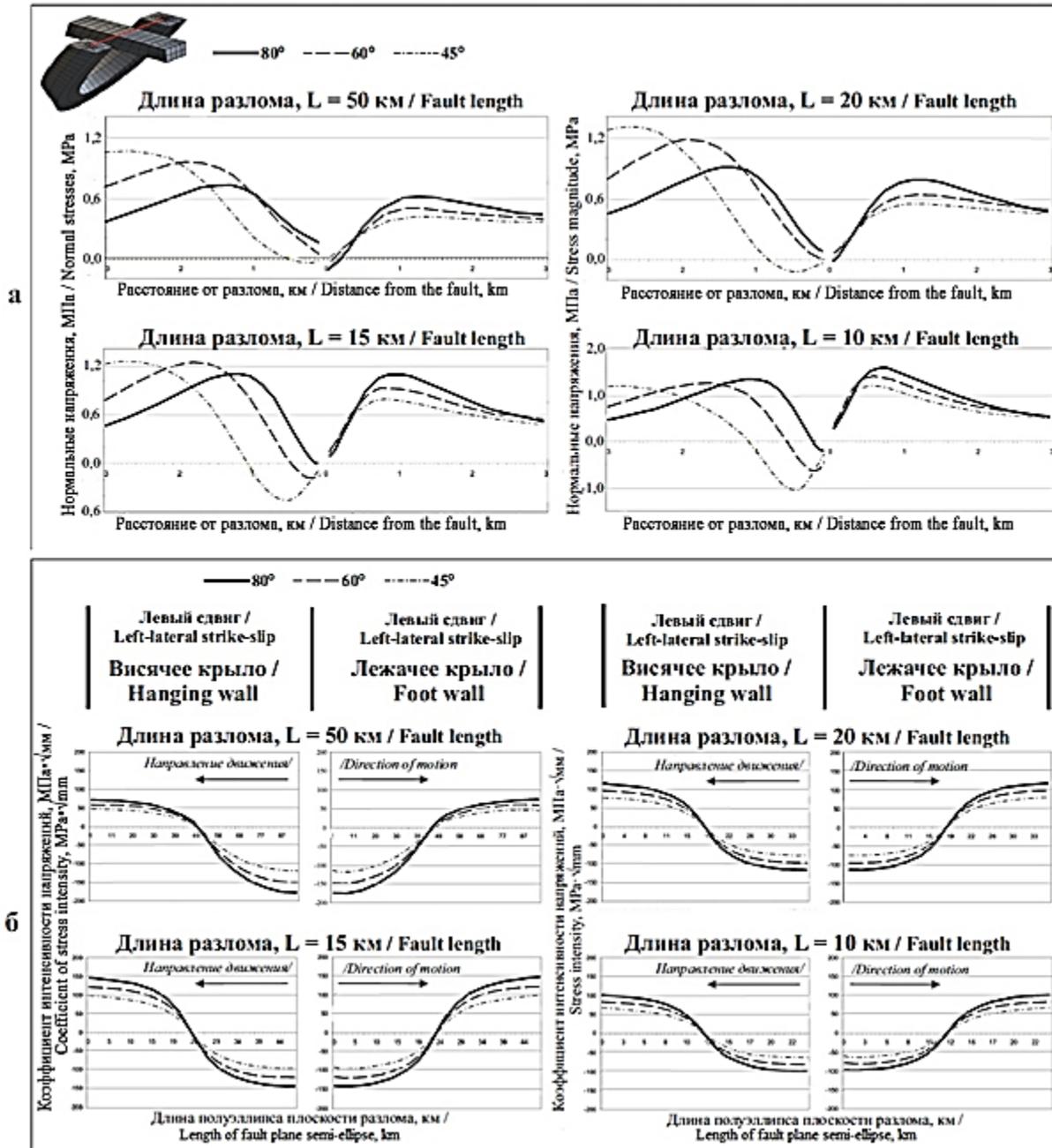
ограничивающей эту плоскость (см. рис. 2, б).

