



SHEAR-TYPE FRACTURE ORIENTATIONS AS AN INDICATOR OF THE PRINCIPAL STRESS AXES DIRECTION

A.S. Lermontova  

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

ABSTRACT. Most of the existing stress field reconstruction methods involve fracture systems to determine the stress state in a small-volume geomedium. The principal stress axes orientations at a point can be reconstructed from a pair of conjugate fractures. Based on mathematical modeling of compression stress field in the shear zone, this article shows that even when only one of two conjugate fracture systems develops and another one does not or is not being formed at all, the shears of the existing system are formed at an angle to the local maximum compression axis. Therefore, when the compression failure point is in the linear part of the Mohr diagram, the formation of even one shear gives a lot of information concerning local principal stress axes orientations at the formation point. This information can be used under rather restricted conditions – with knowledge about the intermediate principal stress axis orientation and the considered-volume medium location at the moment of shear formation, but all this can be obtained, for example, in physical modeling. Successive formation of shears allows for accurate monitoring of the variations in principal axes orientations irrespective of whether the precise shear angle is known.

KEYWORDS: stress field; shear zone; second-order faults; Riedel shears; shear angle

FUNDING: The study was carried out on the state assignment of the IPE RAS (project No. 122040600089-4).



EDN: ZWHFDB

RESEARCH ARTICLE

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

Received: October 16, 2025

Revised: April 10, 2026

Accepted: April 14, 2026

FOR CITATION: Lermontova A.S., 2026. Shear-Type Fracture Orientations as an Indicator of the Principal Stress Axes Direction. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (4), 0909. doi:10.5800/GT-2026-17-4-0909

ОРИЕНТАЦИЯ ВОЗНИКАЮЩИХ НАРУШЕНИЙ СКОЛОВОГО ТИПА КАК ИНДИКАТОР НАПРАВЛЕНИЯ ОСЕЙ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

А.С. Лермонтова

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

АННОТАЦИЯ. Большинство существующих методов реконструкции поля напряжений использует совокупности трещин для определения напряженного состояния в небольшом объеме геосреды. Восстановление ориентаций осей главных напряжений в точке возможно по паре сопряженных трещин. В настоящей работе на основе математического моделирования поля напряжений в сдвиговой зоне в условиях сжатия показано, что, даже когда развивается только одна из систем трещин, а сопряженная к ней не получает развития или не образуется вовсе, сколы существующей системы формируются, отклоняясь на угол скалывания от локальной оси максимального сжатия. Следовательно, в условиях сжатия при нахождении точки разрушения на линейной части диаграммы Мора возникновение даже одиночного возникающего скола несет много информации о локальных ориентациях осей главных напряжений в точке возникновения. Данная информация может быть использована при достаточно узких условиях – это наличие сведений об ориентации промежуточной оси главных напряжений и о положении рассматриваемого объема среды в момент возникновения скола, однако все они могут быть выполнены, например, при физическом моделировании. Последовательное возникновение сколов позволяет точно отследить изменение ориентаций главных осей независимо от того, известно ли точное значение угла скалывания породы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поле напряжений; зона сдвига; нарушения второго порядка; сколы Риделя; угол скалывания

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках госзадания ИФЗ РАН (проект № 122040600089-4).

1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании процесса развития разломов наибольшее внимание уделяется изучению области активного динамического влияния разлома – части окружающего разлом во всех трех измерениях пространства, в котором проявляются остаточные деформации, возникшие вследствие смещения на разломе [Sherman et al., 1983]. Области активного динамического влияния сдвигового разлома ниже будем для краткости называть зоной сдвига, или сдвиговой зоной. 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 . В дальнейшем примем σ_3 за ось максимального сжатия и будем считать $\sigma_3 < 0$.

Следует заметить, что в работах по механике сломов «сдвиг» принято называть любое смещение бортов разлома, параллельное его крыльям, тогда как в геологической литературе этот термин понимается более узко, как горизонтальное смещение вдоль вертикальной плоскости. 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.

Зона сдвига является крайне важным объектом в аспекте изучения процессов подготовки и развития

тектонических землетрясений, поэтому и физическому, и численному ее моделированию посвящено большое количество работ [Bornyakov et al., 2014; Karimova, Bornyakov, 2020; Frolova et al., 2016; Korbulyak et al., 2018; Leonov et al., 2018; Stefanov, Bakeev, 2015; Stefanov et al., 2013; Schulson, 2004; и многие другие].

Развитие зоны сдвига принято делить на три основные стадии: раннюю дизъюнктивную (возникновение отдельных нарушений), позднюю дизъюнктивную (для нее характерно разрастание уже имеющихся нарушений и возникновение сочленяющих) и дизъюнктивную стадию полного разрушения (на этой стадии происходит сдвиговое смещение по всему основному разлому) [Seminsky, 2003]. Нарушения, возникающие на первых двух стадиях, называются опережающими, поскольку они образуются до основного сдвига. Они относятся к структурам второго порядка, так как по сравнению с основным сдвигом находятся на меньшем масштабном уровне. Наиболее удобными для использования являются варианты классификации структур второго порядка С.С. Стоянова [Stoyanov, 1977] (рис. 1) и П.Л. Хэнкока [Hancock, 1985].

2. КЛАССИФИКАЦИИ СТРУКТУР ВТОРОГО ПОРЯДКА В СДВИГОВЫХ ЗОНАХ И МЕСТО Р-СКОЛОВ В НИХ

В монографии [Gintov, 2005] классификация структур второго порядка, свойственных зонам сдвига, приводится в текстовой форме. Выделяются: 1) *L*-сколы, параллельные направлению основного сдвига в

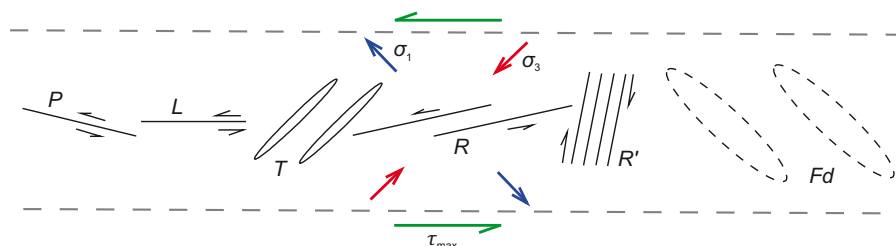


Рис. 1. Схема напряжений и структур в зонах скалывания (по [Stoyanov, 1977]).

Fig. 1. A scheme of stresses and structures in shear zones (after [Stoyanov, 1977]).

зоне; 2) *R*-сколы (сколы Риделя), ориентированные под углом $\frac{\pi}{4} - \alpha_0$ к направлению основного сдвига в зоне, при правом сдвиге отклоняясь вправо от этого направления, а при левом – влево при некотором значении α_0 ; 3) *R'*-сколы (сопряженные сколы Риделя), ориентированные под углом $\frac{\pi}{4} + \alpha_0$ к направлению основного сдвига в зоне, отклоняясь в ту же сторону, что и *R*-сколы; 4) *P*-сколы, ориентированные под углом $\frac{\pi}{4} - \alpha_0$ к направлению основного сдвига в зоне, при правом сдвиге отклоняясь влево от этого направления, а при левом – вправо (указанное значение угла отклонения *P*-сколов опровергается в настоящей работе); 5) трещины отрыва *T*, ориентированные под углом $\frac{\pi}{4}$ к направлению основного сдвига в зоне, отклоняясь 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, отклоняясь в ту же сторону, что и *P*-сколы.

Экспериментальные данные показывают, что для развития сдвига в условиях внешнего сжатия характерна следующая последовательность возникновения структур второго порядка [Tchalenko, 1968]: (1) в первую очередь появляются *R*-сколы и *R'*-сколы; (2) затем возникают *P*-сколы, соединяющие *R*-сколы; (3) наконец, формируются *L*-сколы, сонаправленные с основным сдвигом, слияние которых составляет в дальнейшем магистральный разлом. Эта последовательность отвечает ранней дизъюнктивной стадии развития сдвиговой зоны, поздней дизъюнктивной стадии и стадии полного разрушения соответственно. Согласно наблюдениям, сопряженные сколы *R'* перестают развиваться вскоре после возникновения. Это связывают с изменением соотношения нормальных и касательных напряжений на них в процессе развития зоны сдвига [Rebetsky et al., 2008; Goncharov et al., 2014].

