

STRESS FIELD IN A SHEAR ZONE, AND FORMATION OF THE MAIN FAULT**A.S. Lermontova**  

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

ABSTRACT. Using the analytical approximation method, we calculated stress field parameters for cases with different relative positions of Riedel shears and loads required for shearing. Considering an internal friction angle of 30° , and the distance between adjacent shears exceeding 0.7 of the characteristic shear length, we estimated the Coulomb stress that can lead to fracturing. In the areas between the shears, it is below the shear strength value. This means that if an increase in the external load is lacking, there are no prerequisites for the formation of new fractures that may connect adjacent shears. If the shears are spaced closer to each other (i.e. at distances less than 0.7 of the shear length), the shear strength is exceeded in the areas between them, and new shears can occur there and connect the Riedel shears to each other. Therefore, in observations of a natural system of Riedel shears, it becomes possible to assess whether this system is sufficiently stable in its current status, or, in case of a critical increase in the Coulomb stress in the areas between adjacent shears, the equilibrium can be easily disturbed, and there is a possibility that the main fault forms in the strike-slip zone under study.

KEYWORDS: Coulomb stress; shear strength; second-order structures; system of subparallel shears; shear zone; secondary dislocations

FUNDING: The study was carried out under the state assignment of IPE RAS.

SHORT COMMUNICATION

Received: March 16, 2020

Revised: January 15, 2021

Accepted: January 21, 2021

Correspondence: Anastasia S. Lermontova, alermontova@mail.ru

FOR CITATION: Lermontova A.S., 2021. Stress field in a shear zone, and formation of the main fault. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 499–507. doi:10.5800/GT-2021-12-3-0536

ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВНУТРИ ЗОНЫ СДВИГА И ОБРАЗОВАНИЕ МАГИСТРАЛЬНОГО РАЗЛОМА

А.С. Лермонтова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. При помощи приближенного аналитического метода проведены расчеты параметров напряженного состояния массива для разных вариантов взаимного расположения сколов Риделя при нагрузке, необходимой для образования этих сколов. Результаты вычислений при значении угла внутреннего трения 30° показывают, что при расстоянии между соседними сколами, превышающем 0.7 характерной длины скола, кулоновское напряжение, отвечающее за разрушение материала, в промежутках между сколами оказывается ниже предела прочности. Это означает, что без увеличения внешней нагрузки отсутствуют предпосылки для образования новых нарушений, соединяющих соседние сколы. Если же сколы расположены ближе друг к другу, чем 0.7 длины скола, то на участках массива между ними превышен предел прочности. Соответственно, там должны возникнуть новые сколы, соединяющие сколы Риделя между собой. Таким образом, при наблюдении природной системы сколов Риделя появляется возможность оценить, является ли эта система достаточно устойчивой в ее текущем виде, или же, ввиду критического повышения кулоновского напряжения в участках массива между соседними сколами, равновесие может быть легко нарушено, и в изучаемой сдвиговой зоне образуется магистральный разлом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Кулоновское напряжение; предел прочности; структуры второго порядка; система субпараллельных сколов; сдвиговая зона; вторичные нарушения

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

В горных породах под действием сдвиговых нагрузок формируется сдвиговая зона – относительно узкая полоса материала, в которой происходят основные деформации. Поскольку в большинстве случаев сдвиговые зоны образуются в регулярном поле напряжений, они прямолинейны и ориентированы параллельно направлению максимального касательного напряжения, т.е. под углом 45° к осям главных нормальных напряжений σ_1 и σ_3 (примем σ_3 за ось максимального сжатия, $\sigma_3 < 0$). Сдвиговая зона проявляется в виде характерных структур меньшего масштабного уровня, «структур второго порядка» [Stoyanov, 1977; Gintov, 2005].

Следует заметить, что термин «сдвиг» можно понимать как в «механическом» смысле, противопоставляя его отрывному нарушению, так и в более узком геологическом, отличая его от сбросов, надвигов и шарьяжей. В настоящей работе подразумевается сдвиг в механическом значении, поскольку перераспределение напряжений, вызванное смещением примыкающих блоков вдоль их общей границы, не зависит от наличия в этом смещении вертикальной составляющей. Вычисления параметров напряженного состояния в дальнейшем проводятся в рамках плоской задачи теории упругости, в плоскости, перпендикулярной сместителю и параллельной направлению основного сдвига. Для удобства восприятия в дальнейшем без ограничения общности будем говорить о сдвигах с вертикальным сместителем, рассматриваемым в плане.

Принято различать следующие виды структур второго порядка: 1) *L*-сколы, параллельные направлению

основного сдвига в зоне; 2) *R*-сколы (сколы Риделя), ориентированные под углом $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ к направлению основного сдвига в зоне, при правом сдвиге с отклонением вправо от этого направления, а при левом – влево; 3) *R'*-сколы (сопряженные сколы Риделя), ориентированные под углом $\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$ к направлению основного сдвига в зоне, с отклонением в ту же сторону, что и *R*-сколы; 4) *P*-сколы, ориентированные под углом $\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}$ к направлению основного сдвига в зоне, при правом сдвиге с отклонением влево от этого направления, а при левом – вправо; 5) трещины отрыва *T*, ориентированные под углом $\frac{\pi}{4}$ к направлению основного сдвига в зоне, с отклонением в ту же сторону, что и *R*-сколы; 6) осевые линии складок *F*, ориентированные под углом $\frac{\pi}{4}$ к направлению основного сдвига в зоне, с отклонением в ту же сторону, что и *P*-сколы [Stoyanov, 1977].