При трехмерном моделировании программа автоматически рассчитывает три типа коэффициентов интенсивности для моделей трещин:  $K_I$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{III}$ , в соответствии с типом нагружения и деформации. Анализ напряжений вокруг трещины в условиях сжатия проводился по значениям коэффициента  $K_{II}$ , который характеризует обратно симметричное нагружение относительно линии трещины и деформацию, происходящую поперек фронта трещины (см. рис. 2, б).

При анализе напряженного состояния вокруг трещины в условиях сжатия выявилось несколько закономерностей. В первую очередь было установлено, что максимальные значения коэффициентов интенсивности напряжения (КИН) относятся к наиболее глубоким, центральным частям полуэллипса плоскости сместителя трещины, минимальные приходятся на его приповерхностные области. Кроме того, максимальные значения КИН в условиях сжатия наблюдаются для трещин с крутыми углами наклона плоскостей сместителей, в то время как графики значений КИН для разрывных нарушений с углами падения менее  $60^\circ$  близки.

При моделировании стабильно наблюдалось пропорциональное уменьшение значений КИН с уменьшением длины трещины – общеизвестная в механике разрушения зависимость, что косвенно подтверждает достоверность полученных результатов.

Моделирование напряженного состояния среды в зоне наклонной трещины при сдвиге проводилось в условиях нагрузок, ориентированных параллельно плоскости ее сместителя (см. рис. 1, г). При анализе приповерхностной части значения снимались вкрест простирания (рис. 3, а), а при анализе напряженного состояния на глубину, как и в случае сжатия, – вдоль линии полуэллипса плоскости трещины (рис. 3, б).



**Рис. 3. Напряженное состояние в зоне наклонной трещины при сдвигающих нагрузках:**  
 а – значения нормальных напряжений; б – значения коэффициентов интенсивности напряжений  
**Fig. 3. Stresses in the inclined fault zone in response to shear:**  
 а – normal stress values; б – stress coefficient values

Анализ полученных графиков показал, что при крутом угле падения трещины (80°) наблюдается относительная симметрия как в максимальных значениях напряженно-деформированного поля в разных крыльях, так и при удалении от места разрыва. В то же время при уменьшении угла падения трещины

вначале до 60°, затем до 45° появляется асимметрия: в висячем крыле максимумы значений напряжений отдаляются от трещины, а их абсолютные значения увеличиваются; одновременно в лежащем крыле максимумы приближаются к трещине, а их абсолютные значения также возрастают.

В целом при сдвигах максимальные значения напряжений в висячем крыле трещины увеличивались по мере уменьшения длины и угла ее падения, в то время как в лежащем при этих же условиях значения напряжений уменьшались. Моделирование в условиях сдвига вновь показало, что изменение угла наклона трещины существенно влияет на распределение напряжений, следовательно, это обстоятельство необходимо учитывать при анализе зон динамического влияния реальных разломных структур.

Исследуя реальные сдвиги, следует принять во внимание и результаты моделирования напряженного состояния среды в зоне наклонной трещины на глубину. В отличие от случая исследования КИН при сжатии, где существенная роль отводилась значениям  $K_{II}$ , при сдвиге рассматривались значения коэффициента  $K_{III}$ , характеризующего напряжения вдоль фронта трещины (см. рис. 3, б). При этом оказалось, что в направлении движения блока возникают максимумы коэффициентов интенсивности напряжений в обоих крыльях трещины независимо от длины и угла ее наклона.

Таким образом, главным результатом моделирования разрывных нарушений в программе ANSYS является выявление не только зависимости характера напряженного состояния в зоне наклонной трещины от изменений угла наклона, но и установление ряда принципиальных отличий в распределении и характере напряжений в зависимости от типа деформирования модели. В условиях сжатия мы получили одну картину (см. рис. 2, а, б), в условиях сдвига – другую (см. рис. 3, а, б). Этот результат, несомненно, чрезвычайно важен в практическом аспекте.

### Результаты

Результаты моделирования дали основание для анализа некоторых количественных параметров, характеризующих распределение напряжений вокруг

трещины в ее приповерхностной части, таких как максимальные значения напряжений и их расстояние от плоскости трещины, а также ширина зон аномального напряженного состояния в зависимости от длины трещины и характера приложения нагрузок. Результаты моделирования отражены на рис. 4.