В работе [Tchalenko, 1970] подробно сравниваются стадии развития сдвиговых зон разного масштаба. Автор отмечает, что закономерность возникновения сначала сколов Риделя, за ними *P*-сколов, затем *L*-сколов характерна для зон сдвига практически любого масштабного уровня, от микроуровня, когда в экспе-

риментах на сдвиговом приборе (shear box) общая амплитуда сдвига не превышает первых миллиметров, до регионального уровня разломов крупных землетрясений. Системы структур второго порядка используются в качестве индикатора наличия сдвиговой деформации [Gzovsky, 1975; Seminsky, 2003]. Отметим, что независимость характера развития сдвиговой зоны от масштабного уровня наблюдается не только для горных пород, но и для льда [Schulson, 2004].

Следует отметить, что перечисленные особенности характеризуют именно приповерхностное строение сдвиговых зон. Многочисленные исследования показывают, что их глубинная структура достаточно сложна [Bornyakov, 1981; Naylor et al., 1986; Mikhailova, 2007; Gogonenkov et al., 2007; Stefanov, Bakeev, 2015]. Однако в настоящей работе используется существенно двумерный аппарат, поэтому дальнейшие рассуждения и выводы можно считать справедливыми для приповерхностного слоя, где сколы почти вертикальны.

В частности, ориентация как *R*-сколов, так и *R'*-сколов согласуется с законом Кулона – Мора, определяющим направление скалывания в точке среды под углом скалывания от локального направления оси максимального сжатия. *P*-сколы долгое время в значительной части работ было принято считать зеркально-симметричными *R*-сколам относительно оси сдвига.

Эта версия принята в монографии [Gintov, 2005] и еще в работах многих авторов. Не совсем понятно, откуда она произошла. Можно предположить, что источником стала знаменитая схема из работы [Hancock, 1985], на которой *R* и *P*-сколы показаны визуально симметричными (рис. 2). Заметим, что в тексте статьи равенство углов не упоминается. До сих пор не существует объяснения, каким образом могут появляться сколы именно в направлении, отклоняющемся от направления основного сдвига именно на угол, равный углу отклонения сколов Риделя, но в противоположную сторону.

В настоящей работе приведены расчеты поля напряжений в зоне сдвига на стадии образования эшелона сколов Риделя. Они показывают, что локальный поворот осей главных напряжений между соседними *R*-сколами, происходящий вследствие смещения их бортов, соответствует разнице в направлениях между *R* и *P*-сколами. Это говорит о том, что направление скалывания претерпевает ровно такой же поворот.

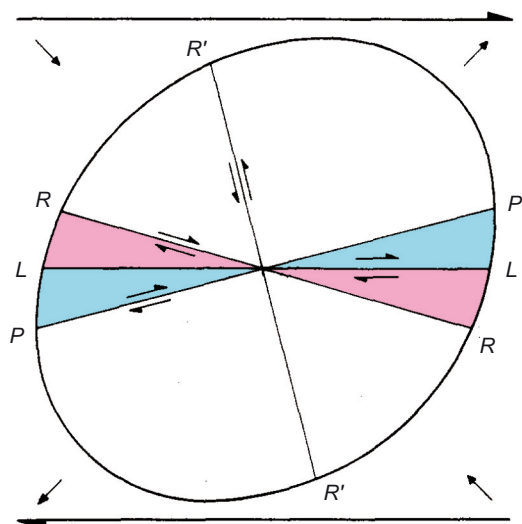


Рис. 2. Сколы R , R' , P и L на обобщенной схеме сколов при правом сдвиге (по [Hancock, 1985]).

Розовым цветом отмечен угол между R -сколом и направлением основного сдвига, голубым – между R' -сколом и направлением основного сдвига.

Fig. 2. A generalized scheme of R , R' , P and L -shears at the right-lateral displacement (after [Hancock, 1985]).

The angle between R -shear and main shear direction is pink; the angle between R' -shear and main shear direction is light blue.

Сопоставляя расчеты направления оси максимального сжатия с зонами повышенного максимального кулоновского напряжения, можно видеть, что ориентация P -сколов совпадает с новым направлением скалывания, а максимальные кулоновские напряжения в соответствующих зонах, как правило, повышены. Следовательно, можно с уверенностью утверждать, что P -сколы имеют то же происхождение, что и R -сколы, т.е., согласно закону Кулона – Мора, отклоняются на угол скалывания от оси максимального сжатия, и направление их отличается от направления R -сколов просто вследствие локального поворота осей главных напряжений в результате смещения бортов R -сколов. Этот вывод подтверждается также расчетом поля напряжений в зоне сдвига на следующей стадии развития сдвиговой зоны, после активизации P -сколов, который показывает дальнейший поворот направления скалывания к направлению основного сдвига, что соответствует вторичным сколам, наблюдаемым на этой стадии [Tchalenko, 1968].

Таким образом, следует отказаться от подхода, определяющего угол отклонения P -сколов от направления основного сдвига равным углом отклонения R -сколов. Расчеты поля напряжений при варьировании параметров задачи показывают, что конкретное значение угла отклонения P -сколов может быть разным и с величиной угла отклонения R -сколов оно напрямую не связано. Оба эти значения невелики, и, по-видимому, заблуждение относительно их равенства было вызвано их часто наблюдаемым приблизительным совпадением.

В настоящей работе, в частности, будет затронута тема восстановления поля напряжений в массиве, поэтому необходимо упомянуть, что большинство существующих методов реконструкции поля напряжений для определения напряженного состояния в небольшом объеме геосреды использует совокупности трещин. Восстановление ориентаций осей главных напряжений в точке теоретически возможно по паре сопряженных трещин (метод сопряженных пар сколов М.В. Гзовского [Gzovsky, 1975]). При этом для надежности определения ориентаций, очевидно, необходимо использовать системы сопряженных трещин. Так, в методе [Parfenov, 1984] оси квазиглавных напряжений определяются как центры облаков точек, отвечающих осям P и T , построенным на единичной полусфере по данным об ориентации и направлении борозд скольжения каждой трещины. Статистический метод П.Н. Николаева подразумевает выделение локальных максимумов ориентаций измеренных трещин [Nikolaev, 1977]. В методе тройственного парагенезиса трещин [Seminsky, 2003] для определения положения полюсов систем трещин используются изолинии плотности выходов полюсов индивидуальных трещин на стереографическую плоскость. Методы квазипластического анализа трещин также основаны на данных о множестве трещин в рассматриваемой области.

3. ПОНЯТИЕ УГЛА СКАЛЫВАНИЯ

Согласно критерию прочности Кулона разрушение материала наступает тогда, когда в результате изменения нагрузки либо 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 $k = \tan \varphi$, где φ – угол внутреннего трения деформируемого материала. Здесь и везде ниже примем, что сжимающие напряжения отрицательны.

Критерий Кулона (1) определяет ориентацию двух потенциальных площадок скалывания. Действительно, соотношение (1) в первую очередь будет достигнуто на тех площадках в данной точке, на которых принимает максимальное значение кулоновское напряжение τ_c , определяемое по формуле:

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

Проверим, что площадок скалывания именно две. Пусть система координат выбрана так, что плоскость xOy нормальна промежуточному главному напряжению σ_2 , направление оси Ox совпадает с направлением зоны основного сдвига, а положительное направление угла отсчитывается от нее в сторону оси максимального сжатия. Представив τ_c как функцию угла α , отсчитываемого от оси максимального сжатия σ_3 в плоскости xOy ,

$$\tau_c(\alpha) = |\tau_n| + k\sigma_n = \left| \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha \right| + k \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \right), \quad (3)$$

и исследовав эту функцию на экстремумы, можно установить, что расположение ее особых точек не зависит от значения k , а максимальное значение функция $\tau_c(\alpha)$ принимает при $\alpha = \alpha_{1,2}$, когда

$$2\alpha_{1,2} = \pm(90^\circ - \varphi). \quad (4)$$

Два разных знака в формуле (4) совершенно равноправны, если рассматривать напряжения локально в окрестности какой-либо точки и возникновение сопряженной пары сколов в этой точке. Но поскольку система координат выбрана не случайно, а связана с направлением зоны сдвига, появляется определенность, какому типу сколов соответствует каждый из знаков, а именно знак «+» отвечает за возникновение сколов R' , знак «-» задает направление сколов R . То есть, во-первых, существуют плоскости, ориентированные к зоне сдвига (расположенной под углом 45° к оси σ_3) под углом $\beta_1 = 45^\circ + \alpha_1$, что в выбранной системе координат соответствует ориентациям сколов R' . Во-вторых, существуют плоскости, ориентированные к зоне сдвига под углом $\beta_2 = 45^\circ - \alpha_2$, что соответствует ориентациям сколов R (рис. 3).