Согласно экспериментальным данным, по мере развития сдвиговой зоны в условиях внешнего сжатия структуры возникают в следующем порядке [Tchalenko, 1968]: сначала почти одновременно появляются *R*-сколы и *R'*-сколы; затем *R*-сколы соединяются вновь возникающими *P*-сколами; наконец, преимущественно в результате некоторого разворота уже существовавших *R* и *P*-сколов формируются *L*-сколы в направлении основного сдвига. Последние в дальнейшем составляют магистральный разлом.

Сопряженные сколы *R'* перестают развиваться вскоре после возникновения. По-видимому, так происходит из-за неблагоприятного изменения соотношения нормальных и касательных напряжений на них по мере развития зоны сдвига [Rebetsky et al., 2008; Goncharov

et al., 2014]. Это наблюдение позволяет предположить, что смещения по R' -сколам в большинстве случаев невелики и их вклад в изменение напряженного состояния незначителен. Их влияние остается за рамками настоящей работы.

Замечателен тот факт, что описанная последовательность развития зоны сдвига «сколы Риделя – P -сколы – L -сколы» встречается практически на любом масштабном уровне – от микроуровня, когда в экспериментах на сдвиговом приборе (shear box) общая амплитуда сдвига не превышает первых миллиметров, до регионального уровня разломов крупных землетрясений. В работе [Tchalenko, 1970] подробно сравниваются стадии развития сдвиговых зон разных масштабов. Автор указывает, что в природных условиях практически никогда не представляется возможным непосредственно наблюдать развитие сдвиговой зоны от ее зарождения, однако в большинстве случаев текущее состояние той или иной природной зоны сдвига аналогично одной из стадий сдвигового процесса в эксперименте. Сколы R и P принято называть «опережающими», поскольку их появление, как правило, предшествует возникновению магистрального разлома [Seminsky, 2003]. Проявление в природных массивах характерных для зон сдвигания структур второго порядка считается надежным признаком сдвиговой деформации (например [Cunningham, 1993]).

Описанные выше черты касаются исключительно приповерхностного строения сдвиговых зон. Исследования глубинной структуры – натурные [Gogonenkov et al., 2007], экспериментальные [Bornyakov, 1981; Naylor et al., 1986; Mikhailova, 2007] и численные [Stefanov, Bakeev, 2015] – показывают, что зоны сдвигания имеют сложное трехмерное строение («цветковые», «пропеллерные» структуры). В зонах сдвига распространены системы горизонтальных трещин, дополнительные к системам сколов R и R' [Seminsky, 2003]. Имеются данные о существовании напряжений горизонтального сдвига вдоль горизонтальной плоскости [Koronovsky et al., 2009]. Однако аппарат, применяемый в настоящей работе, к сожалению, не позволяет «заглянуть в глубину» сдвиговой зоны, поэтому дальнейшие рассуждения, строго говоря, справедливы только в приповерхностном слое, где сколы почти вертикальны.

Целью настоящей работы является качественное изучение напряженного состояния непосредственно в зоне сдвига на стадии образования первичных R -сколов. При наблюдении природных систем сколов исследователи отмечают, что в некоторых случаях по мере развития сдвиговой зоны субпараллельные трещины объединяются в магистральный разлом, а в некоторых – нет. Анализ локального поля напряжений позволяет понять, почему при одинаковой нагрузке системы сколов, характеризующихся разным взаимным расположением, развиваются по-разному. Понимание причин такого различия тесным образом связано с оценкой опасности сдвиговой разломной зоны, проявляющей себя в виде структур второго порядка.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДЛЯ РАСЧЕТА КОМПОНЕНТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЙ

При проведении экспериментов исследователи, как правило, предполагают, что сухой кварцевый песок и другие зернистые материалы подчиняются эмпирическому критерию прочности Кулона, согласно которому разрушение материала наступает, когда в результате изменения нагрузки и/или свойств материала в некоторой точке возникает площадка S_n с нормалью n , на которой касательное напряжение τ_n и нормальное напряжение σ_n достигают соотношения

$$|\tau_n| = \tau_f + k\sigma_n, \quad (1)$$

где τ_f – прочность породы на сдвиг, k – коэффициент внутреннего трения породы, $\sigma_n < 0$; при этом $k = \operatorname{tg}\varphi$, где φ – угол внутреннего трения деформируемого материала.

Критерий Кулона (1) определяет ориентацию двух потенциальных площадок скалывания. Действительно, если воспользоваться таким параметром, как кулоновское напряжение τ_c , определяемое по формуле

$$\tau_c = |\tau_n| + k\sigma_n, \quad (2)$$

то соотношение (1) в первую очередь будет достигнуто на тех площадках, на которых кулоновское напряжение τ_c принимает максимальное значение в данной точке. Представив τ_c как функцию угла α , отсчитываемого от оси максимального сжатия σ_3 в плоскости, нормальной промежуточному главному напряжению σ_2 , нетрудно установить, что максимальное значение функция $\tau_c(\alpha)$ принимает при $\alpha = \alpha_{1,2}$, когда

$$2\alpha_{1,2} = \pm(90^\circ - \varphi). \quad (3)$$

Зависимость (3) объясняет ориентацию сколов R и R' в зонах сдвига. Знак «+» отвечает за возникновение сколов R' , знак «-» задает направление сколов R . Т. е. во-первых, существуют плоскости, ориентированные к зоне сдвигания (расположенной под углом 45° к оси σ_3) под углом $\beta_1 = 45^\circ + \alpha_1$, что соответствует ориентировкам сколов R' . Во-вторых, существуют плоскости, ориентированные к зоне сдвигания под углом $\beta_2 = 45^\circ + \alpha_2$, что соответствует ориентировкам сколов R (рис. 1).