Установлено, что при равной длине трещин удаленность максимумов напряжений от их плоскостей неодинакова в висячих и лежащих крыльях. Эта закономерность обеспечивает устойчивую асимметрию зон наклонных трещин. Так, в висячих крыльях при нагрузках как сжатия, так и сдвига расстояние от максимумов напряжений до плоскости сместителя пропорционально возрастает с уменьшением угла наклона трещины. Дальше всего максимумы напряжений отстоят от трещины, имеющей угол падения  $30^\circ$ , ближе всего располагаются к плоскостям субвертикальных трещин с углами около  $80^\circ$  (см. рис. 4, а).

Если рассматривать абсолютные значения максимумов напряжений при равных длинах трещин, то в условиях сжатия они пропорциональны углу наклона: чем круче угол, тем выше значения напряжений в обоих крыльях. В условиях сдвига закономерность иная: в висячих крыльях наиболее высокие значения максимумов напряжений характерны для пологих трещин, в лежащих, напротив, для трещин с крутыми плоскостями сместителей (см. рис. 4, б).

Для получения обобщенных данных о характере асимметрии зон наклонных трещин было рассчитано отношение расстояний от плоскости трещины до максимумов напряжений висячего крыла  $L_u$  к лежащему  $L_l$ , а также количественные соотношения ширины зоны аномального напряженного состояния в крыльях наклонной трещины  $L_a$  как среднее арифметическое для разных углов падения плоскости сместителя. Результаты расчетов приведены в таблице.