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.

Формула (4) является прямым следствием критерия прочности Кулона. Обычно это поясняют при помощи диаграммы Мора (рис. 4). Точки дуги большого круга Мора соответствуют множеству возможных пар значений нормального и касательного напряжения на площадках, нормальных к плоскости промежуточного главного напряжения σ_2 , которые имеют место при мысленном повороте от площадки, ортогональной направлению σ_1 , к площадке, ортогональной направлению σ_3 . При повороте от направления, ортогонального σ_1 , к направлению, ортогональному σ_3 , площадка поворачивается на 90° . Точка на схеме при этом проходит дугу 180° , составляющую верхнюю половину большого круга Мора, то есть движется в два раза быстрее. Таким образом, радиус большого круга, проведенный к точке разрушения P , будет иметь угол наклона, равный удвоенному углу скалывания. Нетрудно видеть, что угол наклона касательной к кривой разрушения φ равен углу между радиусом и опущенным из точки P на ось σ перпендикуляром. Таким образом, радиус, перпендикуляр и ось σ образуют прямоугольный треугольник, где острые углы равны φ и 2α . Отсюда

$$\varphi + 2\alpha = 90^\circ, \quad (5)$$

что соответствует первому варианту формулы (4), тому, который с плюсом.

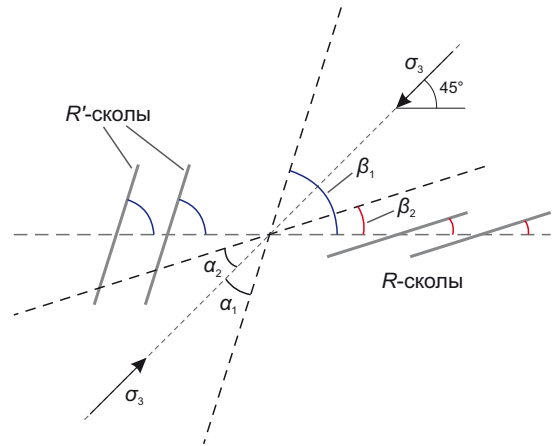


Рис. 3. Углы наклонов сколов Риделя R и сопряженных сколов Риделя R' (пояснения в тексте).

Fig. 3. Angles of R -shears and conjugate R' -shears (see text for explanations).

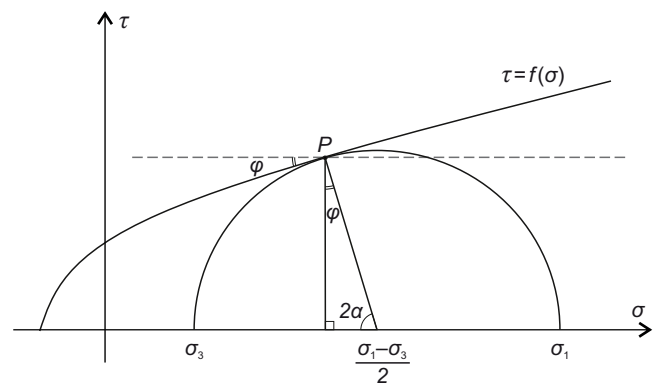


Рис. 4. Диаграмма Мора и прямоугольный треугольник с острым углом φ , определяющий соотношение (5).

Fig. 4. Mohr diagram and the rectangular triangle with the acute angle φ , determining relationship (5).

Именно формула (5) является общепотребительной. Однако формула (4) видится более предпочтительной, так как определенно и, что самое важное, наглядно отражает оба направления скалывания.

На рис. 5 направления скалывания показаны на тригонометрическом круге, который условно можно представить в плоскости, ортогональной оси σ_2 , с центром в рассматриваемой точке среды.

Как уже упоминалось, принято пользоваться формулой (5). Формула (4) при этом упоминается в литературе относительно редко [Paul, 1975; Panteleev, Lyakhovsky, 2022; Panteleev et al., 2024]. Встречается предположение, что «нижний» вариант формулы (4) легко получить, построив диаграмму Мора зеркально относительно оси σ для отрицательных значений касательных напряжений τ . Однако такой способ на самом деле не работает: на нижней полуплоскости возникнет точно такой же (хоть и зеркально симметричный) прямоугольный треугольник с острыми углами φ и 2α , который снова приведет к формуле (5).

Вывод формулы (4) автору в литературе встречать не приходилось. С одной стороны, может показаться, что исследование функции на экстремумы – слишком естественный шаг в данной ситуации, чтобы предполагать, что он до сих пор никем не был произведен, с другой – опубликовать формулу (4), ее вывод (3), а главное, графическое представление (рис. 5) видится крайне важным для понимания некоторых происходящих в зоне сдвига процессов.

Итак, прямым следствием закона Кулона – Мора является правило, согласно которому новые сколы возникают в направлениях скалывания, определяемых по формуле (4).

4. РАСЧЕТ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ СДВИГА

Постановка задачи для расчета компонент тензора напряжений. Пусть в плоскости, ортогональной оси промежуточного главного напряжения σ_2 , заданы направления главных напряжений σ_1 и σ_3 ; обозначим $\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, $\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$. Последние две величины являются начальным всесторонним давлением и начальным максимальным касательным напряжением соответственно.

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 $k=\tan 30^\circ \approx 0.577$. Согласно формуле (4), плоскости максимального кулоновского напряжения при сжимающей нагрузке будут располагаться под углами 15° и 75° к направлению зоны сдвига.

Зададим расположение будущих R-сколов условной длины 2 под углом $\gamma=15^\circ$ к оси основного сдвига. Расстояние между серединами сколов обозначим буквой d (рис. 6).

Предположим, что прочность породы на сдвиг составляет $\tau_f \approx 0.289$. Значение τ_f выбрано таким образом, чтобы при равномерной нагрузке $\sigma_3 = -2.5$, $\sigma_1 = -0.5$ (единицы измерения не указаны, так как расчеты выполнены в безразмерных величинах) на площадках, ориентированных под углом 15° к зоне сдвига, было выполнено соотношение (1) и, значит, произошла активизация сколов.

Расчеты тензора напряжений производились по приближенному аналитическому методу для упругих двумерных массивов, содержащих совокупность сколовых трещин [Lermontova, Rebetsky, 2012].

На рис. 7 показано поле максимального кулоновского напряжения для случаев, когда $d=1.4l$ (где l – полудлина скола) (рис. 7, а), $d=1.5l$ (рис. 7, б) и $d=1.6l$ (рис. 7, в). Полудлина одиночного скола, напомним, принята за 1. Красная изолиния отвечаетначальному значению максимального кулоновского напряжения $\tau_{\max}=0.289$, при выбранной внешней нагрузке оно соответствует принятому значению прочности на сдвиг τ_f . Выбор именно таких вариантов относительного расстояния между соседними сколами об-

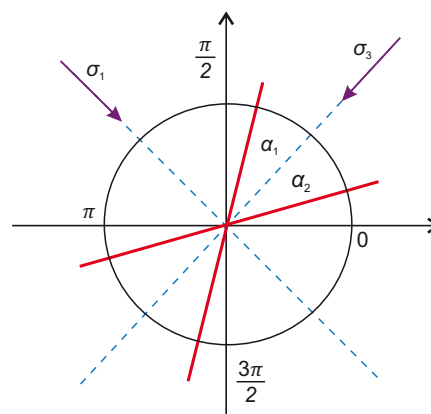


Рис. 5. Направления скалывания относительно оси максимального сжатия на тригонометрическом круге (показаны красным цветом).

Fig. 5. Shear directions relative to the maximum compression axis on the trigonometric circle (shown red).

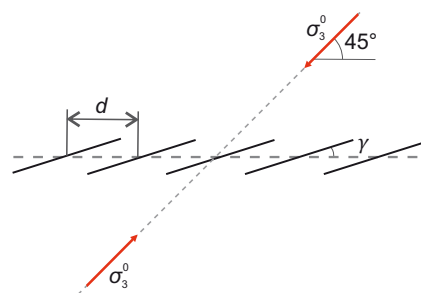


Рис. 6. Схема задачи. Ось основного сдвига обозначена толстым серым пунктиром. Сплошные черные линии показывают заданное расположение R-сколов.