При неоднородном напряженном состоянии ориентация главных осей тензора напряжений отличается в разных точках. Это означает, что в каждой точке возможно свое направление площадок скалывания, на которых кулоновское напряжение τ_c , определяемое по формуле (2), принимает максимальное значение.

Пусть в плоскости, ортогональной оси промежуточного главного напряжения σ_2 , заданы направления главных напряжений σ_1 и σ_3 ; обозначим:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}.$$

Пусть зона сдвига ориентирована под углом 45° к оси σ_3 . Предположим, что угол внутреннего трения рассматриваемого материала составляет $\varphi = 30^\circ$. Тогда коэффициент внутреннего трения примет значение $k = \operatorname{tg}30^\circ \approx 0.577$. Согласно формуле (3), плоскости максимального кулоновского напряжения при сжимающей

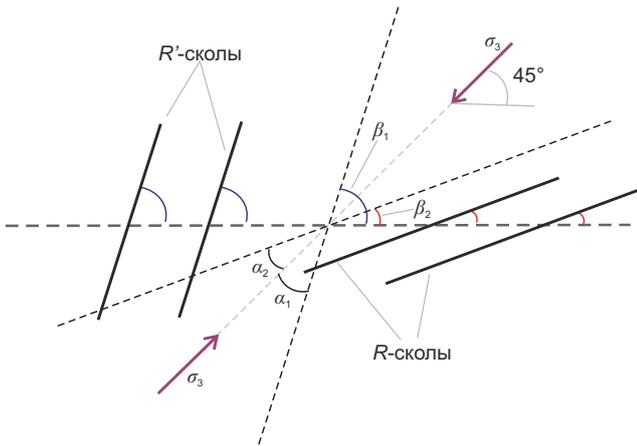


Рис. 1. Углы наклонов сколов Риделя R и сопряженных сколов Риделя R' (пояснения в тексте).

Fig. 1. Orientations of R-shears and conjugated R'-shears. Expiations in text.

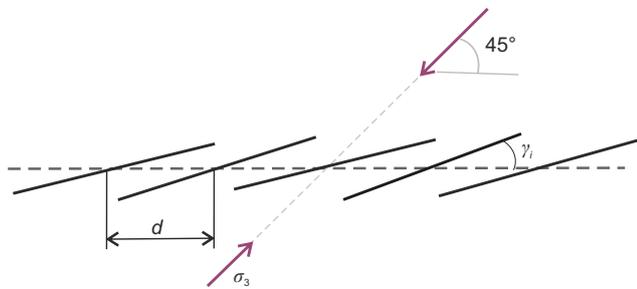


Рис. 2. Схема задачи. Ось основного сдвига обозначена толстым серым пунктиром. Сплошные черные линии показывают заданное расположение R-сколов.

Fig. 2. Scheme for calculations. Thick dashed grey line – bulk shear; black lines – prescribed R-shears.

нагрузке будут располагаться под углами 15 и 75° к направлению зоны сдвига.

Зададим расположение будущих R-сколов условной длины 2 под углами $\gamma_i = 15^\circ + \epsilon_i$, где i обозначает номер скола, а ϵ_i принимает случайные значения от -2 до 2° для имитации естественного разброса углов в неидеально однородном материале. Расстояние между серединами сколов обозначим буквой d (рис. 2).

Предположим, что прочность породы на сдвиг составляет $\tau_f = \frac{k}{2} \approx 0.29$. Тогда при равномерной нагрузке $\sigma_3 = -2.5, \sigma_1 = -0.5$ (единицы измерения не указаны, так как все значения напряжений нормированы на некоторую величину, условно принятую за 1) на площадках, ориентированных под углом 15° к зоне сдвига, окажется выполнено соотношение (1), и значит, произойдет активизация сколов.

Поясним, что параметры нагружения для расчетов были выбраны из соображений наглядности визуализации результатов. Разнообразие природных ситуаций слишком велико, чтобы можно было охватить их в рамках одной работы. Однако следует отметить, что качественная картина поля напряжений (т.е. форма и

расположение изолиний) при одинаковой геометрии системы сколов зависит не от конкретных значений, а от соотношения внешних главных напряжений и предела прочности материала, т.е. при сохранении этих соотношений останется неизменным и ответ на вопрос о расположенности системы к развитию магистрального разлома.

Расчеты тензора напряжений производились по приближенному аналитическому методу для упругих двумерных массивов, содержащих совокупность сколовых трещин [Lermontova, Rebetsky, 2012]. Метод основан на применении комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили. Последние достаточно часто используются при изучении систем трещин, однако большинство исследований посвящены не вычислению поля напряжений в трещиноватом массиве, а поиску коэффициентов интенсивности напряжений в концах трещин и вопросу возможности их прорастания. В частности, в работе [Sherman et al., 1991] анализируется активность сдвиговой зоны по коэффициентам интенсивности напряжений на концах содержащихся в ней разрывов.

3. ЛОКАЛЬНОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СДВИГОВОЙ ЗОНЕ ПОСЛЕ АКТИВИЗАЦИИ ПЕРВИЧНЫХ R-СКОЛОВ

На рис. 3, 4, 5, 6, 7 показаны параметры напряженного состояния массивов, содержащих одновременно активизированные трещины.

В контексте вопроса об объединении трещин в магистральный разлом среди всех параметров напряженного состояния в первую очередь представляет интерес максимальное кулоновское напряжение τ_c^{max} , поскольку именно оно отвечает за дальнейшее развитие разрушения в сдвиговой зоне. Красная изолиния показывает пороговый уровень $\tau_c^{max} = \tau_f$ (предел прочности, он же начальное значение кулоновского напряжения), также она отмечена на цветовой шкале.