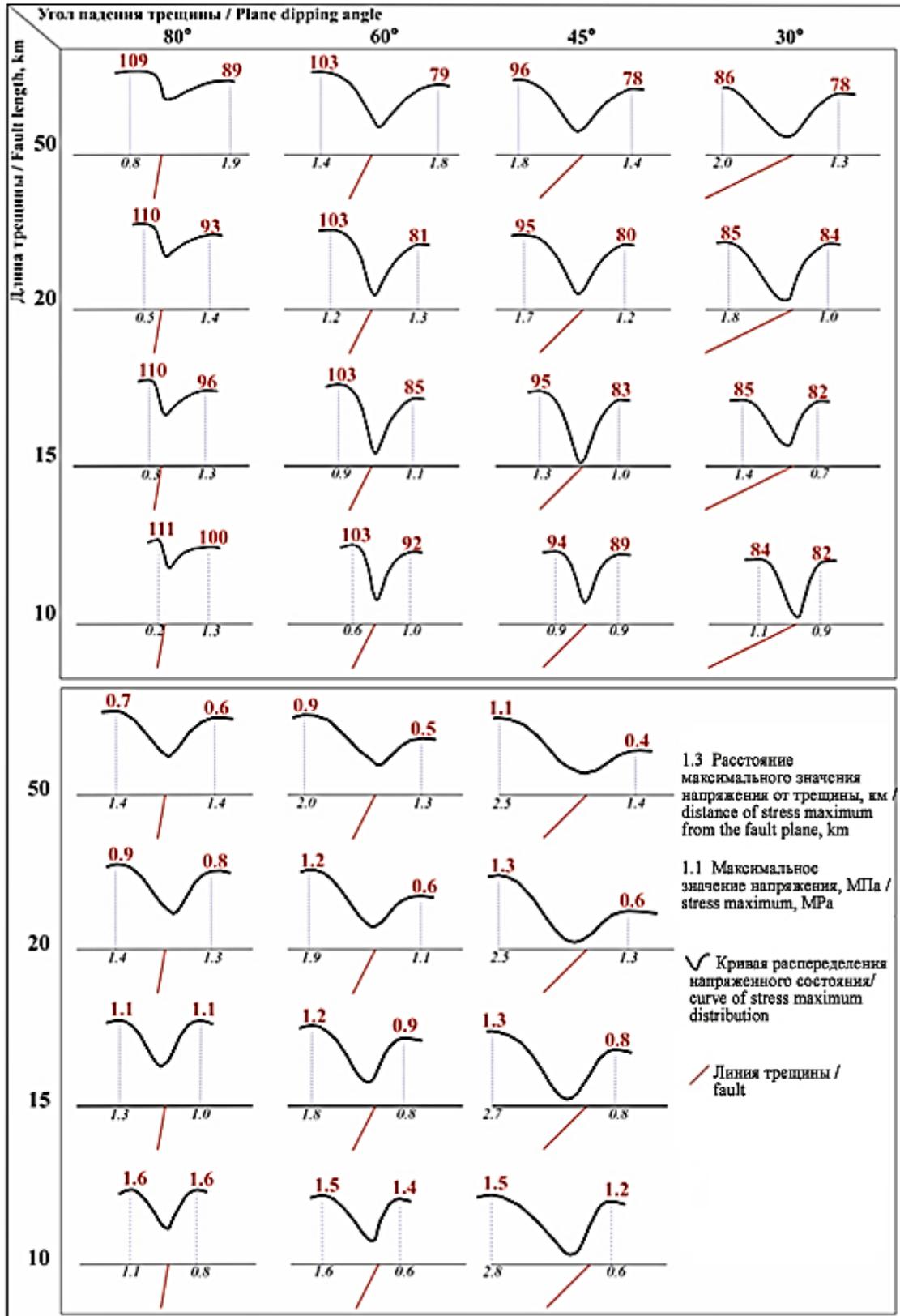


Рис. 4. Показатели максимальных значений напряженного состояния в зоне наклонной трещины при изменении ее длины и угла наклона в условиях сдвига (а), сжатия (б)  
 Fig. 4. Magnitudes of maximum stresses in the inclined fault zone under shear (a), compression (б) for different fault lengths and dips

**Количественные соотношения ширины зоны аномального напряженного состояния висячего крыла наклонной трещины к лежащему**  
**The  $L_h/L_f$  ratio, where  $L_h$  and  $L_f$  are the widths of high-stress zones**  
**in the hanging and foot walls of the inclined fault**

Угол падения плоскости сместителя трещины, град. / Fault plane dipping angle, degree	Отношение ширины зоны аномального напряженного состояния висячего крыла $L_h$ к лежащему $L_f$ при длине трещины, км / The $L_h/L_f$ ratio at the fault length, km				
	50	20	15	10	Среднее арифметическое значение / Arithmetical mean
Моделирование в условиях сжатия / Compression load modeling					
80	0,4	0,38	0,23	0,15	0,3
60	0,98	0,82	0,8	0,6	0,83
45	1,56	1,42	1,3	1,0	1,32
30	1,98	1,8	1,5	1,4	1,67
Моделирование в условиях сдвига / Shear load modeling					
80	1,0	1,08	1,3	1,4	1,45
60	1,56	1,42	1,3	1,0	1,32
45	1,79	1,92	3,38	4,67	2,94

Из таблицы видно, что при равных условиях нагружения и длине рассматриваемой трещины отношение ширины зон аномального напряженного состояния висячего крыла к лежащему обратно пропорционально углу наклона плоскости ее сместителя. Средние значения при сжимающих нагрузках меняются от 0,3 при крутых углах падения плоскости сместителя ( $80^\circ$ ) до 1,67 при пологих ( $30^\circ$ ). При сдвиговых нагрузках тенденция сохраняется, хотя численные значения меняются и составляют от 1,45 при крутых углах падения плоскости сместителя, до 2,94 при пологих.

Установленные количественные соотношения ширины зоны аномальных напряжений в среде с наклонной трещиной для разных ее крыльев позволяют использовать их при объемном моделировании реальных структур и обоснованно подходить к оценке ширины противоположных крыльев зон динамического

влияния разломов, необходимой при решении ряда практических задач сейсмомикрорайонирования, инженерной геологии, гидрогеологии, геотектоники.

**Заключение**

Моделирование напряженного состояния в областях динамического влияния наклонных разломов показало его асимметричное распределение в висячем и лежащем крыльях. Выводы базируются на анализе распределения максимальных значений напряжений в крыльях и на их удаленности от плоскости сместителя в каждом из них. Установлено, что ширина зоны аномального напряженного состояния в висячем крыле увеличивается с уменьшением угла наклона плоскости сместителя, а в лежащем остается практически неизменной. В то же время длина моделируемого разлома и характер внешних нагрузок оказывают влияние только на абсолютные значения максимумов напряжений и практически не

сказываются на их асимметричном распределении по отношению к плоскости сместителя.