Fig. 6. Scheme of the problem. The main shear axis is shown by a grey bold dashed line. Black solid lines show the desired location of R-shears.

условлен тем, что при выбранном значении коэффициента внутреннего трения между соседними сколами после их активизации именно при величине $d=1.5l$ и меньше возникают зоны повышенного максимального кулоновского напряжения, в которых следует ожидать появления новых скалывающих напряжений. Подробно этот вопрос рассмотрен в работе [Lermontova, 2021].

Здесь следует обратить внимание на то, что начальное поле напряжений выбрано таким образом, что предельное значение максимального кулоновского напряжения в точности достигнуто во всей области. Это следует понимать либо как мгновенное, либо как крайне неустойчивое состояние массива, при котором поле напряжений может в любой момент перестроиться за счет активизации R-сколов. Из-за перестройки в каких-то зонах происходит разгрузка, а в каких-то, наоборот, максимальное кулоновское напряжение может превысить разрушающее, но, опять же, только на мгновение, так как, если превышение произошло, оно будет сброшено за счет следующих разрушений.

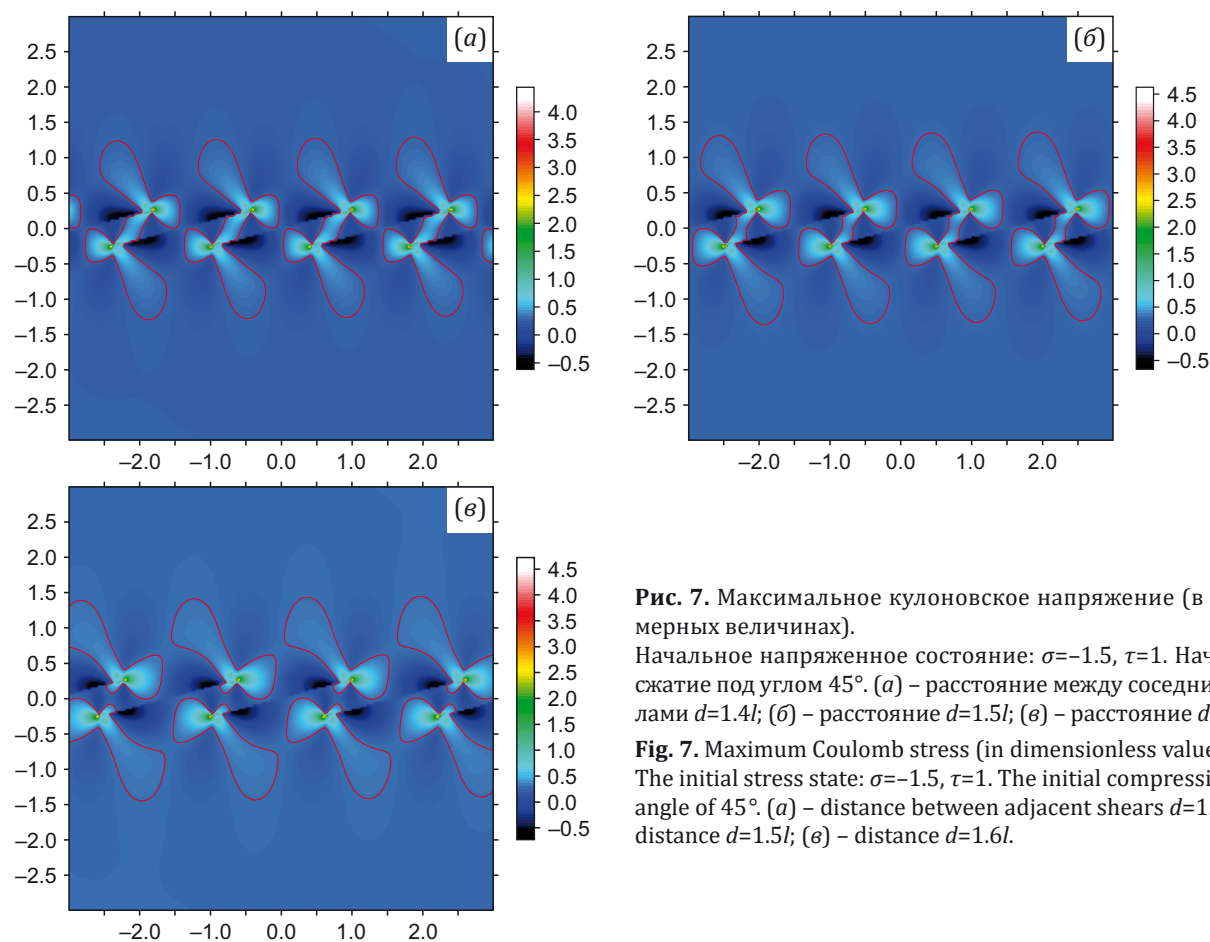


Рис. 7. Максимальное кулоновское напряжение (в безразмерных величинах).

Начальное напряженное состояние: $\sigma=-1.5$, $\tau=1$. Начальное сжатие под углом 45° . (a) – расстояние между соседними сколами $d=1.4l$; (б) – расстояние $d=1.5l$; (е) – расстояние $d=1.6l$.

Fig. 7. Maximum Coulomb stress (in dimensionless values). The initial stress state: $\sigma=-1.5$, $\tau=1$. The initial compression at an angle of 45° . (a) – distance between adjacent shears $d=1.4l$; (б) – distance $d=1.5l$; (е) – distance $d=1.6l$.

5. УГОЛ НАКЛОНА СОЕДИНЯЮЩИХ НАРУШЕНИЙ

Угол наклона плоскости скалывания в каждой точке, определяемый по формуле (4), отсчитывается от направления оси максимального сжатия. Очевидно, что при повороте оси максимального сжатия аналогичный поворот совершат и плоскости скалывания. Естественно предположить, что новые сдвиговые нарушения, возникающие вслед за развитием R -сколов, тоже пройдут по плоскостям скалывания, поэтому, чтобы определить направление новых нарушений, следует рассмотреть изменение ориентации оси максимального сжатия в зоне сдвига.

На рис. 8 показан угол наклона оси максимального сжатия к оси основного сдвига крупным планом для случая, когда угол внутреннего трения породы равен $\varphi=30^\circ$, расстояние между соседними сколами $d=1.3$. Красный цвет за пределами зоны сдвига отвечает начальному напряженному состоянию, угол между осью максимального сжатия и направлением основного сдвига составляет 45° . Желтый цвет в центре рисунка означает, что здесь этот угол составляет примерно 20° , то есть локально ось максимального сжатия поворачивается на угол около 25° (рис. 9). В этой же зоне, как показывает тонкая синяя изолиния, максимальное кулоновское напряжение повышено, соответственно, в середине зоны между R -сколами выполнено необходимое условие для образования новых сколов.

Таким образом, следует ожидать новых сдвиговых нарушений, и наклонены они будут под углом 30° к оси максимального сжатия, отсчитываемым (когда основной сдвиг – левый) по часовой стрелке. Обозначим буквой ψ угол между новым направлением скалывания и направлением основного сдвига. В данном случае будет примерно -10° к оси основного сдвига (при традиционном соглашении, что положительное направление угла отсчитывается против часовой стрелки). Но именно это направление соответствует типичному направлению P -сколов. Можно сделать следующее важное заключение: P -сколы имеют ту же самую природу, что и R -сколы, точно так же образуются согласно критерию Кулона (1), но в поле напряжений, измененном вследствие смещений бортов R -сколов.

Если рассмотреть другие варианты значений угла внутреннего трения и характерного расстояния между сколами, то углы наклона оси максимального сжатия, а следовательно, и наклона будущих P -сколов немного отличаются от описанного выше случая. Однако качественно картина такая же. Результаты расчетов приведены на рис. 10.