Показаны варианты напряженного состояния для различных случаев расстояния между трещинами d , отнесенного к полудлине трещины l (длина всех трещин предполагается одинаковой и равными $2l=2$).

На рис. 3 и 4, а, видно, что в случае, когда расстояния между трещинами превышают 1.4 полудлины трещины, в промежутках возникают «запирающие» участки, на которых максимальное кулоновское напряжение ниже критического, и, следовательно, разрушение в них невозможно. По распределению сжимающих напряжений на площадках скальвания σ_n (рис. 4, б) и касательных напряжений на площадках скальвания τ_n (рис. 4, в) можно увидеть, что такая ситуация складывается именно из-за значительного возрастания сжатия в промежутках между трещинами (зеленый цвет на рис. 4, б), преобладающего над возрастанием касательных напряжений (умноженных на коэффициент внутреннего трения согласно формуле (2)) на площадках скальвания. Синяя изолиния на рис. 4, б, и цветовой шкале соответствует значению нормального напряжения

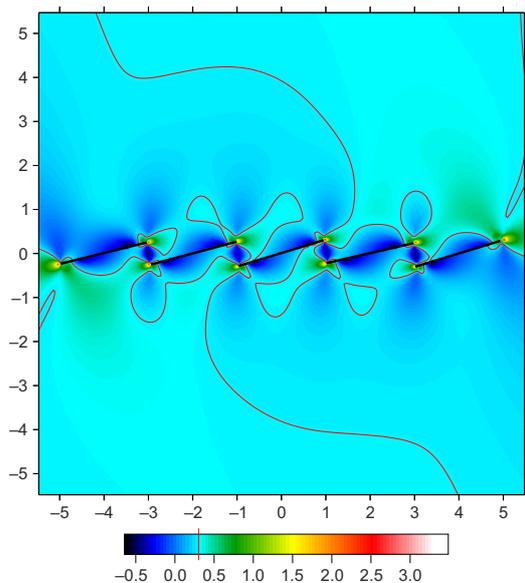


Рис. 3. Максимальное кулоновское напряжение τ_c^{\max} . Расстояние между центрами трещин равно длине трещины. Начальное напряженное состояние $\sigma=-1.5$, $\tau=1$. Начальное сжатие под углом 45° .

Fig. 3. Maximum Coulomb stress τ_c^{\max} . Distance between the centers of adjacent *R*-shears, $d=2l$ (where l is half-length of the shear). Initial stress state, $\sigma=-1.5$; $\tau=1$; initial compression, σ_3^0 at the angle of 45° to the bulk shear direction.

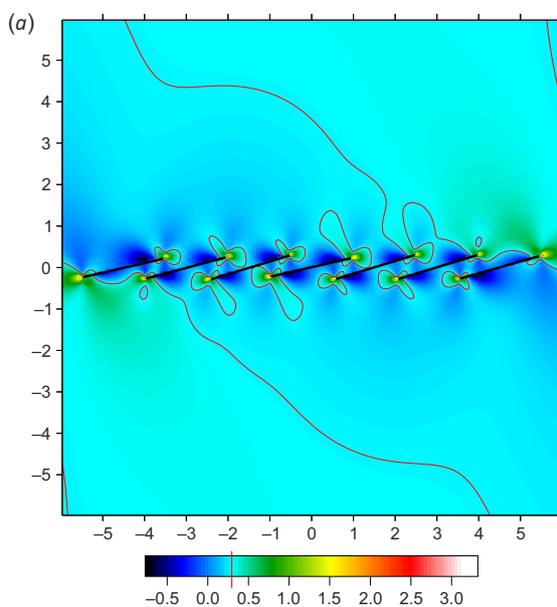
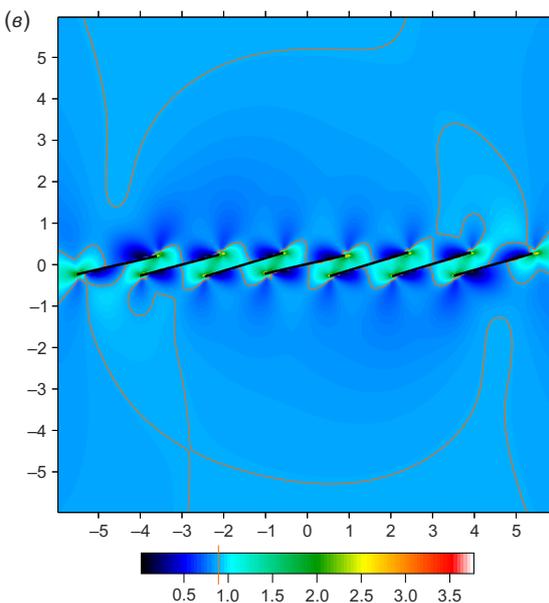
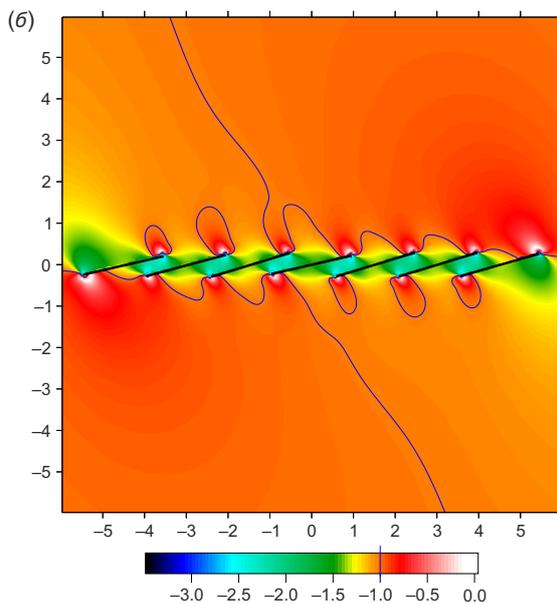


Рис. 4. Расстояние между центрами трещин 1.5 полудлины трещины. Начальное напряженное состояние $\sigma=-1.5$, $\tau=1$. Начальное сжатие под углом 45° .