Наиболее важным результатом моделирования является вывод о том, что при равных условиях нагружения и длине рассматриваемой трещины отношение ширины зон аномального напряженного состояния всяческого крыла к лежащему обратно пропорционально углу наклона плоскости ее сместителя. Установлены значения количественных соотношений ширины зон аномальных напряжений при сжатии и сдвиге при разных углах наклона плоскости сместителя, которые составляют для условий сжатия от 0,3 при крутых углах падения плоскости сместителя (80°) до 1,67 при пологих (30°) и

для условий сдвига от 1,45 при крутых углах падения плоскости сместителя до 2,94 при пологих.

Факт установления асимметричного распределения аномального напряженного состояния в зоне наклонной трещины, зависящего напрямую от угла наклона плоскости ее сместителя, дает повод пересмотреть ранее установленные количественные зависимости, в которых ширина зоны динамического влияния разломов условно принималась как симметричная [1, 2], и учитывать результаты исследования, изложенного в данной статье, при моделировании и анализе реальных разломных структур, особенно в случае решения прикладных задач геологии.

### Библиографический список

1. Лобацкая Р.М. Структурная зональность разломов. М.: Недра, 1987. 128 с.
2. Шерман С.И. Физические закономерности формирования разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 101 с.
3. Blenkinsop T.G. Relationships between faults, extension fractures and veins, and stress // *Journal of Structural Geology*. 2008. Vol. 30. Iss. 5. P. 622–632. DOI: 10.1016/j.jsg.2008.01.008
4. Faulkner D.R., Lewis A.C., Rutter E.H. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain // *Tectonophysics*. 2003. Vol. 367. Iss. 3-4. P. 235–251. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00134-3
5. Wibberley C.A.J., Yielding G., Di Toro G. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review // *Geological Society, London, Special Publications*. 2008. Vol. 299. Iss. 1. P. 5–33. DOI: 10.1144/SP299.2
6. Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Гео, 2014. 362 с.
7. Imber J., Holdsworth R.E., Smith S.A.F., Jefferies S.P., Collettini C. Frictional-viscous flow, seismicity and the geology of weak faults: a review and future directions // *Geological Society, London, Special Publications*. 2008. Vol. 299. Iss. 1. P. 151–173. DOI: 10.1144/SP299.10
8. Sepehr M., Gosgrove J. The role of major fault zones in controlling the geometry and spatial organization of structures in the Zagros Fold-Thrust Belt // *Geological Society London Special Publications*. 2007. Vol. 272 (1). P. 419–436. DOI: 10.1144/GSL.SP.2007.272.01.21
9. Lobatskaya R.M., Strelchenko I.P. GIS-based analysis of fault patterns in urban areas: A case study of Irkutsk city, Russia // *Geoscience Frontiers*. 2016. Vol. 7. Iss. 2. P. 558–574. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.004
10. Михайлова А.В., Ребецкий Ю.Л. Математическое моделирование тектонических структур. Конечно-элементные численные комплексы NASTRAN и U-WAY // *Проблемы тектонофизики. К сорокалетию создания*

М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: Изд-во ИФЗ, 2008. С. 37–68.

11. Liu M., Yang Y. Extensional collapse of the Tibetan plateau: Results of three-dimensional finite element modeling // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. Vol. 108. № B8, 2361. Doi: 10.1029/2002JB002248

12. Xu N., Tian H., Kulatilake P.H., Duan Q. Building a three-dimensional sealed geological model to use in numerical stress analysis software: a case study for a dam site // *Computers and Geotechnics*. 2011. Vol. 38. P. 1022–1030.

13. Осокина Д.Н., Яковлев Ф.Л.,

Войтенко В.Н. Изучение тектонического разрыва как объекта, объединяющего мегатрещину, ее поля (напряжений, деформаций) и вторичные структуры (тектонофизический анализ) // *Тектонофизика сегодня* (к юбилею М.В. Гзовского). М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2002. С. 89–102.

14. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 256 с.

15. Справочник физических констант горных пород / ред. С.П. Кларк. М.: Мир, 1969. 544 с.