На рис. 10 цветовая шкала отражает угол наклона площадок скалывания к оси основного сдвига. Красный цвет соответствует углу наклона площадок скалывания при начальном поле напряжений. Для значения угла внутреннего трения 35° (рис. 10, а–в) начальный

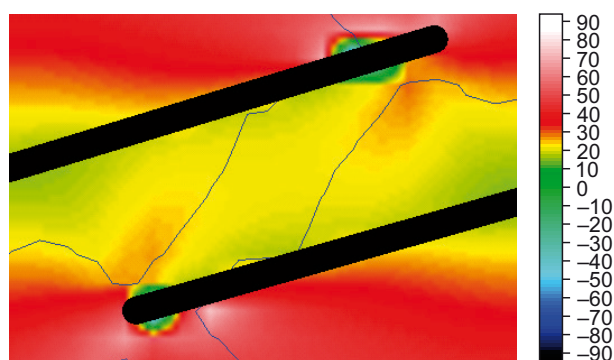


Рис 8. Угол наклона оси максимального сжатия к оси основного сдвига.

Толстые черные линии – соседние *R*-сколы. Тонкая синяя изолиния – граница зоны повышенных кулоновских напряжений после активизации *R*-сколов.

Fig. 8. The angle of inclination of the maximum compression axis to the main shear axis.

The thick black lines are adjacent *R*-shears. A thin blue isoline is the boundary of the zone of increased Coulomb stresses after the activation of *R*-shears.

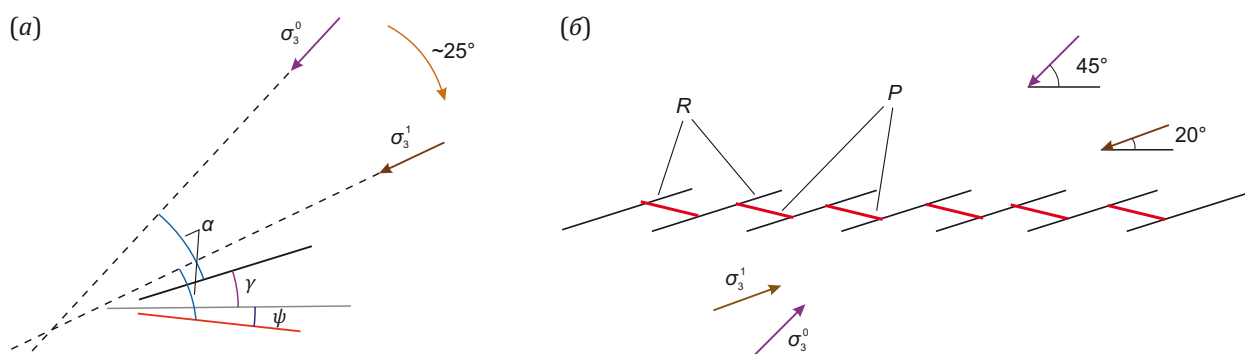


Рис 9. Локальный поворот оси максимального сжатия в зоне между соседними *R*-сколами в результате смещения по сколам.

(а) – в случае, когда угол внутреннего трения породы равен $\varphi=30^\circ$, расстояние между соседними сколами $d=1.3$, ось поворачивается примерно на 25° ; (б) – ось σ_3^0 – начальное направление оси максимального сжатия, сохраняющееся за пределами зоны сдвига, σ_3^1 – конечное локальное направление оси максимального сжатия в зоне между соседними сколами.

Fig. 9. Local rotation of the maximum compression axis in the area between adjacent *R*-shears as a result of displacement therealong.

(а) – when the internal friction angle is $\varphi=30^\circ$, the distance between adjacent shears is $d=1.3$, the axis is rotated by some 25° ; (б) – axis σ_3^0 – the initial direction of the maximum compression axis, which remains unchanged beyond the shear zone, σ_3^1 – the final local direction of the maximum compression axis in the area between adjacent shears.

угол наклона площадок скалывания $\varphi=27.5^\circ$, угол с направлением основного сдвига составит $\gamma=17.5^\circ$, для значения угла внутреннего трения 30° (рис. 10, г-е), соответственно, $\varphi=30^\circ$ и $\gamma=15^\circ$, наконец, $\varphi=32.5^\circ$ и $\gamma=12.5^\circ$ при значении угла внутреннего трения 25° . В каждом случае в середине сдвиговой зоны наблюдается поворот оси максимального сжатия по часовой стрелке на $25-30^\circ$, то есть локально угол оси максимального сжатия с направлением основного сдвига составляет $15-20^\circ$. Новое направление площадок скалывания отсчитывается от нее по часовой стрелке (как и для *R*-сколов) согласно формуле (4) снова в зависимости от угла внутреннего трения.

6. ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА СТАДИИ АКТИВИЗАЦИИ *R*-СКОЛОВ

Для дальнейших расчетов была разработана новая модификация программы, производящей их по приближенному аналитическому методу, позволяющей реализовывать несколько стадий изменения поля напряжений, на каждой из которых одновременно активизируются несколько сдвиговых трещин.

Было рассчитано поле напряжений, образующееся после смещения бортов *P*-сколов для угла внутренне-

го трения $\varphi=30^\circ$. Чтобы не усложнять расчет чрезмерно, *P*-сколы заданы по одному между каждыми двумя соседними *R*-сколами. Их направление соответствует новому локальному направлению скалывания, показанному на рис. 10, д.

На рис. 11 цветовая шкала показывает угол наклона оси максимального сжатия к направлению основного сдвига. Синяя изолиния ограничивает зоны повышенного кулоновского напряжения $\tau_f \geq 0.289$. Светло-голубая изолиния показывает уровень $\tau_f \geq 0.5$. Эта конкретная величина сама по себе не имеет какого-то глубокого смысла, просто изолиния ограничивает небольшие области, в которых максимальное кулоновское напряжение особенно высоко, и, по-видимому, именно здесь следует ожидать зарождения новых нарушений. Можно видеть, что поле напряжений перестроилось по сравнению с рис. 8, зоны повышенного кулоновского напряжения в центральной части зоны из промежутков между *R*-сколами переместились к серединам *R*-сколов. При этом не в самом центре, но ближе к концам *R*-сколов возникают зоны, в которых угол между осью максимального сжатия и направлением основного сдвига составляет приблизительно 30° . Согласно формуле (4) одно из двух направлений скалывания совпадает с

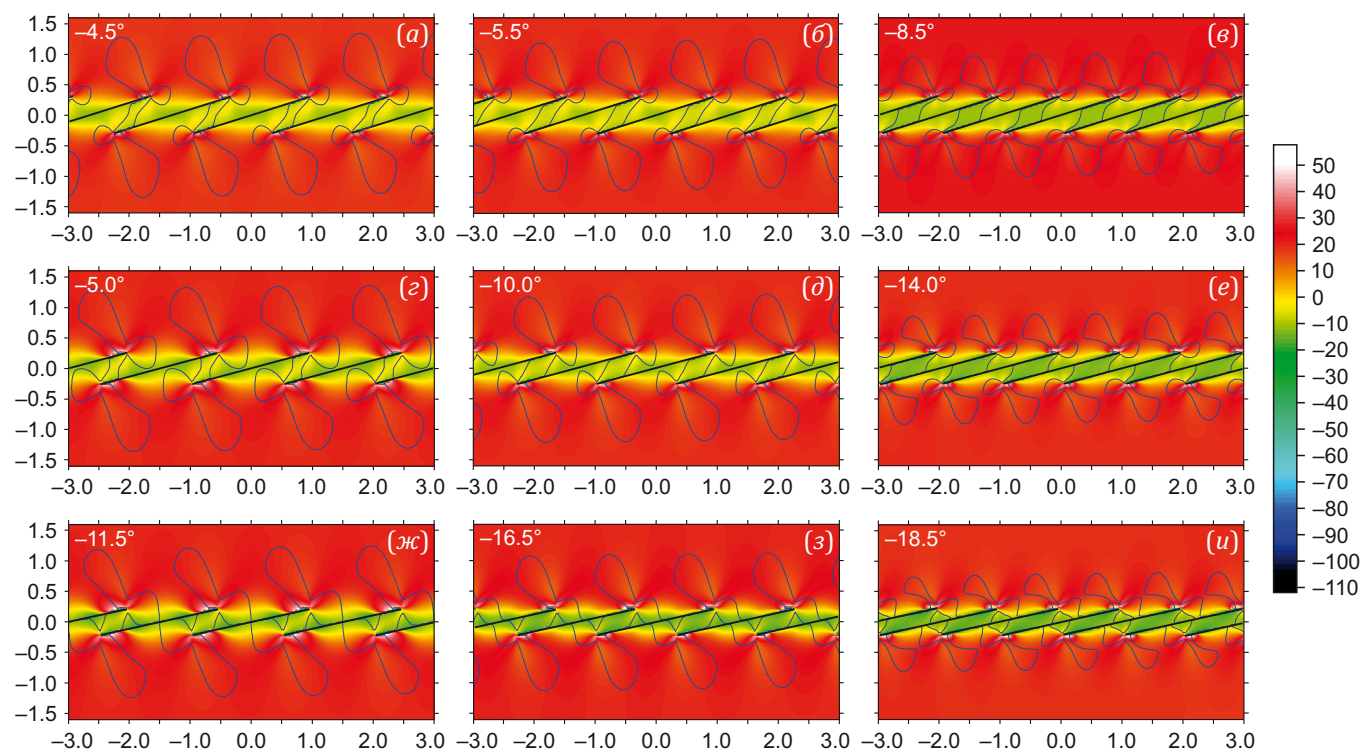


Рис. 10. Угол наклона площадок скалывания, соответствующих R -направлению, относительно направления основного сдвига при разных значениях угла внутреннего трения породы после активизации R -сколов.