(a) – максимальное кулоновское напряжение τ_c^{\max} ; (б) – нормальное напряжение на площадках скальвания σ_n ; (в) – касательное напряжение на площадках скальвания τ_n .

Fig. 4. Distance between the centers of adjacent *R*-shears, $d=1.5l$ (where l is half-length of the shear). Initial stress state, $\sigma=-1.5$; $\tau=1$; initial compression, σ_3^0 at the angle of 45° to the bulk shear direction.

(a) – maximum Coulomb stress, τ_c^{\max} ; (б) – normal stress on shearing planes, σ_n ; (в) – shear stress on shearing planes, τ_n .



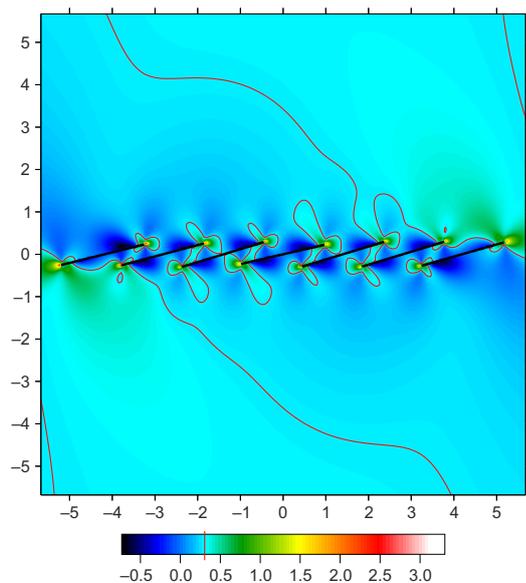


Рис. 5. Максимальное кулоновское напряжение τ_c^{\max} . Расстояние между центрами трещин 1.4 полудлины трещины. Начальное напряженное состояние $\sigma=-1.5$, $\tau=1$. Начальное сжатие под углом 45° .

Fig. 5. Maximum Coulomb stress, τ_c^{\max} . Distance between the centers of adjacent *R*-shears, $d=1.4l$ (where l is half-length of the shear). Initial stress state, $\sigma=-1.5$; $\tau=1$; initial compression, σ_3^0 at the angle of 45° to the bulk shear direction.

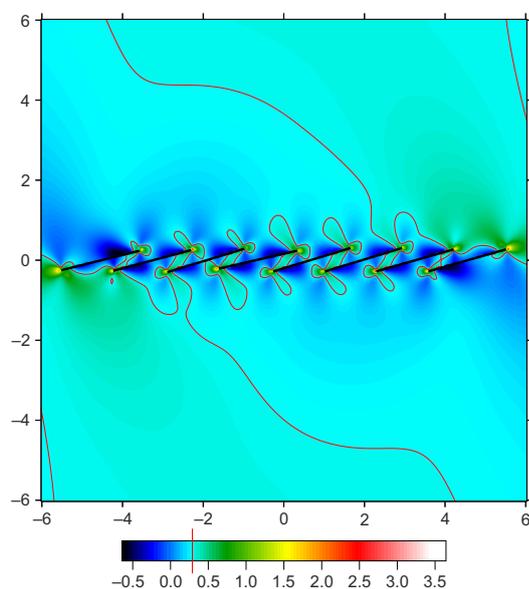


Рис. 6. Максимальное кулоновское напряжение τ_c^{\max} . Расстояние между центрами трещин 1.3 полудлины трещины. Начальное напряженное состояние $\sigma=-1.5$, $\tau=1$. Начальное сжатие под углом 45° .

Fig. 6. Maximum Coulomb stress, τ_c^{\max} . Distance between the centers of adjacent *R*-shears, $d=1.3l$ (where l is half-length of the shear). Initial stress state, $\sigma=-1.5$; $\tau=1$; initial compression, σ_3^0 at the angle of 45° to the bulk shear direction.

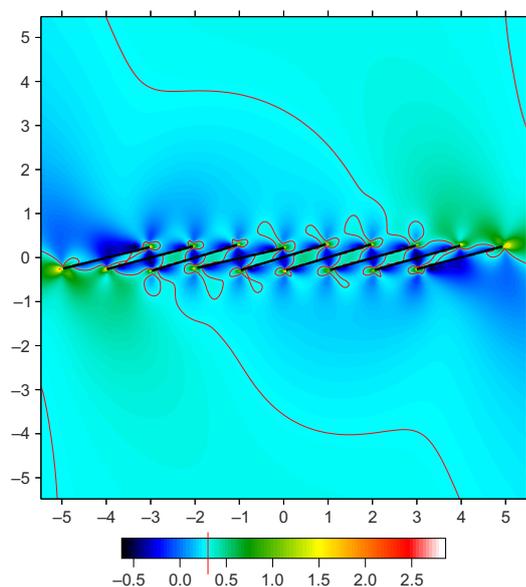


Рис. 7. Максимальное кулоновское напряжение τ_c^{\max} . Расстояние между центрами трещин равно полудлине трещины. Начальное напряженное состояние $\sigma=-1.5$, $\tau=1$. Начальное сжатие под углом 45° .

Fig. 7. Maximum Coulomb stress, τ_c^{\max} . Distance between the centers of adjacent *R*-shears, $d=l$ (where l is half-length of the shear). Initial stress state, $\sigma=-1.5$; $\tau=1$; initial compression, σ_3^0 at the angle of 45° to the bulk shear direction.