## References

1. Lobatskaya R.M. *Strukturnaya zonal'nost' razlomov* [Structural zoning of faults]. Moscow: Nedra Publ., 1987, 128 p.

2. Sherman S.I. *Fizicheskie zakonomernosti formirovaniya razlomov zemnoi kory* [Physical patterns of earth's crust faults formation]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1977, 101 p.

3. Blenkinsop T.G. Relationships between faults, extension fractures and veins, and stress. *Journal of Structural Geology*, 2008, vol. 30, issue 5, pp. 622–632. DOI: 10.1016/j.jsg.2008.01.008

4. Faulkner D.R., Lewis A.C., Rutter E.H. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain. *Tectonophysics*, 2003, vol. 367, iss. 3-4, p. 235–251. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00134-3

5. Wibberley C.A.J., Yielding G., Di Toro G. Recent advances in the understanding of fault zone internal structure: a review. *Geological Society, London, Special Publications*, 2008, vol. 299, iss. 1, pp. 5–33. DOI: 10.1144/SP299.2

6. Sherman S.I. *Seismicheskiy protsess i prognoz zemletryaseni: tektonofizicheskaya kontseptsiya* [Seismic

process and earthquake prediction: tectonophysical concept]. Novosibirsk: Geo Publ., 2014, 362 p.

7. Imber J., Holdsworth R.E., Smith S.A.F., Jefferies S.P., Collettini C. Frictional-viscous flow, seismicity and the geology of weak faults: a review and future directions. *Geological Society, London, Special Publications*, 2008, vol. 299, issue 1, pp. 151–173. DOI: 10.1144/SP299.10

8. Sepehr M., Gosgrove J. The role of major fault zones in controlling the geometry and spatial organization of structures in the Zagros Fold-Thrust Belt. *Geological Society London Special Publications*, 2007, vol. 272 (1), pp. 419–436. DOI: 10.1144/GSL.SP.2007.272.01.21

9. Lobatskaya R.M., Strelchenko I.P. GIS-based analysis of fault patterns in urban areas: A case study of Irkutsk city, Russia. *Geoscience Frontiers*, 2016, vol. 7, issue 2, pp. 558–574. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.004

10. Mikhailova A.V., Rebetskii Yu.L. Mathematical modeling of tectonic structures. Finite-element numerical complexes NASTRAN and U-WAY. *Problemy tektonofiziki. K sorokaletiyu sozdaniya M.V. Gzovskim laboratorii*

*tektonofiziki v IFZ RAN* [Problems of tectonophysics. On the 40th anniversary of the creation of Tectonophysics Laboratory at the Institute of Physical Chemistry RAS by M.V. Gzovsky]. Moscow: Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences Publ., 2008, pp. 37–68. (In Russian).

11. Liu M., Yang Y. Extensional collapse of the Tibetan plateau: Results of three-dimensional finite element modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, vol. 108, no. B8, 2361. Doi: 10.1029/2002JB002248

12. Xu N., Tian H., Kulatilake P.H., Duan Q. Building a three-dimensional sealed geological model to use in numerical stress analysis software: a case study for a dam site. *Computers and Geotechnics*, 2011, vol. 38, pp. 1022–1030.

13. Osokina D.N., Yakovlev F.L. Study of the tectonic fault as an object uniting a

megafissure, its fields (of stresses, deformations) and secondary structures (tectonophysical analysis). *Tektonofizika segodnya (k yubileyu M.V. Gzovskogo)* [Tectonophysics today (on the anniversary of M.V. Gzovsky)]. Moscow: Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences Publ., 2002, pp. 89–102. (In Russian).

14. Barenblatt G.I. *Podobie, avtomodel'nost', promezhutochnaya asimptotika. Teoriya i prilozheniya k geofizicheskoi gidrodinamike* [Similarity, self-similarity, intermediate asymptotics. Theory and applications to geophysical hydrodynamics]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1982, 256 p.

15. Klark S.P. *Spravochnik fizicheskikh konstant gornykh porod* [Reference book of physical constants of rocks]. Moscow: Mir Publ., 1969, 544 p.

#### Критерии авторства

Лобацкая Р.М., Стрельченко И.П., Долгих Е.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Статья поступила 30.10.2017 г.*

#### Authorship criteria

Lobatskaya R.M., Strelchenko I.P., Dolgikh E.S. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

*The article was received 30 September 2017*