(а) – угол внутреннего трения породы равен $\varphi=35^\circ$, расстояние между соседними сколами $d=1.3$, угол наклона площадок скалывания к оси основного сдвига на участках между сколами $\psi \approx -4.5^\circ$; (б) – $\varphi=35^\circ$, $d=1.2$, $\psi \approx -5.5^\circ$; (в) – $\varphi=35^\circ$, $d=1.0$, $\psi \approx -8.5^\circ$; (г) – $\varphi=30^\circ$, $d=1.5$, $\psi \approx -5^\circ$; (д) – $\varphi=30^\circ$, $d=1.3$, $\psi \approx -10^\circ$; (е) – $\varphi=30^\circ$, $d=1.0$, $\psi \approx -14^\circ$; (ж) – $\varphi=25^\circ$, $d=1.5$, $\psi \approx -11.5^\circ$; (з) – $\varphi=25^\circ$, $d=1.3$, $\psi \approx -16.5^\circ$; (и) – $\varphi=25^\circ$, $d=1.0$, $\psi \approx -18.5^\circ$. В левом верхнем углу каждого фрагмента указано значение угла ψ между направлением основного сдвига и направлением будущих P -сколов, определенным по формуле (3) относительно локальной ориентации оси максимального сжатия σ_3^* . Величина ψ принимает значения от -4.5° до -18.5° . Синяя изолиния отмечает границы зон повышенного максимального кулоновского напряжения.

Fig. 10. Angle of inclination (ψ) of the R -oriented shear planes to the main shear direction at various inner friction angles after R -shear activations.

(а) – the internal friction angle $\varphi=35^\circ$, the distance between adjacent R -shears $d=1.3$, the angle of inclination of shear planes to the main shear axis $\psi \approx -4.5^\circ$; (б) – $\varphi=35^\circ$, $d=1.2$, $\psi \approx -5.5^\circ$; (в) – $\varphi=35^\circ$, $d=1.0$, $\psi \approx -8.5^\circ$; (г) – $\varphi=30^\circ$, $d=1.5$, $\psi \approx -5^\circ$; (д) – $\varphi=30^\circ$, $d=1.3$, $\psi \approx -10^\circ$; (е) – $\varphi=30^\circ$, $d=1.0$, $\psi \approx -14^\circ$; (ж) – $\varphi=25^\circ$, $d=1.5$, $\psi \approx -11.5^\circ$; (з) – $\varphi=25^\circ$, $d=1.3$, $\psi \approx -16.5^\circ$; (и) – $\varphi=25^\circ$, $d=1.0$, $\psi \approx -18.5^\circ$. In the upper left corner of each fragment is the value of the angle ψ between the direction of the main shear and the direction of future P -shears, determined by formula (3) relative to the local orientation of the maximum compression axis σ_3^* . The angle ψ takes values from -4.5° to -18.5° . The blue isoline marks the boundaries of the increased maximum Coulomb stress zones.

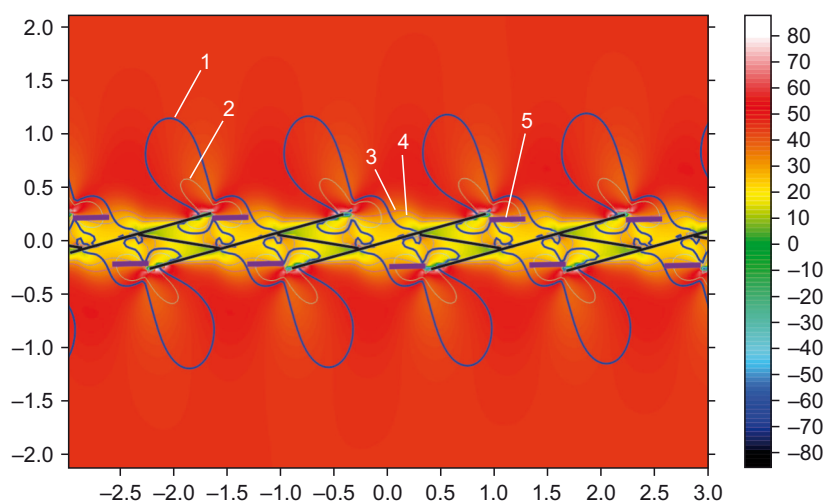


Рис. 11. Угол наклона оси максимального сжатия к направлению основного сдвига.

1 – критический уровень максимального кулоновского напряжения $\tau_f=0.289$; 2 – уровень максимального кулоновского напряжения $\tau_f=0.5$; 3 – угол наклона оси максимального сжатия 33° ; 4 – угол наклона оси максимального сжатия 27° . Между этими изолиниями будут возникать L -сколы; 5 – места возникновения будущих L -сколов.

Fig. 11. Angle of inclination of the maximum compression axis to the main shear direction.

1 – critical value of the maximum Coulomb stress $\tau_f=0.289$; 2 – value of the maximum Coulomb stress $\tau_f=0.5$; 3 – maximum compression axis inclination angle 33° ; 4 – maximum compression axis inclination angle 27° . Between these isolines, there will be L -shears; 5 – places of future L -shear occurrences.

направлением основного сдвига. Это направление совпадает с направлением L -сколов, появление которых и наблюдается в природных и экспериментальных зонах сдвига после смещений по P -сколам [Tchalenko, 1968, 1970]. На рис. 11 места возникновения L -сколов показаны фиолетовыми линиями.

Таким образом, можно считать установленным, что образование структур второго порядка в зоне сдвига в условиях сжатия полностью подчиняется правилу, вытекающему из закона Кулона – Мора и описываемому формулой (4), а именно сначала сколы R образуются под углом скалывания к направлению начальной оси максимального сжатия. В результате их активизации локально оси главных напряжений поворачиваются, и под углом скалывания к их новому направлению образуются сколы P . В свою очередь, активизация сколов P локально вызывает новый поворот осей главных напряжений, следовательно, новое направление скалывания, которому соответствуют возникающие на следующем этапе L -сколы.

7. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОСИ МАКСИМАЛЬНОГО СЖАТИЯ

Даже если о величине угла внутреннего трения породы нет совсем никаких сведений и приходится предполагать очень широкий диапазон его возможных значений, то диапазон возможных отклонений направления оси максимального сжатия будет довольно небольшим. Так, если предположить, что угол внутреннего трения составляет от 14 до 42°, и подставить эти возможные значения в формулу (4), то можно увидеть, что ось максимального сжатия может быть отклонена от вновь возникшего скола на величину от 24 до 38°, то есть разброс всего 14° (рис. 12). Однако большинство горных пород находится в гораздо более узком диапазоне значений угла внутреннего трения. Так, в справочнике [Rzhevsky, 1975] приводятся значения от 25 до 40°. Подстановка этих величин в формулу (4) даст разбег возможных направлений оси максимального сжатия всего в 7.5°. Наличие же сведений об угле внутреннего трения может значительно повысить эту точность.

Следует обязательно отметить, что указанные свойства имеют место лишь на том диапазоне изменения давлений и различных напряженных состояний, на котором огибающая кругов Мора прямолинейна [Tsyrovich, 1979].