на площадках скалывания в начальном напряженном состоянии; оранжевая линия на рис. 4, в, – начальному значению касательного напряжения на площадках скалывания до активизации сколов.

Противоположная картина наблюдается на рис. 5, 6, 7. При расстояниях между трещинами менее 1.4 длины трещины соединены участками повышенного максимального кулоновского напряжения τ_c^{\max} . Значит, по этим участкам как раз пройдут вторичные нарушения, соединяющие начальные трещины в один магистральный разлом.

Таким образом, можно сделать вывод, что в случае, когда нагрузка остается на том же уровне, при котором в зоне сдвига было достигнуто критическое значение максимального кулоновского напряжения и возникли первичные сколы, объединение последних происходит, если расстояние между соседними трещинами не превышает приблизительно 1.4 полудлины трещины, и не происходит, если это расстояние больше.

4. ПРОГНОЗ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СОЕДИНЯЮЩИХ НАРУШЕНИЙ

Чтобы понять, каким образом будут расположены вторичные нарушения между соседними трещинами, рассмотрим, как внутри участка повышенного кулоновского напряжения после активизации *R*-сколов ориентированы оси главных напряжений.

На рис. 8 видно, что внутри участка повышенных максимальных касательных напряжений между соседними трещинами ось максимального сжатия располагается преимущественно под углом около 20° к направлению зоны сдвига (что подтверждает предположение относительно локального направления оси максимального сжатия [Tchalenko, 1968; Naylor et al.,

1986; Dooley, Schreurs, 2012]). Эта информация позволяет объяснить расположение *P*-сколов, возникающих, согласно экспериментальным данным, на следующей стадии развития сдвиговой зоны.

Как видно из рис. 8, смещение бортов соседних *R*-сколов вызывает локальный поворот оси максимального сжатия примерно на 25° по часовой стрелке, т.е. при начальном максимальном сжатии σ_3 , ориентированном под углом 45° к оси основного сдвига (красный цвет на рис. 8), локально после активизации *R*-сколов оказывается ориентированным под углом около 20° к оси основного сдвига (желтый цвет на рис. 8). Ее новое направление σ_3^* показано на рис. 9 стрелками оранжевого цвета. Таким образом, локально меняется и направление максимальных касательных напряжений (фиолетовая линия на рис. 9), которое до активизации *R*-сколов везде совпадало с направлением основного сдвига, а после составляет с ним -25° (положительным считается поворот против часовой стрелки) на рассматриваемом участке. Следовательно, новое *R*-направление также окажется повернутым приблизительно на 25° по часовой стрелке, т.е. составит -10° с направлением оси основного сдвига (рис. 9, красная линия). А это, напомним, и есть направление *P*-сколов.

Таким образом, приходим к следующему выводу: *P*-сколы, возникающие в экспериментальных и природных зонах сдвига после активизации *R*-сколов, могут быть квалифицированы, как такие же *R*-сколы, но при новой ориентации главных осей локального поля напряжений. Образование *P*-сколов также подчиняется теории прочности Кулона-Мора, указывающей, на какой угол площадки скалывания должны отклоняться от направления максимального сжатия.

По аналогии можно было бы ожидать также возникновения «сопряженных *P*-сколов» – сопряженных

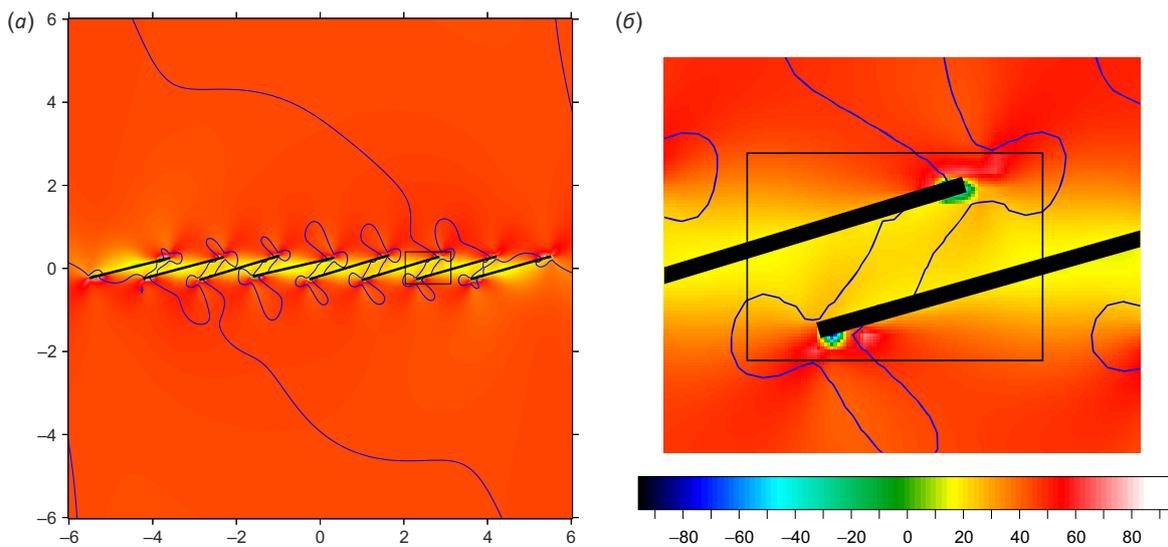


Рис. 8. Угол наклона локальной оси максимального сжатия к направлению основного сдвига. Расстояние между центрами трещин 1.3l: (а) – вся область расчета; (б) – участок в прямоугольнике более крупно.

Fig. 8. Angle between the local axis of maximum compression and the bulk shear direction. Distance between the centers of adjacent *R*-shears, $d=1.3l$. (a) – entire calculation zone; (b) – zoomed-in box.

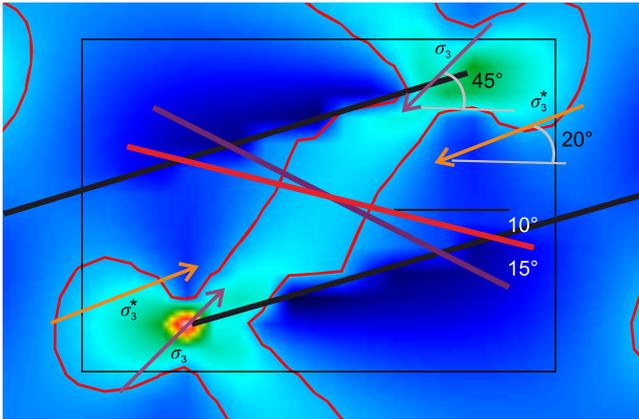


Рис. 9. Расположение новой локальной оси максимального сжатия (оранжевые стрелки), направление максимальных касательных напряжений (фиолетовая полоса) и локальное R-направление (красная полоса) после активизации R-сколов. Показан тот же участок, что и на рис. 8, б. Фон – распределение максимальных кулоновских напряжений τ_c^{\max} .

Fig. 9. Position of the new local axis of maximum compression (orange arrows), maximum shear stress direction (purple line), and local R-shear direction (red line) after the activation of R-shears. See also Fig. 8, б. Maximum Coulomb stress, τ_c^{\max} is shown at the background.

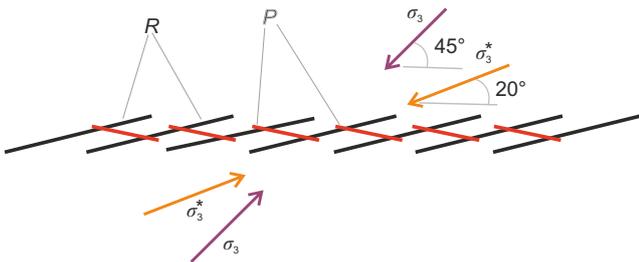


Рис. 10. Схема строения сдвиговой зоны на стадии зарождения магистрального разлома. Черными линиями обозначены сколы Риделя, красными – вновь образованные P-сколы.

Fig. 10. Scheme of the shear zone at the stage when the main fault is initiated. Black lines – R-shears; red lines – newly formed P-shears.

сколов Риделя в локальном поле напряжений. Их наклон составил бы около 50° к оси основного сдвига. Однако автор не встречал в литературе упоминаний о массовом образовании сколов с такой ориентацией в экспериментах.

При рассмотрении поля напряжений в зоне сдвига после активизации сколов Риделя возникает еще один естественный вопрос. Непонятно, почему дальнейшее разрушение в физических экспериментах реализуется именно в виде P-сколов, несмотря на то, что величины максимального кулоновского напряжения на концах R-сколов значительно превосходят таковые в области вероятного возникновения P-скола, т.е. конфигурация системы сколов в зоне сдвига, по-видимому, регулируется не только максимальным кулоновским напряжением.

Идеализированная схема строения сдвиговой зоны на стадии образования P-сколов показана на рис. 10. Структуры второго порядка – R-сколы и P-сколы – развиты настолько, что их цепочка представляет собой непрерывное нарушение через всю сдвиговую зону. Собственно, это и есть начало формирования магистрального разлома. Красные линии – вновь возникшие P-сколы. Фиолетовая стрелка показывает направление максимального внешнего сжатия σ_3 , оранжевая – направление локальной оси максимального сжатия σ_3^* на участках между соседними сколами Риделя.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчет параметров поля напряжений в сдвиговой зоне, выраженной эшеленом параллельных сколов Риделя при значении угла внутреннего трения $\varphi=30^\circ$, показывает, что при расстоянии между соседними сколами

больше 1.4 полудлины трещины объединения сколов в магистральный разлом без роста внешней нагрузки происходить не должно, поскольку значение максимального кулоновского напряжения на участках между сколами не превышает предела прочности материала. Невысокие значения кулоновского напряжения являются следствием роста нормальных сжимающих напряжений на площадках скалывания, так что даже несмотря на повышение уровня касательных напряжений разрушение не может быть реализовано.

Другими словами, при достаточно редком расположении R-сколов сброс касательных напряжений, накопившихся в системе в результате воздействия внешней сдвиговой нагрузки, полностью осуществляется за счет сдвига по этим R-сколам, поэтому не происходит образования новых нарушений. Стоит заметить, что результаты проведенных расчетов не разъясняют причин, по которым при зарождении сдвиговой зоны сколы Риделя возникают на том или другом расстоянии друг от друга. Однако определение величин кулоновского напряжения в промежутках между R-сколами дает возможность установить, насколько опасной является та или иная природная сдвиговая зона с точки зрения образования магистрального сдвига.

При достаточно близком расположении R-сколов между ними возникают участки превышения кулоновским напряжением предела прочности. Анализ ориентировки осей главных напряжений на этих участках позволяет установить, что новое R-направление в измененном сколами Риделя поле напряжений составляет с основной осью сдвига угол около -10°. Это совпадает с направлением P-сколов, наблюдаемых в экспериментальных и природных зонах сдвига на стадии

развития, следующей за стадией возникновения R -сколов. Когда P -сколы развиваются достаточно, чтобы вместе с R -сколами образовывать участки непрерывного нарушения в сдвиговой зоне, начинается формирование магистрального разлома.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bornyakov S.A., 1981. Tectonophysical Analysis of Formation of a Transform Zone in an Elastic-Viscous Model. In: N.A. Logachev, S.I. Sherman (Eds), Problems of Fault Tectonics. Nauka, Novosibirsk, p. 26–44 (in Russian) [Борняков С.А. Тектонофизический анализ процесса формирования трансформной зоны в упруговязкой модели // Проблемы разломной тектоники / Ред. Н.А. Логачев, С.И. Шерман. Новосибирск: Наука, 1981. С. 26–44].