Пусть некоторый массив предполагается однородным и нагруженным так, что промежуточная ось главных напряжений нормальна наблюдаемой плоскости, и напряженные состояния в рассматриваемой области соответствуют линейной части диаграммы Мора. Такая ситуация, в частности, возможна в эксперименте для однородно нагруженного образца. Тогда для сколов, возникающих в массиве одновременно или последовательно, будет совпадать угол между сколом и локальным направлением оси максимального сжатия в месте появления скола. Схема приведена на рис. 13.

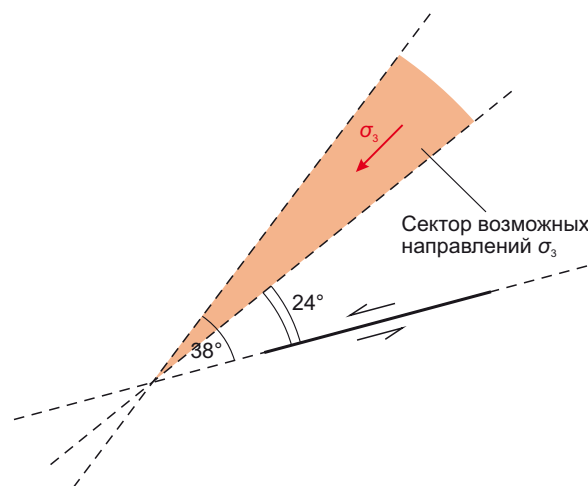


Рис. 12. Диапазон возможных значений ориентации оси максимального сжатия. Угол внутреннего трения породы принимает значения 14–42°.

Fig. 12. The range of possible maximum compression axis orientations based on the assumption that the internal friction angle is 14–42°.

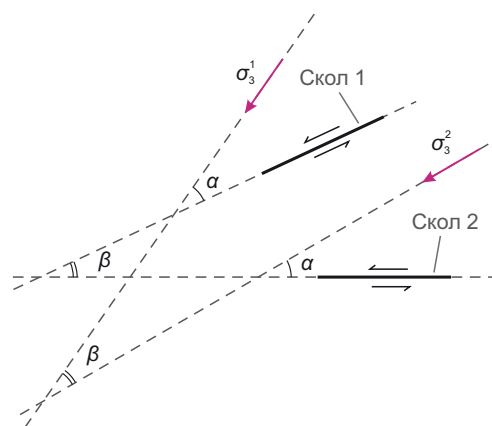


Рис. 13. Разница ориентаций двух сколов одного направления, возникших в пределах однородного образца, соответствующая разнице в ориентации оси максимального сжатия.

Fig. 13. The difference between orientations of two subparallel shears, which occurred within a homogeneous rock sample, corresponding to the difference between the maximum compression axis orientations.

Рассмотрим случай, когда скол 1 и скол 2 появились последовательно и известна ориентация оси максимального сжатия σ_3^1 в месте возникновения скола 1 («в месте возникновения» здесь и ниже будет также подразумевать «и в момент возникновения» с учетом того, что поле напряжений может меняться со временем и в результате сдвигов бортов сколов). Угол между сколом 1 и осью будет равен углу скалывания α . Пусть разница между ориентациями скола 1 и скола 2 составляет угол β . Тогда можно утверждать, что угол между осью σ_3^1 и осью максимального сжатия σ_3^2 в месте возникновения скола 2 также равен β . Таким образом, по ориентации скола 2 можно однозначно определить

направление локальной оси максимального сжатия σ_3^2 в месте возникновения скола 2. Причиной отличия в направлении оси максимального сжатия в местах возникновения сколов 1 и 2 может быть как сдвиг бортов скола 1, так и активизация любых других сколов, произошедшая до появления скола 2.

В ситуации, когда неизвестно ни точное значение угла скалывания, ни точное направление начальной оси максимального сжатия, разница в ориентациях возникающих сколов, тем не менее, несет важную информацию: разница в локальных направлениях оси максимального сжатия в точках возникновения сколов имеет ту же величину. При этом следует учитывать, что направление оси максимального сжатия в месте возникновения скола 2 могло претерпеть изменение в результате сдвига бортов скола 1.

Если сколы активизируются одновременно, то разница (или совпадение) их ориентаций говорит о такой же разнице направлений оси максимального сжатия в точках их возникновения.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты поля напряжений показывают, что поворот осей главных напряжений влечет за собой такой поворот направления скалывания, что новое направление скалывания соответствует наблюдаемой ориентации *P*-сколов. Достаточно очевидно, что ориентация сколов определяется именно поворотом оси максимального сжатия. Кроме того, вычисления при разных значениях параметров задачи дают несколько отличающиеся значения нового направления скалывания, не связанные с углом наклона *R*-сколов. Таким образом, первый вывод состоит в том, что угол наклона *P*-сколов зависит в первую очередь от величины сдвига бортов соседних *R*-сколов, который, в свою очередь, влияет на нагрузку в блоке материала между сколами, и оси максимального сжатия в этом блоке.

Кроме того, можно с уверенностью утверждать, что *P*-сколы не следует классифицировать как сколы, отклоняющиеся от оси основного сдвига на угол, равный углу отклонения *R*-сколов.

В качестве еще одного важного вывода следует отметить, что принцип образования новых сколов в направлении, совпадающем с направлением, для которого максимально кулоновское напряжение, верен, по-видимому, далеко не только для зон сдвига. Говорить о сохранении угла между осью максимального сжатия в точке среды и сколом, возникающим в этой точке, можно в отношении произвольных массивов, находящихся в условиях сжатия (чтобы имел смысл критерий Кулона – Мора), в которых, предположительно, сохраняется ориентация оси промежуточного главного напряжения и возникают новые сколы. Отсюда следует, что, когда известна величина угла внутреннего трения породы, по направлению вновь возникающего скола можно восстановить локальное направление оси максимального сжатия. Предположение же, что плоскость скалывания ортогональна плоскости мак-

симального и минимального главных напряжений, позволяет восстановить все направления осей главных напряжений в точке возникновения скола в момент его появления.

Таким образом, можно сформулировать следующий способ определения осей наибольшего и наименьшего главных напряжений, существующих в месте возникновения скола в момент, непосредственно предшествующий его возникновению: если данная область массива находится в условиях сжатия и имеются основания предполагать направление промежуточной главной оси тензора напряжений, то угол между осью максимального сжатия и плоскостью сместителя равен углу скалывания, отложенному против часовой стрелки в случае левого сдвига и против часовой стрелки в случае правого сдвига. Необходимая ортогональность промежуточной оси дает однозначное положение оси σ_3 , ось минимального сжатия также восстанавливается однозначно.

Здесь следует обязательно отметить, что этот подход относится именно к возникновению сколов, поэтому плохо применим к природным массивам, во-первых, ввиду их раздробленности. Смещения, как правило, происходят по ранее существовавшим нарушениям сплошности, и в этом случае нет строгой зависимости между ориентацией плоскости смещения и осью максимального сжатия независимо от положения точки текущего разрушения на диаграмме Мора [Rebetsky et al., 2017]. Во-вторых, в большинстве случаев нет возможности наблюдать возникновение скола. В случае природного массива приходится иметь дело с трещинами, возникшими много ранее. Ориентация содержащего скол блока могла измениться с момента возникновения скола, блок мог испытать деформации. Кроме того, скол, возникший в природном массиве, несет информацию только о напряженном состоянии в месте своего возникновения и не позволяет делать никаких выводов о масштабном уровне проявленного поля напряжений.

Однако ситуация кардинально меняется, если говорить о физическом моделировании тектонофизических процессов. Каждое вновь появляющееся сколовое нарушение четко отражает напряженное состояние в месте своего возникновения. Это дает возможность отследить изменение поля напряжений в процессе эксперимента.

Иными словами, ориентация новых сколовых нарушений является точным индикатором поворота осей главных напряжений. Чтобы определить угол поворота, даже нет необходимости знать значение угла скалывания породы: достаточно учитывать, что угол между осью максимального сжатия и сколом в момент его возникновения всегда одинаков. То есть, если в некоторой области возникали сколы в определенном направлении, а с какого-то момента начали возникать в другом, значит, в данной области произошел поворот оси максимального сжатия на тот же угол, на который изменилось направление образования сколов.