Cunningham W.D., 1993. Strike-Slip Faults in the Southernmost Andes and the Development of the Patagonian Orocline. *Tectonics* 12 (1), 169–186. <https://doi.org/10.1029/92TC01790>.

Dooley T.P., Schreurs G., 2012. Analogue Modelling of Intraplate Strike-Slip Tectonics: A Review and New Experimental Results. *Tectonophysics* 574–575, 1–71. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.05.030>.

Gintov O.B., 2005. Field Tectonophysics and Its Application in Studies of Deformation of the Earth's Crust. Phoenix, Kiev, 572 p. (in Russian) [Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры. Киев: Феникс, 2005. 572 с.].

Gogonenkov G.N., Kashik A.S., Timurzиеv A.I., 2007. Horizontal Displacements of West Siberia's Basement. *Russian Oil and Gas Geology* 3, 3–11 (in Russian) [Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 3–11].

Goncharov M.A., Rogozhin E.A., Frolova N.S., Rozhin P.N., Zakharov V.S., 2014. Riedel Megascals R' and the Trend to Gravitational Equilibrium as Main Factors of Tsunamigenic Earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (4), 939–991 (in Russian) [Гончаров М.А., Рогожин Е.А., Фролова Н.С., Рожин П.Н., Захаров В.С. Мегасколы Риделя R' и тенденция к гравитационному равновесию как главные факторы цунамигенных землетрясений // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 939–991]. <https://doi.org/10.5800/gt-2014-5-4-0164>.

Koronovsky N.V., Gogonenkov G.N., Goncharov M.A., Timurzиеv A.I., Frolova N.S., 2009. The Role of Shear along the Horizontal Plane in the Formation of Propeller-Shaped Structures. *Geotectonics* 5, 50–64 (in Russian) [Короновский Н.В., Гогоненков Г.Н., Гончаров М.А., Тимурзиев А.И., Фролова Н.С. Роль сдвига вдоль горизонтальной плоскости при формировании структур «пропеллерного» типа // Геотектоника. 2009. № 5. С. 50–64].

Lermontova A.S., Rebetsky Yu.L., 2012. Research of Interactions between Shear Fractures on the Basis of Approximate Analytical Elastic Solutions. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (3), 239–274 (in Russian) [Лермонтова А.С., Ребецкий Ю.Л. Исследование взаимодействия трещин сдвига на основе приближенного аналитического решения

задачи теории упругости // Геодинамика и тектонофизика. 2012. Т. 3. № 3. С. 239–274]. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-3-0073>.

Mikhailova A.V., 2007. Geodynamic Characteristics of Structures Formed in the Layer above Active Faults in the Basement. In: *Geophysics of the XXI Century: The Year of 2006. Proceedings of the Eighth Geophysical Readings Named after V.V. Fedynsky (March 02–04, 2006)*. GERS, Tver, p. 111–118 (in Russian) [Михайлова А.В. Геодинамические характеристики структур, образовавшихся в слое над активными разломами фундамента // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сборник трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского (2–4 марта, 2006 г.). Тверь: ГЕРС, 2007. С. 111–118].

Naylor M.A., Mandl G., Sijpesteijn C.H.K., 1986. Fault Geometries in Basement-Induced Wrench Faulting under Different Initial Stress States. *Journal of Structural Geology* 8 (7), 737–752. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(86\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0191-8141(86)90022-2).

Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Sim L.A., 2008. Fracture Structures at the Depths of Shear Zones. Tectonophysical Modeling Results. In: *Problems of Tectonophysics. To the 40th Anniversary of M.V. Gzovsky Laboratory of Tectonophysics, IPE RAS*. IPE RAS Publishing House, Moscow, p. 103–140 (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Михайлова А.В., Сим Л.А. Структуры разрушения в глубине зон сдвига. Результаты тектонофизического моделирования // Проблемы тектонофизики: К сорокалетию создания М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2008. С. 103–140].

Seminsky K.Zh., 2003. Internal Structure of Continental Fault Zones. Tectonophysical Aspect. GEO, Novosibirsk, 244 p. (in Russian) [Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: GEO, 2003. 244 с.].

Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., Lobatskaya R.M., Adamovich A.N., Truskov V.A., Babichev A.A., 1991. Faulting in the Lithosphere. Strike-Slip Zones. Nauka, Novosibirsk, 261 p. (in Russian) [Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 262 с.].

Stefanov Y.P., Bakeev R.A., 2015. Formation of Flower Structures in a Geological Layer at a Strike-Slip Displacement in the Basement. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth* 51 (4), 535–547. <https://doi.org/10.1134/S1069351315040114>.

Stoyanov S.S., 1977. Mechanism of Formation of Fault Zones. Nedra, Moscow, 144 p. (in Russian) [Стоянов С.С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.].

Tchalenko J.S., 1968. The Evolution of Kink-Bands and the Development of Compression Textures in Sheared Clays. *Tectonophysics* 6 (2), 159–174. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(68\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0040-1951(68)90017-6).

Tchalenko J.S., 1970. Similarities between Shear Zones of Different Magnitudes. *Geological Society of America Bulletin* 81 (6), 1625–1640. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[1625:SBSZOD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[1625:SBSZOD]2.0.CO;2).