Приведенный принцип в дальнейшем можно, в частности, применить к исследованию изменения поля напряжений в области активного структурообразования сдвиговой зоны для ранней дизъюнктивной и поздней дизъюнктивной стадии эксперимента на сдвигание. По ходу эксперимента происходит накопление большого количества сколовых нарушений. Эти нарушения имеют разную ориентацию, часто отличную от ориентации сколов, возникающих самыми первыми. Это отличие связано с тем, что каждая подвижка по каждому нарушению, как по только что возникшему, так и по уже существовавшему, приводит к изменению поля напряжений в своей окрестности (в упругом случае размер этой окрестности сопоставим с размером сегмента, на котором произошла подвижка [Osokina, Fridman, 1987; Lermontova, Rebetsky, 2012]). В частности, главные оси тензора напряжений испытывают поворот, что и является причиной отличия ориентации вновь возникающих нарушений от старых. Описанный в настоящей работе способ определения изменения ориентации главных осей по вновь возникающим сколам должен позволить довольно подробно отследить изменение напряженного состояния на низком масштабном уровне, соответствующем масштабному уровню этих сколов.

Хочется отдельно подчеркнуть, что современные возможности численного моделирования позволяют контролировать параметры напряженного состояния в ходе численного эксперимента, однако, как и любой другой метод, численное моделирование нуждается в подтверждении результатов другими методами. И определение поворота осей главных напряжений по ориентациям вновь возникающих сколов в физическом эксперименте может являться одним из эффективных способов такой проверки.

9. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью. Автор прочел и одобрил финальную версию перед публикацией.

The author has no conflicts of interest to declare relevant to this manuscript. The author read and approved the final manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Borniyakov S.A., 1981. Tectonophysical Analysis of the Process of Formation of the 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].

Borniyakov S.A., Seminsky K.Zh., Buddo V.Yu., Miroshnichenko A.I., Cheremnykh A.V., Cheremnykh A.S., Tarasova A.A., 2014. Main Regularities of Faulting in Lithosphere and Their Application (Based on Physical Modelling Results).

Geodynamics & Tectonophysics 5 (4), 823–861 (in Russian) [Борняков С.А., Семинский К.Ж., Буддо В.Ю., Мирошнichenko А.И., Черемных А.В., Черемных А.С., Тарасова А.А. Основные закономерности разломообразования в литосфере и их прикладные следствия (по результатам физического моделирования) // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 4. С. 823–861]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-4-0159>.

Frolova N.S., Korbutyak A.N., Mishakina A.A., Korpach S.V., 2016. Deformation Development in Shear Zones: The Results of Physical Modeling in Sand. In: Tectonophysics and Challenges in Earth Sciences. Proceedings of the Fourth Tectonophysical Conference in the IPE RAS (October 03–08, 2016). Vol. 2. IPE RAS, Moscow, p. 385–392 (in Russian) [Фролова Н.С., Корбутяк А.Н., Мишакина А.А., Корпач С.В. Развитие деформаций в зонах сдвига: результаты физического моделирования с использованием песка // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы Четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН (03–08 октября 2016 г.). М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 2. С. 385–392].

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., Timurziev 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 Megashears 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. 939–991]. <https://doi.org/10.5800/gt-2014-5-4-0164>.

Gzovsky M.V., 1975. Fundamentals of Tectonophysics. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.].

Hancock P.L., 1985. Brittle Microtectonics: Principles and Practice. Journal of Structural Geology 7 (3–4), 437–457. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3).

Karimova A.A., Borniyakov S.A., 2020. The Evolution of the Discontinuous Structure of the Shear Zone as a Periodic Process (Based on Physical Modeling). The Bulletin of Irutsk State University. Series Earth Sciences 33, 44–52 (in Russian) [Каримова А.А., Борняков С.А. Эволюция разрывной структуры сдвиговой зоны как периодический процесс (по результатам физического моделирования) // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 44–52]. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.33.44>.

Korbutyak A.N., Frolova N.S., Mishakina A.A., 2018. Physical Modeling of Structuring in the Sedimentary Mantle Above a Basement Fault. Comparison with the En-Echelon Oil-and-Gas-Bearing Swell-Like Upheavals in Northern West-Siberia Platform. *Karotazhnik* 3 (285), 57–67 (in Russian) [Корбутяк А.Н., Фролова Н.С., Мишакина А.А. Физическое моделирование структурообразования в осадочном чехле над разломом фундамента. Сопоставление с эшелонированными нефтегазоносными валлообразными поднятиями севера Западно-Сибирской плиты // Каротажник. 2018. № 3 (285). С. 57–67].

Leonov M.G., Morozov Yu.A., Stephanov Yu.P., Bakeev R.A., 2018. Zones of Concentrated Deformation (Flower Structures): Field Observations and Modeling Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 693–720 (in Russian) [Леонов М.Г., Морозов Ю.А., Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А. Зоны концентрированной деформации (структуры цветка): натурные наблюдения и данные моделирования // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 3. С. 693–670]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-3-0368>.

Lermontova A.S., 2021. Stress Field in a Shear Zone, and Formation of the Main Fault. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (3), 499–507 (in Russian) [Лермонтова А.С. Поле напряжений внутри зоны сдвига и образование магистрального разлома // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 499–507]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0536>.

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).

Nikolaev P.N., 1977. Methods of Statistical Analysis of Fractures and Reconstruction of Tectonic Stresses. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration* 12, 103–115 (in Russian) [Николаев П.Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей напряжений // Известия вузов. Геология и разведка. 1977. № 12. С. 103–115].

Osokina D.N., Fridman V.N., 1987. A Study of the Regularities in the Stress Field Structure near the Shear Fault with Friction Between the Sides. In: *Stress and Strain Fields of the Earth's Crust*. Nauka, Moscow, p. 74–119 (in Russian) [Осокина Д.Н., Фридман В.Н. Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука, 1987. С. 74–119].

Pantelev I.A., Lozhkin D.V., Lyakhovsky V.A. 2024. Orientation of the Localized Damage Zone in a Brittle Solid Under True Triaxial Compression. *Mechanics of Solids*. T. 59. № 5. С. 2776–2788. <https://doi.org/10.3103/s0025654422050107>.

Pantelev I.A., Lyakhovsky V.A., 2022. Orientation of Fracture in a Brittle Solid Under Conventional Triaxial Compression. *Mechanics of Solids* 57 (5), 1016–1034. <https://doi.org/10.3103/s0025654422050107>.

Parfenov V.D., 1984. On Tectonophysical Analysis Method for Geological Structure. *Geotectonics* 1, 60–72 (in Russian) [Парфенов В.Д. К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. 1984. № 1. С. 60–72].

Paul B., 1975. Macroscopic Criteria for Plastic Flow and Brittle Fracture. In: H. Liebowitz (Ed.), *Fracture. An Advanced Treatise*. Vol. 2. Mathematical Fundamentals. Mir, Moscow, p. 336–520 (in Russian) [Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение. Математические основы теории разрушения / Ред. Г. Либовиц. М.: Мир, 1975. Т. 2. С. 336–520].

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].

Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V., 2017. From Slickenside to Tectonic Stresses. *Techniques and Algorithms*. GEOS, Moscow, 234 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.].

Rzhevsky V.V., 1975. Physical and Technical Parameters of Rocks. Nauka, Moscow, 212 p. (in Russian) [Ржевский В.В. Физико-технические параметры горных пород. М.: Наука, 1975. 212 с.].

Schulson E.M., 2004. Compressive Shear Faults Within Arctic Sea Ice: Fractures on Scales Large and Small. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 109 (C7), C07016. <https://doi.org/10.1029/2003JC002108>.

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: Гео, 2003. 244 с.].

Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults (Modelling Results). Nauka, Novosibirsk, 112 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.].

Stefanov Yu.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>.

Stefanov Yu.P., Bakeev R.A., Rebetsky Yu.L., Kontorovich V.A., 2013. Structure and Formation Stages of a Fault Zone in a Geomedium Layer in Stick-Slip Displacement of the Base. *Physical Mesomechanics* 16 (5), 41–52 (in Russian) [Стефанов Ю.П., Бакеев Р.А., Ребецкий Ю.Л., Конто-

рович В.А. Структура и стадии формирования разломной зоны в слое геосреды при разрывном горизонтальном сдвиге основания // *Физическая мезомеханика*. 2013. Т. 16. № 5. С. 41–52].

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. *GSA 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).

Tsytovich N.A., 1979. Mechanics of Grounds. Vysshaja Shkola, Moscow, 272 p. (in Russian) [Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1979. 272 с.].